

Федеральное Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»  
(НИТУ МИСИС)

---

Горный институт  
Кафедра безопасности и экологии горного производства

На правах рукописи

Федоров Денис Анатольевич

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

Специальность 2.10.3 – «Безопасность труда»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук Кобылкин Сергей Сергеевич

Москва – 2026

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	11
1.1 Динамика развития горнодобывающей отрасли.....	11
1.2 Анализ состояния проветривания горных предприятий .....	13
1.3 Проектирование вентиляции и учет аэродинамического сопротивления .	17
1.4 Лобовые аэродинамические сопротивления в рудничной вентиляции .....	26
1.5 Классификация лобовых аэродинамических сопротивлений.....	35
Выводы и постановка задач исследований .....	41
ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ.....	44
2.1 Методика экспериментального определения величин депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением и коэффициента лобового аэродинамического сопротивления .....	44
2.2 Анализ результатов натуральных экспериментов на Кировском руднике АО «Апатит» .....	52
2.3 Анализ результатов натуральных экспериментов на шахте Шерегешская.....	54
2.4 Анализ результатов натуральных экспериментов на руднике ООО «Кнауф Гипс Новомосковск» .....	55
2.5 Анализ результатов натуральных экспериментов на руднике Узельгинский .	56
2.6 Обобщенный анализ результатов натуральных экспериментов .....	58
2.7 Лабораторный эксперимент по определению величины лобового аэродинамического сопротивления .....	60
Выводы .....	64
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕНТИЛЯЦИИ.....	66
3.1 Верификация численного моделирования .....	67

3.2 Построение моделей объекта исследований для проведения численных экспериментов .....	70
3.3 Построение расчетных сеток, выбор модели турбулентности и задание граничных условий .....	72
3.4 Анализ влияния факторов, определяющих величину аэродинамического лобового сопротивления и коэффициента лобового сопротивления.....	77
Выводы .....	84
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЧЕТУ ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕНТИЛЯЦИИ.....	86
4.1 Разработка методики натуральных измерений лобовых аэродинамических сопротивлений.....	86
4.2 Разработка методики численного расчёта величины лобовых сопротивлений при проектировании вентиляции .....	90
4.3 Рекомендации учета лобовых сопротивлений при проектировании вентиляции.....	92
4.4 Расчёт проветривания горных выработок рудника «Скалистый» с учетом лобовых аэродинамических сопротивлений.....	94
Выводы .....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ .....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ФОРМЫ ИЗМЕРЕНИЙ К МЕТОДИКЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИНЫ ЛОБОВОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ .....	137

## ВВЕДЕНИЕ

**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.

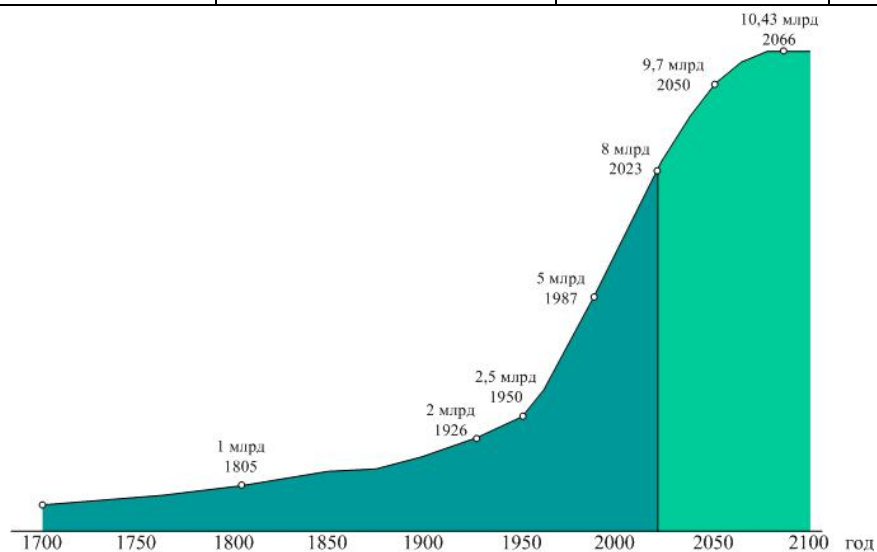
# ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Динамика развития горнодобывающей отрасли

Горнодобывающая отрасль России одна из самых развитых в мире. По многим запасам полезных ископаемых Россия занимает первое или второе место среди всех стран (таблица 1.1). При продолжающемся росте населения в мире (рисунок 1.1) спрос на ресурсы будет возрастать.

**Таблица 1.1 – Запасы полезных ископаемых в России**

№	Ресурс	Доля РФ в мире, %	Место в мире	Стоимость ресурса, млрд руб. (в ценах 2023 года)
1	Уголь	30	2	1557000
2	Железная руда	27	1	941000
3	Апатиты	55	1	134800
4	Калийные соли	31	2	55800
5	Ниобий	35	1	61200
6	Тантал	48,6	1	51000
7	Никель	36	1	24100
8	Титан	17,3	2	23900
9	Фосфориты	25	2	11700
10	Уран	14	3	5600
11	Цинк	16	1	4100
12	Алмазы	26	2	1600
13	Платина	40	1	450
14	Палладий	31,4	1	140
15	Олово	12	1	12

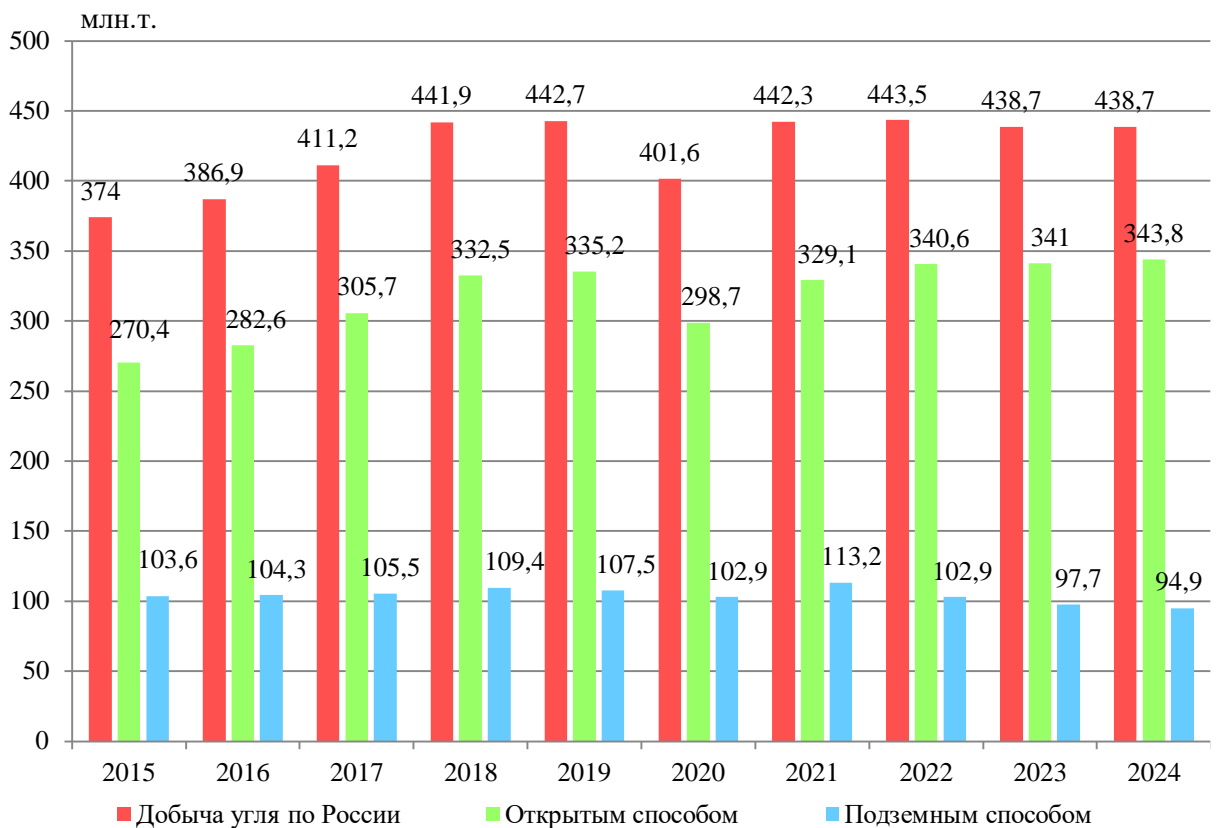


**Рисунок 1.1 – Рост населения в мире**

В настоящее время в России добычу полезных ископаемых подземным способом ведут 284 горных предприятия:

- 141 шахта (зарегистрированы в реестре опасных производственных объектов, в том числе 3 нефтешахты, а также 49 шахт в Донецкой народной республике и 14 Луганской народной республике),
- 143 рудника.

Добыча угля подземным способом в последние годы остается практически на одном уровне (рисунок 1.2). Однако, в России ожидается рост добычи за счёт восстанавливаемых шахт Донбасса.



**Рисунок 1.2 – Динамика добычи угля в России**

По группе драгоценных и редкоземельных металлов наблюдается стабильный рост по добыче. Например, добыча золота в России растет, так в 2023 году добыли 300 т, а в 2024 уже 328 т (+9,3%). Большой мировой спрос на калийные и фосфатные удобрения также способствуют росту производительности на горных предприятиях. Наблюдается рост потребности

в металлах (никеле, железе, меди), что также способствует увеличению производительности действующих рудников и строительству новых.

Увеличение интенсивности ведения горных работ приводит к планомерному росту протяженности горных выработок, увеличению глубины ведения горных работ, росту газообильности, увеличению мощности горных машин с двигателями внутреннего сгорания, а также объема применяемых взрывчатых веществ.

Безопасность и эффективность горных работ всё больше зависят от состояния вентиляции, правильно принятых решений в части выбора схемы и способа проветривания, подбора вентиляторных установок, вентиляционных сооружений и устройств воздухоподготовки с учетом всех видов аэродинамического сопротивления.

Для оценки текущего состояния аэрологической безопасности горных предприятий важно провести детальный анализ проветривания по действующим шахтам и рудникам.

## **1.2 Анализ состояния проветривания горных предприятий**

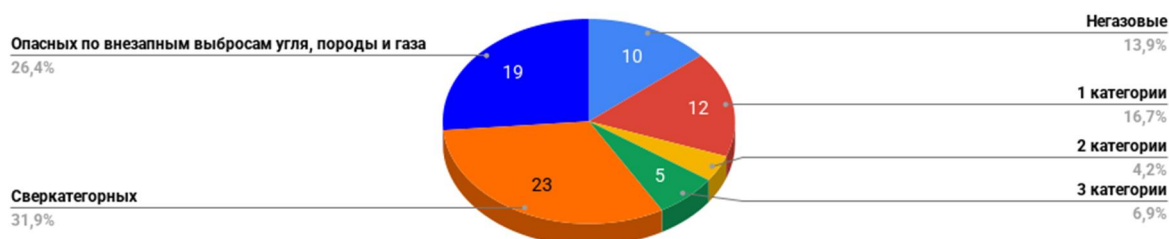
По состоянию на 01.01.2025 года в Российской Федерации функционируют 75 угольных шахт<sup>1</sup>, из них 56 шахт осуществляют добычу угля. За 2024 год подземным способом добыто 94,9 миллионов тонн угля, около трети от общего количества.

62 обслуживаемые шахты являются газовыми, около 80%, в том числе 47 шахт (63%) с категорией по метану III и выше. Данные о категорийности шахт отражены на рисунке 1.3.

На 48 шахтах (64%) применяется нагнетательный способ проветривания, всасывающий на 13 шахтах (17%) и на 4 шахтах применяется комбинированный (нагнетательно-всасывающий) способ проветривания.

---

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



**Рисунок 1.3 – Категорийность угольных шахт**

По схемам проветривания шахты распределились следующим образом:

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

На угольных шахтах более 510 участков опасных по слоевым скоплениям метана.

В отчетах воздушно-депресссионных съёмов по проводимых на шахтах неоднократно делаются выводы, что эксплуатируются вентиляторы главного проветривания, которые не имеют резерва подачи воздуха на перспективное развитие горных работ.

При определении устойчивости проветривания шахт на основании детального расчета служб депрессионных съёмов ФГУП «ВГСЧ» в отчетах по проведению воздушно-депресссионных съёмов сделаны выводы, что на 14 шахтах определена III категория устойчивости проветривания. Согласно Руководства [8] III категория устойчивости является схемой с низкой степенью устойчивости, при которой имеют место изменения расхода воздуха в лавах и на выемочных участках более 50%, у всасов ВМП более 70% от расчетного. Опрокидывание вентиляционной струи возможно при работе шахты в нормальном технологическом режиме.

Разработанные и предоставленные мероприятия по переводу из III категории устойчивости во II категорию не могут гарантировать, что выполнение шахтой данных мероприятий даст положительный результат.

На сегодняшний день:

- трудно проветриваемых шахт – 14 (в 2023 году их было 6);
- средней трудности проветривания – 33;
- легко проветриваемых – 16.

В 2024 году в сравнении с аналогичным периодом 2023 года, на основании проведенного анализа, на 9 шахтах с проблемами проветривания был отмечен рост количества случаев загазирования очистных и тупиковых выработок более чем в 2 раза (филиал «Шахта «Ерунаковская-ВШ» АО «ОУК «Южкузбассуголь», ООО «Шахта Спиридоновская», ООО «Шахта «Осинниковская», ООО «Шахта «Юбилейная», ООО «Шахта «Алардинская», АО «СУЭК-Кузбасс» Шахтоуправление «Талдинское-Западное» Шахта «Талдинская-Западная-1», ООО «МКК-Уголь» Шахта «Чертинская-Коксовая», ООО «Шахта Сибирская», АО «СУЭК-Кузбасс Шахта им. В.Д. Ялевского).

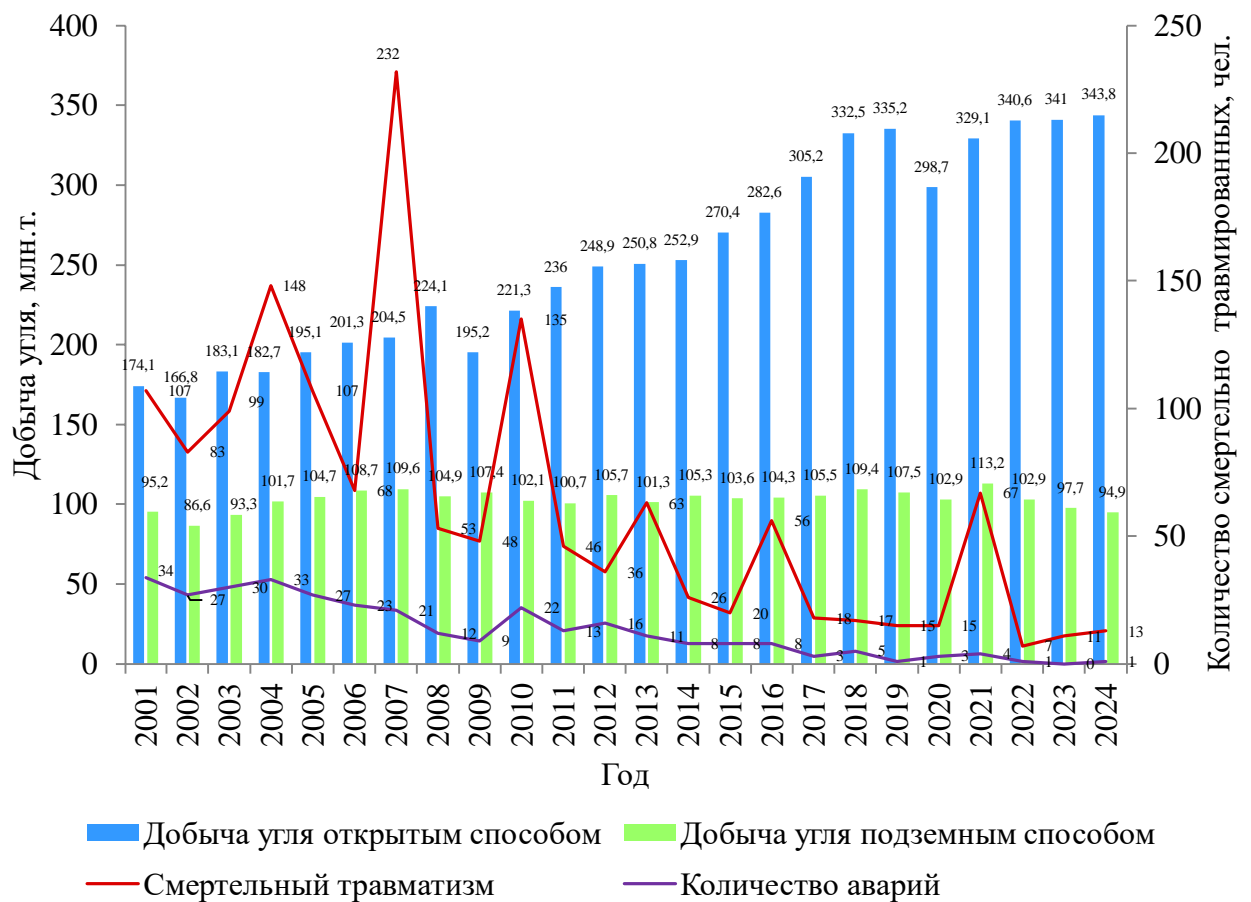
Следует отметить, что за счет увеличения вентиляционных сетей увеличилась нагрузка на вентиляторы главного проветривания, возрастает депрессия шахт. Так же увеличилась нагрузка на одну производственную единицу, что, в свою очередь, привело к увеличению объемов выделения горючих примесей (метана). Решение задач в части оптимизации вентиляционных сетей, как правило, ограничиваются фактическим положением горных работ. Внесение существенных изменений требует реконструкции действующих предприятий. Пути решения вышеуказанных задач:

- увеличение расхода воздуха, подаваемого в шахту, а именно, применение современных высокопроизводительных вентиляторов;
- бурение скважин большого диаметра под выпуск исходящей струи воздуха и увеличение площади поперечного сечения горных выработок;
- оптимизация схем проветривания выемочных участков.

При этом необходимо обратить внимание на отсутствие нормативного документа по проектированию вентиляции горных предприятий. Если

до регуляторной гильотины для угольных шахт действовало достаточно подробное, хоть и морально устаревшее Руководство [8], то в настоящее время горные компании самостоятельно разрабатывают Технологические регламенты для проектирования проветривания.

Статистика по авариям на угольных шахтах приведена на рисунке 1.4. Следует отметить, что смертельный травматизм на разрезах практически по всем годам за рассматриваемый период в среднем 1 человек в год.



**Рисунок 1.4 – Данные о количестве добытого угля и смертельно травмированных людей в организациях по добыче угля**

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 шахты 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, что несмотря на общее снижение числа случаев, последствия от нарушения проветривания зачастую носят катастрофический характер. Наиболее крупные аварии, произошедшие на угольных в России за последние 20 лет представлены в таблице 1.2.

**Таблица 1.2 – Наиболее крупные аварии, произошедшие на угольных шахтах за последние 20 лет**

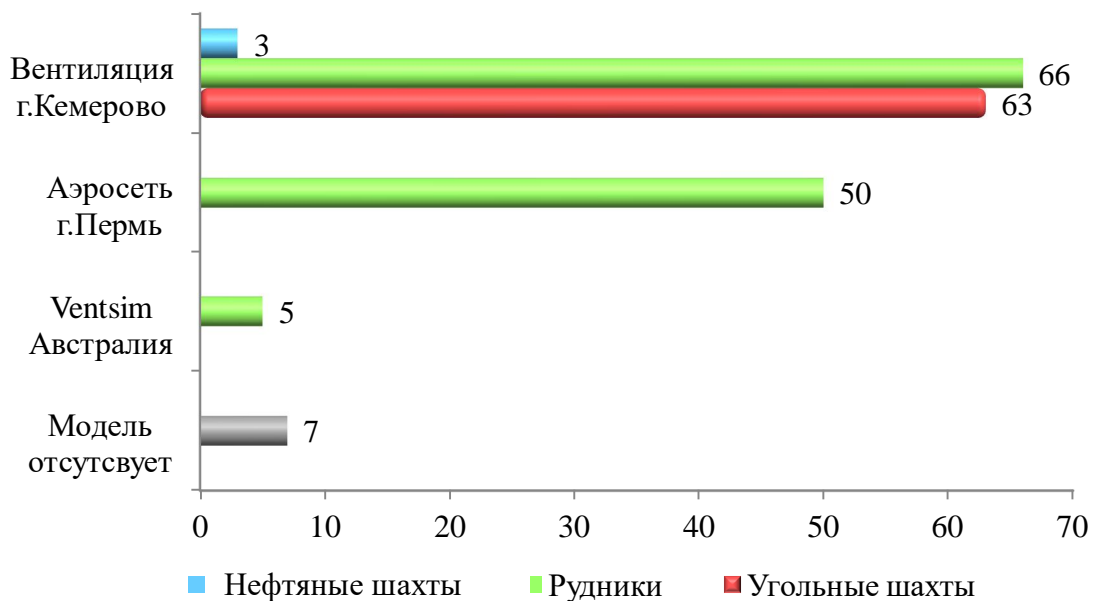
Год	Наименование ОПО	Вид аварии	Количество погибших людей
2004	«Шахта Тайжина»	взрыв газа и пыли	47
2005	«Шахта Есаульская»	пожар в горных выработках, осложненный взрывом	25 (в том числе 17 горноспасателей)
2006	шахта «Центральная»	пожар в горных выработках	25
2007	«Шахта Ульяновская»	взрыв газа и пыли	110
2007	«Шахта Юбилейная»	взрыв газа и пыли	39
2010	шахта «Распадская»	взрыв газа и пыли	90 (в том числе 20 горноспасателей)
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)

### **1.3 Проектирование вентиляции и учет аэродинамического сопротивления**

В настоящее время проектированием проветривания шахт и рудников занимаются профильные научные институты (например, ВостНИИ, ГИ УрО РАН и др.) и частные организации (ООО «СПб Гипрошахт», ООО «Институт Гипроникель» и др.).

Как отмечалось ранее, методические документы по проектированию вентиляции шахт и рудников в настоящее время отсутствуют. Основные положения утратившего силу нормативного документа [8] перешли в действующие нормативные документы [35, 36] без существенных изменений, т.е. без необходимой корректировки.

В настоящее время при проектировании опасных производственных объектов, осуществляющих добычу угля подземным способом, а также для выполнения необходимых расчётов проветривания в Российской Федерации используют программы на основе топологии горных выработок (рисунок 1.5). По состоянию на 01.01.2025 год создано 187 моделей. На 7 рудниках компьютерные программы для расчёта воздухораспределения, депрессии и параметров работы вентиляторов не применяются.



**Рисунок 1.5 – Сведения о программах, используемых на опасных производственных объектах**

При проектировании вентиляции порядок остается единый для всех горных предприятий. На первом этапе определяют прогнозные значения по поступлению вредностей в рудничную атмосферу, затем рассчитывают необходимое и достаточное количество воздуха. Оно должно разбавить вредные примеси до предельно допустимых значений и вынести их в атмосферу. 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.

В рудничной аэрологии в России выделяют три вида аэродинамического сопротивления:

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

В зарубежных странах лобовое аэродинамическое сопротивление отнесено к местным аэродинамическим сопротивлениям.

При проектировании вентиляции угольных шахт учитывается аэродинамическое сопротивление трения. Оно обусловлено трением движущегося воздуха о борта, почву и кровлю горных выработок. Исследованиями данного вида аэродинамических сопротивлений посвящено большое количество работ, выдающихся ученых, таких как А.А. Скочинский, В.Б. Комаров, А.И. Ксенофонтова, П.И. Мустель, В.В. Кашибадзе, А.А. Харев, и др. [6, 13, 17-27].

О местных аэродинамических сопротивлениях в последнее время известно много научных работ [27-32, 41-42]. Одна из фундаментальных работ в изучении местных сопротивлений выполнена в ГИ УрО РАН М.А Семиным [31]. В данной работе проведена оценка вклада местных аэродинамических сопротивлений сопряжений горных выработок в общее сопротивление ШВС. Доказана необходимость учета местных аэродинамических сопротивлений при расчете воздухораспределения. Однако, они практически никак не учитываются в расчётах. По мнению некоторых авторов, их общешахтная величина может достигать до 20% [27-32], а по некоторым данным до 50 % [34] от общей величины аэродинамического сопротивления трения в зависимости от схемы проветривания. В Руководстве по проектированию вентиляции угольных шахт

[8] рекомендуется принимать во внимание, что величина общего шахтного аэродинамического сопротивления, обусловленного местными потерями, принимается равной 10 % от общего аэродинамического сопротивления трения, однако в работе [33] данное решение подвергается сомнению.

Лобовые аэродинамические сопротивления изучены в меньшей степени [50-53]. В настоящее время под лобовыми аэродинамическими сопротивлениями принято понимать сопротивление, оказываемое потоку находящимся в нем телом [9-11]. К ним относят: расстрелы, рудничные стойки, вагонетки, горное оборудование (без указания типа этого оборудования).

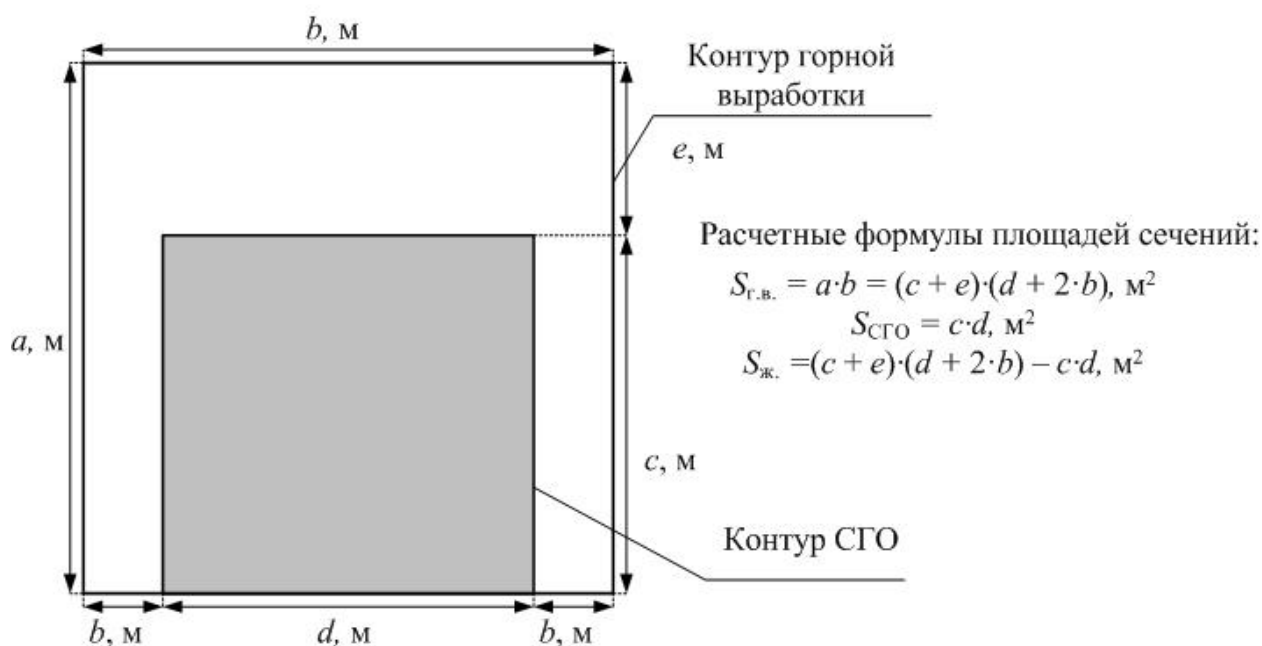
Пермская научная школа в области аэрологии горных предприятий проводит большое количество исследований в области изучения аэродинамических сопротивлений и основного закона рудничной вентиляции [65-74]. В настоящее время вопросы лобовых сопротивлений в стволах, обусловленные движущимися сосудами (клеть, скип или бадья) активно исследуются в ГИ УрО РАН под руководством Л.Ю. Левина и М.А. Семина [65-66]. Отмечается сложность проведения натурных измерений, существенное влияние на аэродинамику и появление поршневого эффекта. В работах при исследовании лобового сопротивления используется численное компьютерное моделирование. Также разработана методика учета добавочного сопротивления, вызванного поршневым эффектом от движущейся клетки [68-70]. Все эти исследования используются при проектировании вентиляции рудников с учетом сложности систем вентиляции и большого числа одновременно работающих вентиляторов главного проветривания [73, 74].

Изучением «поршневого» эффекта, возникающего при движении горной техники, также занимались в ПНИПУ под руководством Н.Н. Мохирева [75-77]. В Санкт-Петербургском Горном университете императрицы Екатерины II под руководством С.Г. Гендлера проводят исследования по изучению



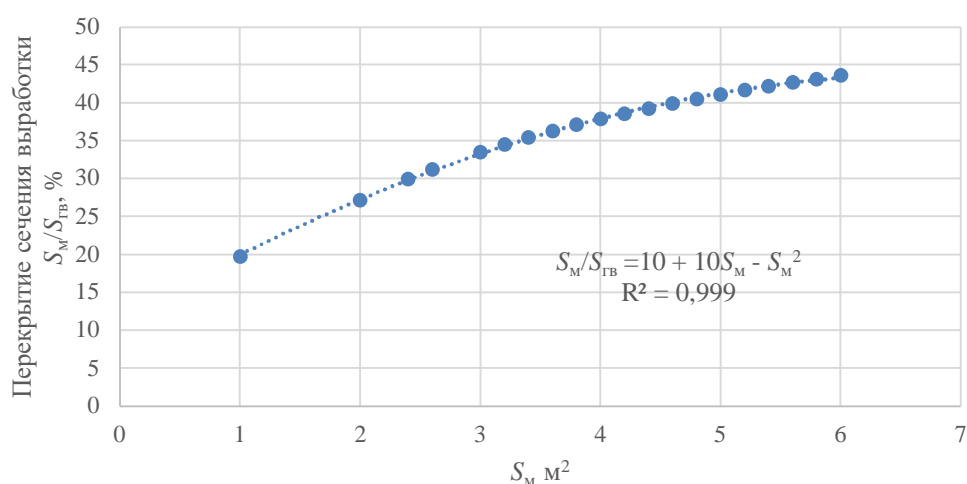
Таблица 1.3 – Выбора типоразмеров СГО

Параметры	Условные обозначения / расчет. ф-ла	Значение
Ширина самоходного оборудования	$d$	спец.
Ширина проезжей части при движении со скоростью:		
до 10 км/ч	$A = d$	спец
более 10 км/час	$A > d$	расчет
	$A = d + 1,5C + 12v$	
Минимальный зазор (мм) между СГО и бортом (крепью) выработки при движении со скоростью:		
до 10 км/ч	$b$	500
более 10 км/час		600
Ширина профиля покрышки, мм	$C$	спец.
Скорость движения транспорт. средства, км/ч	$v$	спец.
Ширина пешеходной дорожки:		
при наличии бордюра	$a$	1000
при устройстве ниш через 25 м (размеры Д:В:Ш - 1200x1800 x700)		1000
без бордюра и ниш		1200
Ширина выработки в свету, мм	$B = d + 2b$	расчет
	$B = a + A + b$	расчет
Ширина выработки в черне, мм	$B_1 = B + 2\delta$	расчет
Толщина крепи, мм	$\delta$	90
Высота самоходного оборудования, мм	$h$	спец.
Высота выработки от дорожного покрытия до центра радиуса сопряжения прямолинейной и криволинейной частей крепи выработок, мм	$h_1$	расчет
Минимальная высота свободного прохода, мм	$h_2$	1800
Расстояние от почвы выработки до центра радиуса сопряжения прямолинейной и криволинейной частей крепи выработки, мм	$h_3$	расчет
Расстояние от центра радиуса сопряжения прямолинейной и криволинейной частей крепи выработки до замка свода, мм	$h_0$	расчет
Высота выработки от почвы до замка свода крепи, мм	$H$	расчет
Высота выработки от дорожного покрытия до замка свода крепи, мм	$H_c$	расчет
Высота выработки в черне, мм	$H_0$	расчет
Зазор между кабиной транспортного средства и:		
крепью (трубопроводов), мм	$e$	500
кровлей выработки (СГО без козырька или кабины), мм		1300
Толщина дорожного покрытия, мм	$h_{\Pi}$	100
Ширина пешеходной дорожки, мм	$b_{\Gamma}$	800
Толщина покрытия пешеходной дорожки, мм	$h_{\Gamma}$	100 ÷ 300
Радиус осевой дуги, мм	$R$	расчет
Радиус боковой дуги, мм	$r$	расчет
Периметр выработки, мм	$P$	расчет
Площадь сечения выработки, м <sup>2</sup>	$S$	расчет



**Рисунок 1.7 – Схема к расчёту сечения горной выработки с учетом нахождения в ней лобового аэродинамического сопротивления**

При соблюдении всех требований нормативных документов перекрытие сечения горной выработки может достигать 50 % в зависимости от высоты и ширины СГО (рисунок 1.8). Наличие данного аэродинамического сопротивления может привести к существенному перераспределению воздушного потока и превышению предельно допустимых концентраций вредных и опасных газов в горных выработках.



**Рисунок 1.8 – График зависимости перекрытия сечения горной выработки от миделева сечения объекта, создающего лобовое аэродинамическое сопротивление**

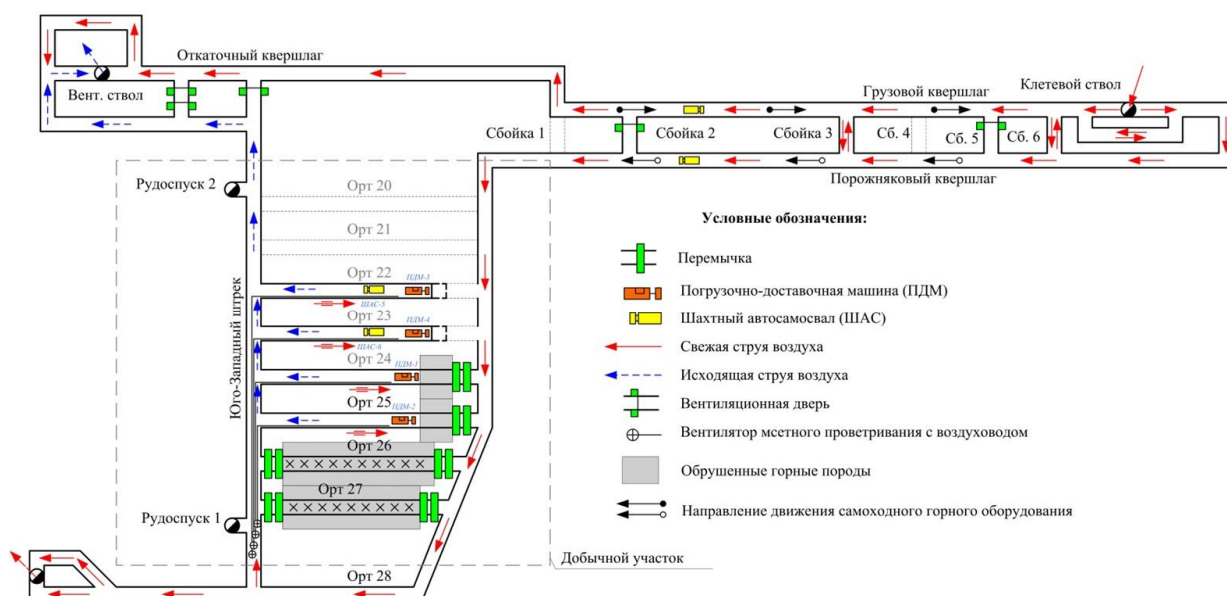
**Таблица 1.4 - Количество случаев загазирования на угольных шахтах Кемеровской области-Кузбасса за 2024 год**

№ п/п	Наименование шахты	За 2024 год			Примечание
		Всего	Технологических	Аварийных	
1	Шахта №1	0	0	0	
2	Шахта №2	2	0	2	
3	Шахта №3	3	3	0	
4	Шахта №4	16	8	8	
5	Шахта №5	0	0	0	консервация
6	Шахта №6	0	0	0	консервация
7	Шахта №7	38	16	22	
8	Шахта №8	14	5	9	
9	Шахта №9	4	2	2	
10	Шахта №10	4	4	0	
11	Шахта №11	1	1	0	
12	Шахта №12	27	13	14	
13	Шахта №13	0	0	0	консервация
14	Шахта №14	11	6	5	
15	Шахта №15	51	30	21	
16	Шахта №16	11	9	2	
17	Шахта №17	57	47	10	
18	Шахта №18	0	0	0	консервация
19	Шахта №19	15	9	6	
20	Шахта №20	4	2	2	
21	Шахта №21	10	5	5	
22	Шахта №22	0	0	0	консервация
23	Шахта №23	13	12	1	
24	Шахта №24	1	1	0	
25	Шахта №25	17	10	7	
26	Шахта №26	38	33	5	
27	Шахта №27	2	2	0	
28	Шахта №28	31	29	2	
29	Шахта №29	0	0	0	
30	Шахта №30	2	2	0	
31	Шахта №31	0	0	0	
32	Шахта №32	0	0	0	консервация
33	Шахта №33	0	0	0	консервация
34	Шахта №34	6	2	4	
35	Шахта №35	3	1	2	
36	Шахта №36	1	1	0	
37	Шахта №37	46	38	8	
38	Шахта №38	160	115	45	

№ п/п	Наименование шахты	За 2024 год			Примечание
		Всего	Технологических	Аварийных	
39	Шахта №39	122	79	43	
40	Шахта №40	35	26	9	
41	Шахта №41	103	83	20	
42	Шахта №42	2	2	0	
43	Шахта №43	12	12	0	
44	Шахта №44	0	0	0	консервация
45	Шахта №45	12	11	1	
46	Шахта №46	5	5	0	
47	Шахта №47	0	0	0	
48	Шахта №48	1	1	0	
<b>Итого по Кузбассу</b>		<b>880</b>	<b>625</b>	<b>255</b>	

В Таблице 1.4 показано количество случаев загазирования на угольных шахтах Кузнецкого угольного бассейна, только в 2024 году произошло 880 загазирования. И это только случаи, зафиксированные Ростехнадзором. Фактически их больше.

Рассмотрим формирование зоны загазирования на конкретном примере. На схеме проветривания откаточного горизонта действующего горного предприятия (рисунок 1.9) можно увидеть, что при движении шахтных самосвалов (далее – ШАС) происходит перераспределение воздушных потоков. При заезде СГО (ШАС или ПДМ) в порожняковый квершлаг увеличивается его аэродинамическое сопротивление. Большая часть воздуха идет по грузовому квершлагу до откаточного штрека и далее до вентиляционного ствола. Уменьшение количества воздуха в порожняковом квершлаге приводит к падению расхода в Юго-Западном штреке, в котором установлена группа вентиляторов местного проветривания, которые, в свою очередь, обеспечивают свежей струей воздуха добычные и проходческие участки (орты 22-25). Резкое (одномоментное) снижение количества воздуха может приводит к кратковременному загазированию.



**Рисунок 1.9 – Вентиляционный план откаточного горизонта**

Данный случай наглядно доказывает необходимость учета лобовых аэродинамических сопротивлений при проектировании вентиляции шахт и рудников.

Для учета лобовых аэродинамических сопротивлений необходимо более подробно ознакомиться с данным видом аэродинамического сопротивления.

#### 1.4 Лобовые аэродинамические сопротивления в рудничной вентиляции

До 1949 года отдельно термин «лобовые сопротивления» не встречается в технической литературе. Впервые термин появился в учебнике А.А. Скочинского и В.Б. Комарова [1].

В основе учебника Скочинского А.А. и Комарова В.Б. лежала монография последнего, подготовленная совместно с Борисовым Д.Ф. в 1938 году [12], где лобовые аэродинамические сопротивления не упоминаются. При этом отмечено следующее: «местными сопротивлениями в вентиляции называются всякого рода повороты струй, сужения и расширения (и комбинации их между собой), входы в трубопроводы, задвижки и т.п. К специфическим для горного дела местным сопротивлениям относятся кроссинги, каналы вентиляторов, двери, отдельные вагонетки и поезда, стоящие идвигающиеся в выработках, и т.п.». Следовательно, то, что сегодня

мы относим к лобовым аэродинамическим сопротивлениям, до 1938 года называли «специфическим» местным аэродинамическим сопротивлением. В рассмотренной более ранней литературе как у отечественных ученых М.М. Протодяконова, Г.О. Чечотта, [14-16], так и у зарубежных Д. Мюрга (Devillez Murgue), Петит (Petit), Гибаль (Guibal) [17-19] термин «лобовое сопротивление» также не встречается. В целом авторы оперируют аэродинамическим сопротивлением трения и дополнительными потерями напора на поворотах, сужениях и расширениях каналов (воздуховодов, горных выработок). Следовательно, можно считать, что термин «лобовое сопротивление» введен А.А. Скочинским в 1949 году.

Определение данного термина по А.А. Скочинскому следующее [1]: «Давление движущегося воздуха на неподвижную площадку, поставленную поперек потока, равно  $v^2\gamma/2 \cdot g$ , кг/м<sup>2</sup>. Для определения давления воздуха на тело произвольной формы Скочинский А.А. и Комаров В.Б. определяют по опыту, а в теории как произведение скоростного напора на так называемое миделево сечение  $S_M$  и некоторый коэффициент  $c$ , зависящий от формы тела

$$p = c \cdot h_{ск} \cdot S_M = \gamma \cdot S_M \cdot c \cdot v^2 / 2g, \quad (1.1)$$

где  $v$  – скорость набегающего потока, м/с.

$c$  – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, безразмерная величина;

$\gamma$  – удельный вес воздуха (обычно в рудничной вентиляции за стандартный удельный вес воздуха принимают 1,2 кг/м<sup>3</sup>).

$h_{ск}$  – разность скоростных напоров при наличии разных скоростей в замерных сечениях, кг/м<sup>2</sup>;

Под миделевым сечением понимают наибольшее сечение тела в плоскости перпендикулярной потоку.

«Безразмерный коэффициент  $c$  определяется экспериментально. Если тело неподвижно, то оно, как говорят «сопротивляется» той силе  $p$ , которая действует «в лоб» тела и стремится его сдвинуть, поэтому коэффициент  $c$  называют коэффициентом лобового аэродинамического сопротивления

трения» [1]. Здесь же отмечается, что на обтекание тела затрачивается некоторая энергия из-за вихрей, которые образуются позади обтекаемого объекта. «При малых скоростях движения воздуха число Рейнольдса менее 100», пишут А.А. Скочинский и В.Б. Комаров. «По опытам коэффициент лобового аэродинамического сопротивления трения может считаться постоянной величиной, независимой от скорости движения воздуха». Далее авторы преобразуют свою формулу путем деления левой и правой ее части на площадь фактического сечения горной выработки, за вычетом площади обтекаемого тела, т.е.  $S - S_M$ .

$$p / (S - S_M) = \gamma \cdot S_M \cdot c \cdot v^2 / 2g \cdot (S - S_M), \text{ кг/м}^2. \quad (1.2)$$

Слева в данном выражении не что иное, как потеря давления на преодоление лобового аэродинамического сопротивления  $h_{л}$ .

$$h_{л} = \gamma \cdot S_M \cdot c \cdot v^2 / 2 \cdot g \cdot (S - S_M), \text{ кг/м}^2. \quad (1.3)$$

Так как  $h = R \cdot Q^2$ , то

$$R_{л} = h_{л} / Q^2 = \gamma \cdot S_M \cdot c \cdot v^2 / 2 \cdot g \cdot Q^2 \cdot (S - S_M), \text{ кг/м}^2. \quad (1.4)$$

Интересна также формула, которая приводится там же. Получена она сотрудником МГИ Карпухиным В.Д. для определения значения коэффициента трения ствола, армированного круглым или прямоугольными брусками.

$$\alpha = \alpha_0 + 0,0612 \cdot \Sigma c_n \cdot b_n \cdot d_n / l \cdot P \cdot (1 - \varphi) + 0,0612 \cdot S \cdot \varphi / l \cdot P \cdot (1 - \varphi), \quad (1.5)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент трения без армировки;

$l$  – расстояние между стойками или брусками, м

$P$  – периметр горной выработки, м;

$\varphi = S_M / S$ ;

$c_n$  – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления брусков при данном продольном калибре;

$b_n$  – длина отдельных элементов армировки, м;

$d_n$  – диаметр отдельных элементов армировки, м.

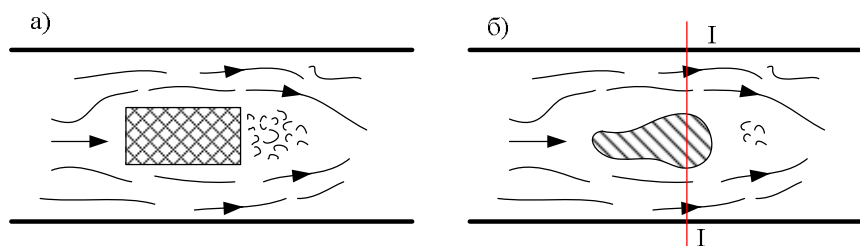
В формуле учтено аэродинамическое сопротивление трения ствола без армировки (первое слагаемое), лобовые аэродинамические сопротивления от армировки (второе слагаемое) и сопротивление сжатия потока воздуха во

времени его движения между элементами армировки (третье слагаемое). Более никто не обращался к учету распределения потерь, вызванных лобовыми аэродинамическими сопротивлениями.

У целого ряда авторов, в монографиях, учебниках и учебных пособиях [7, 37], справочниках определение данного термина немного видоизменяется. Значения коэффициента лобового аэродинамического сопротивления трения в данных работах не приводится.

Лобовое аэродинамическое сопротивление – общее аэродинамическое сопротивление тела потоку обтекаемого воздуха [7, 37-39]. К таким телам автор относит: расстрелы в стволах, крепь в очистных забоях, вагонетки в выработках. В данных работах добавляются некоторые схемы, поясняющие возникновение лобового аэродинамического сопротивления (рисунок 1.10а) и миделево сечение (рисунок 1.10б).

В учебниках [9-11] лобовым аэродинамическим сопротивлением называется сопротивление, оказываемое потоку находящимся в нем телом. Авторы отмечают, что в условиях горных выработок к лобовым аэродинамическим сопротивлениям относятся сопротивления тел, размеры которых поперек потока значительно превосходят размеры выступов шероховатости. К ним они относят армировки шахтных стволов, вагонеток, стоящих поперек выработки стоек. Там же отмечают, что для удобства расчётов ряд лобовых аэродинамических сопротивлений условно относить можно к аэродинамическому сопротивлению трения (армировки стволов, стойки индивидуальной крепи в лавах и др.).



**Рисунок 1.10 – Образование завихрений воздуха за телом при лобовом аэродинамическом сопротивлении движению струи (а) и миделево сечение (I-I) тела в плоскости, перпендикулярной потоку**

П.И. Мустель лобовое сопротивление относит только к шахтообразным выработкам, в частности, армированным стволам, называя их «своеобразным» видом шероховатости [38]. Он предлагает для подсчета такого сопротивления применять формулу И.Е. Идельчика [39], в которой коэффициент аэродинамического сопротивления трения увязан с коэффициентом лобового сопротивления

$$\alpha = K \cdot S^3 \cdot \Sigma S_M / S_{\text{ист.}} (l \cdot D^3)^{0,5}, \quad (1.6)$$

где  $\Sigma S_M$  – сумма миделевых сечений всех расстрелов, м<sup>2</sup>;

$l$  – расстояние между расстрелами по оси ствола, м

$D$  – диаметр ствола, м;

$K$  – опытный коэффициент, равный 0,033 для расстрелов прямоугольного профиля и 0,040 при двутавровом профиле расстрелов;

$S$  – площадь поперечного сечения ствола в свету бетонной крепи, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{ист.}}$  – площадь  $S$  за вычетом площади, занимаемой лестничным отделением, м<sup>2</sup>.

В справочнике [40] впервые приводятся данные по влиянию загромождения горных выработок породой, лесоматериалами и др. Для их учета рекомендуется увеличивать коэффициент аэродинамического сопротивления трения:

- при умеренном загромождении (воздухопроводы, водопроводные трубы, небольшое количество породы на почве) на 0,001;
- при среднем загромождении (вентиляционные трубы, большое количество «верхняка», частые вывалы породы, сюда же попало сужение сечения) на 0,003;
- при сильном загромождении (большие вывалы пород, скопление крепежных материалов, труб или оборудования, частые сужения) на 0,01.

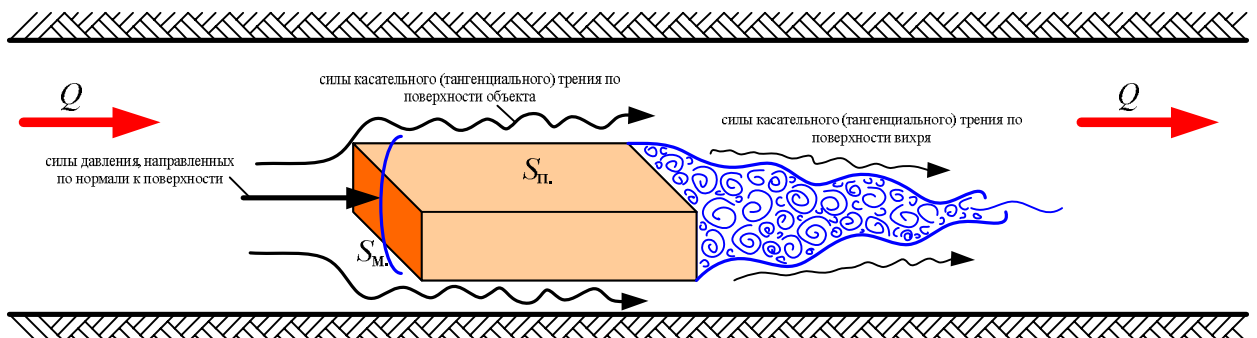
Там же подробно рассмотрены аэродинамические сопротивления трения стволов, даны соответствующие коэффициенты. Расстрелы учитываются как

аэродинамическое сопротивление трения. Про лобовые аэродинамические сопротивления ничего не сказано.

В аэродинамике есть четкое определение лобового аэродинамического сопротивления – сила, препятствующая движению тел в жидкостях и газах. Она состоит из суммы двух сил: сил касательного (тангенциального) трения, направленных вдоль поверхности тела, и сил давления, направленных по нормали к поверхности (имеется в виду миделево сечение). Аэродинамическое сопротивление – результат необратимого перехода части кинетической энергии тела в теплоту посредством образования вихрей, ударных волн, аэродинамического нагрева поверхностей. Аэродинамическое сопротивление зависит от формы и размеров тела, его ориентации к направлению движения (или к скорости набегающего потока), от скорости движения, а также от свойств и состояния среды. Оно является одной из составляющих полной аэродинамической силы, приложенной к поверхности движущегося тела, и определяется давлением среды, действующей на тело по нормали к его поверхности, и трением, возникающим между поверхностью тела и обтекающей его средой. Из данного определения видно, что лобовое аэродинамическое сопротивление трения состоит из трех частей:

- ударной волны, приходящейся на площадь объекта, перпендикулярную набегающему воздушному потоку;
- аэродинамического сопротивления трения по поверхности объекта;
- турбулентного сопротивления вихрей за объектом.

Наглядно это представлено на рисунке 1.11.



**Рисунок 1.11 – Варианты направления движения воздушного потока**

Влияние обтекаемости на относительные доли аэродинамического сопротивления трения о воздух и аэродинамического сопротивления формы показано в таблице 1.5 справа для аэродинамического профиля, который представляет собой обтекаемый корпус, и цилиндра, который представляет собой тупой корпус. Также показана плоская пластина в двух разных положениях, иллюстрирующая влияние ориентации на относительные доли аэродинамического сопротивления трения о воздух и аэродинамического сопротивления формы, а также демонстрирующая разницу в давлении спереди и сзади.

Тело называется обтекаемым, если в источнике сопротивления преобладают силы давления, и не обтекаемым, если в сопротивлении преобладают силы вязкости. Например, дорожные транспортные средства являются не обтекаемыми телами. Для самолётов сопротивление давлению и трению включено в определение профильного сопротивления (иногда называемое «паразитным»).

При выведении уравнения для определения величины депрессии, затрачиваемой при прохождении лобового аэродинамического сопротивления, А.А. Скочинский и В.Б. Комаров рассматривали случай с пластиной, перпендикулярно расположенной по отношению к направлению движения воздушной струи.

Очевидно, что в действительности, аэродинамическое сопротивление формы и влияние вязкости на трение будут в равной степени влиять на лобовое аэродинамическое сопротивление.


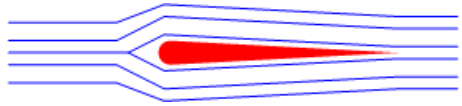
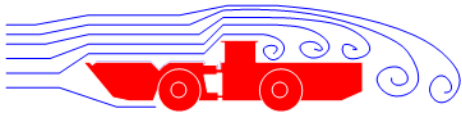
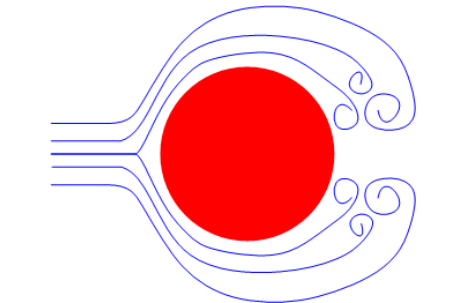
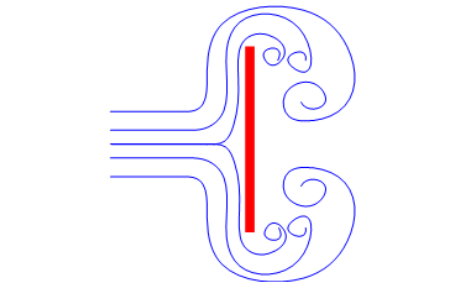
Когда воздух движется относительно системы отсчёта, например, когда автомобиль едет против ветра, мощность, необходимая для преодоления аэродинамического сопротивления, определяется по следующей формуле [41]

$$P_W = F v_0 = 0,5 \cdot c \cdot S \cdot \rho \cdot (v_B + v_0)^2 v_0, \quad (1.7)$$

где  $v_B$  – скорость ветра, м/с;

$v_0$  – скорость объекта, м/с (обе относительно земли).

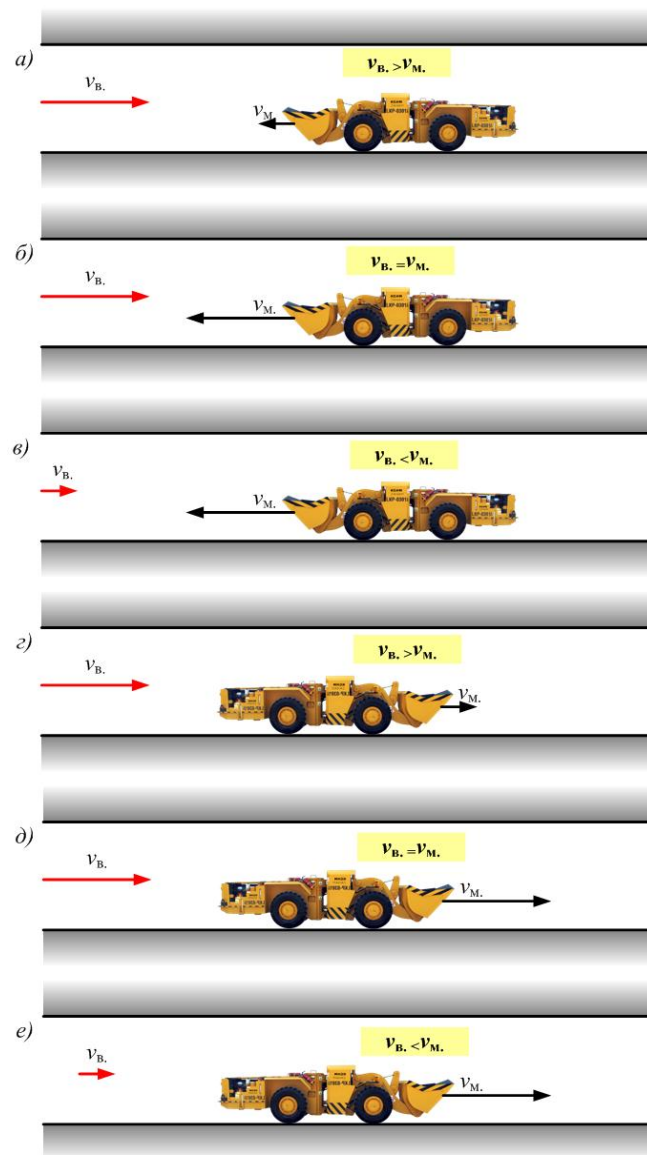
**Таблица 1.5 – Соотношение параметров, обуславливающих лобовое аэродинамическое сопротивление**

Поток и форма препятствия	Сопротивление формы, %	Влияние вязкости на трение, %
	~ 0	~ 100
	~ 10	~ 90
	~ 50	~ 50
	~ 90	~ 10
	~ 100	~ 0

При движении СГО по выработкам могут быть различные сочетания направления движений машины и воздушной струи (рисунок 1.12):

- а) машина едет навстречу воздушному потоку, при этом скорость движения машины меньше скорости движения воздуха. В таком случае можно рассматривать СГО как стоящее на одном месте, при этом скорость воздушного потока надо увеличить на величину скорости движения СГО;

- б) машина едет навстречу воздушному потоку, при этом скорость движения машины равна скорости движения воздуха. В таком случае можно рассматривать СГО как стоящее на одном месте, при этом скорость воздушного потока надо увеличить на величину скорости движения СГО. При данном варианте скорость движения воздуха будет максимальной;
- в) машина едет навстречу воздушному потоку, при этом скорость движения машины больше скорости движения воздуха. В данном варианте для определения величины лобового аэродинамического сопротивления необходимо прибегать к нестационарному расчёту, так как воздушный поток при определенных условиях может быть опрокинут движущейся машиной;
- г) машина едет по ходу движения воздушного потока, при этом скорость движения машины меньше скорости движения воздуха. В таком случае можно рассматривать СГО как стоящее на одном месте, при этом скорость воздушного потока надо уменьшить на величину скорости движения СГО;
- д) машина едет по ходу движения воздушного потока, при этом скорость движения машины равна скорости движения воздуха. В данном случае лобовое аэродинамическое сопротивление будет равно нулю. Данная задача должна решаться в нестационарной постановке в динамике движения машины;
- е) машина едет по ходу движения воздушного потока, при этом скорость движения машины больше скорости движения воздуха. В данном случае может возникнуть поршневой эффект. Данная задача также должна решаться в нестационарной постановке в динамике движения машины.



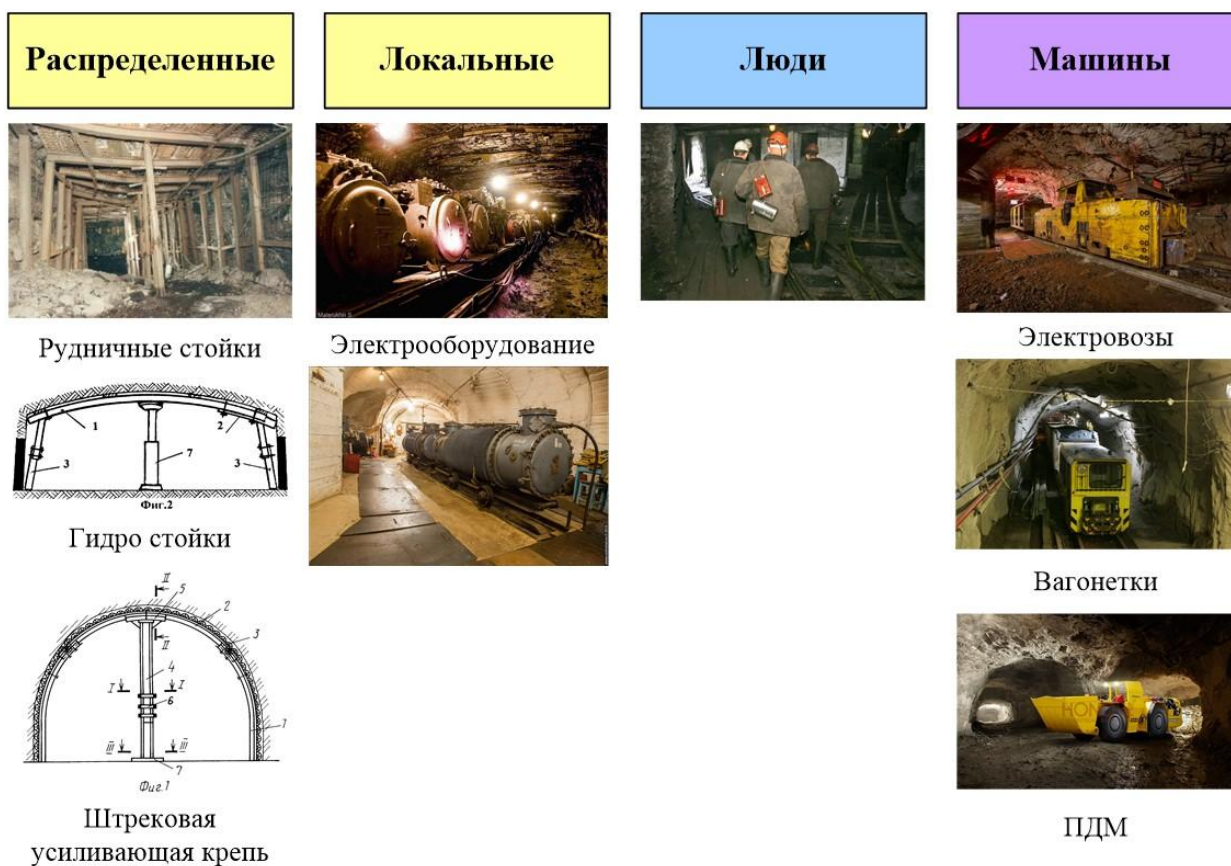
**Рисунок 1.12 – Варианты направления движения воздушного потока и СГО**

### **1.5 Классификация лобовых аэродинамических сопротивлений**

Для оценки влияния лобового аэродинамического сопротивления на аэродинамику шахтных вентиляционных потоков и на распределение воздуха по сети горных выработок важно идентифицировать все источники данного вида аэродинамического сопротивления.

Из анализа российских источников (учебников, справочников, монографий и диссертаций) можно сделать вывод, что под лобовым

аэродинамическим сопротивлением принято понимать препятствия, которые можно условно разделить на четыре группы (рисунок 1.13).



**Рисунок 1.13 – Существующее представление об источниках лобового аэродинамического сопротивления**

Данный перечень не отражает всех возможных случаев, идет в противоречии с понятием лобового аэродинамического сопротивления из аэродинамики в авиа- и автостроении и не коррелируется с международными понятиями видов аэродинамических сопротивлений в горном деле. Для дальнейших исследований необходимо сделать классификацию аэродинамических сопротивлений и постараться устранить противоречия.

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

В настоящее время минимальный перепад давления, который можно измерить существующими приборами в рудничном исполнении, равен  $h = 0,98$  Па (0,1 мм вод. ст. прибором ММН-2400, определяется как половина деления шкалы (0,5 мм), умноженная на минимальный фактор прибора  $K = 0,2$ ). У прибора МБГО-2, применяемого на шахтах и рудниках в России, погрешность измерения дифференциального давления равна  $5 \pm 0,15p$  Па. Такой перепад давления можно измерить только на определенной длине ( $L_{\text{изм.}}$ ) и при определенной комбинации параметров ( $\alpha, P, v$  и  $S$ ). Исходя из того, что

$$h_{\text{ст.}} = R_{\text{тр.}} \cdot Q^2 = \alpha \cdot P \cdot L_{\text{изм.}} \cdot Q^2 / S^3 = \alpha \cdot P \cdot L_{\text{изм.}} \cdot v^2 / S \quad (1.8)$$

можно выразить длину участка, на котором можно измерить депрессию в 0,98 Па, обусловленную аэродинамическим сопротивлением трения

$$L_{\text{изм.}} = h_{\text{ст.}} \cdot S / \alpha \cdot P \cdot v^2 = h_{\text{ст.}} \cdot d / 4 \cdot \alpha \cdot v^2. \quad (1.9)$$

С учетом того, что периметр и площадь сечения горной выработки связаны через гидравлический диаметр, можно сделать следующий вывод: длина участка, на котором можно измерить депрессию в 0,98 Па, будет при минимальных значениях гидравлического диаметра горной выработки ( $d$ , м) и скорости движения воздуха ( $v$ , м/с), а также при наибольшем значении коэффициента аэродинамического сопротивления трения ( $\alpha$ , кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>).

Минимальный гидравлический диаметр горной выработки может быть принят 1 м, что соответствует вентиляционной скважине или вентиляционному восстающему круглой формы с диаметром в 1 м, а также горной выработке квадратной формы с длиной сторон равной 1 м). Максимальное значение коэффициента аэродинамического сопротивления трения можно выбрать из Справочника [40] ( $\alpha = 0,13$  кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>). Минимальная скорость движения воздуха обусловлена требованиями ФНиП и равна  $v = 0,1$  м/с (для угольных шахт). Тогда

$$L_{\text{изм.}} = 0,1 \cdot 1 / 4 \cdot 0,13 \cdot 0,1^2 = 19 \text{ м.}$$

Этот расчёт используется в качестве некоторого критерия ( $L_{\text{изм.}} = 19$  м), по которому можно определить, что относится к

аэродинамическому сопротивлению трения, а что – к местному аэродинамическому сопротивлению.

К помимо относящихся к аэродинамическому сопротивлению трения крепи, конвейера и трапа к данному виду аэродинамического сопротивления можно отнести:

- рудничные стойки, если их установлено несколько подряд на участке длиной более 19 м,
- стационарное оборудование с общей длиной более 19 м.

Для вышеуказанных случаев возможно провести измерения перепада давления и определить коэффициент аэродинамического сопротивления трения такого участка. Данные участки при проектировании вентиляции будут рассматриваться как отдельные ветви с соответствующим аэродинамическим сопротивлением.

Всё, что расположено на участке горных выработок протяженностью менее 19 м, будет относиться к местным аэродинамическим сопротивлениям. В проектировании такие участки будут учитываться как дополнительное сопротивление (по аналогии местных аэродинамических сопротивлений вентиляционных окон или дверей).

Также к местным аэродинамическим сопротивлениям относятся проходческие комбайны, являясь СГО, они всегда расположены в призабойной части горной выработки. Воздушная струя их омывает по касательной, не ударяясь в «лоб». При этом данный вид аэродинамического сопротивления не оказывает существенного влияния на общешахтное сопротивление и распределение воздушных потоков по вентиляционной сети.

К лобовым аэродинамическим сопротивлениям будут относиться только движущиеся объекты. Так как это понимается в других науках, где изучается аэродинамика движущихся тел (машин, самолетов, ракет, поездов и т.д.) [45-49].

В классификации аэродинамических сопротивлений в рудничной аэрологии к лобовому аэродинамическому сопротивлению будем относить СГО, клеть / скуп и людей.

При этом с учетом влияния конструкции горного оборудования на аэродинамическое сопротивление трения о поверхность СГО можно разделить на два подвида:

- 1) СГО, у которого длина, высота и ширина сопоставимы (например, ПДМ, ШАС, буровые установки и т.п.);
- 2) СГО, у которого большая протяженность (электровозы и монорельсовый транспорт).

Данные предложения по классификации аэродинамических сопротивлений представлены в таблице 1.6.

Объектом исследований данной диссертационной работы являются лобовые аэродинамические сопротивления, проявляющиеся при движении СГО, у которого длина, высота и ширина сопоставимы (например, ПДМ, ШАС, буровые установки и т.п.).

Таблица 1.6 – Классификация аэродинамических сопротивлений

Классификация аэродинамического сопротивления горных выработок			
Аэродинамическое сопротивление трения, $R_{тр.}$ , кц	Шероховатость бортов, кровли и почвы горных выработок		$R_{тр.} = \alpha \cdot P \cdot L / S^3$ $P$ – периметр горной выработки, м; $S$ – площадь сечения горной выработки, м <sup>2</sup> ; $L$ – длина горной выработки, м; $\alpha$ – коэффициент аэродинамического сопротивления трения, кгс·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> .
	Равномерно распределенная крепь на участке длиной $l \geq 19$ м		
	Конвейерная лента		
	Трап, ж/д пути		
	Стационарное горное оборудование, энергопоезд, трансформаторы, склад материалов при $l \geq 19$ м		
	Рудничные стойки / растреллы на участке $l \geq 19$ м		
Аэродинамическое местное сопротивление, $R_{м.}$ , кц	Поворот горной выработки		$R_{м.} = \zeta \cdot \gamma / 2 \cdot g \cdot S^2$ $\gamma$ – удельный вес воздуха, кг/м <sup>3</sup> , при нормальных условиях $\gamma = 1,2$ кг/м <sup>3</sup> ; $g$ – ускорение силы тяжести, м/с <sup>2</sup> , при нормальных условиях $\gamma = 9,807$ м/с <sup>2</sup> ; $S$ – площадь сечения горной выработки за местным сопротивлением, м <sup>2</sup> ; $\zeta$ – коэффициент аэродинамического сопротивления трения, безразмерная величина.
	Расширение / сужение горной выработки		
	Соединение / разделение горных выработок		
	Вентиляционная дверь (окно), парус		
	Кроссинг		
	Проходческий комбайн		
	Рудничные стойки на участке $l < 19$ м		
	Стационарное горное оборудование, трансформаторы, склад материалов при $l < 19$ м		
Аэродинамическое лобовое сопротивление, $R_{л.}$ , кц	Движущееся горное оборудование	Протяженное СГО ширина ~ высота << длина (электровоз, монорельс и т.п.)	$R_{л.} = c \cdot S_{м.} \cdot \gamma / 2 \cdot g \cdot (S - S_{м.})^3$ $\gamma$ – удельный вес воздуха, кг/м <sup>3</sup> , при нормальных условиях $\gamma = 1,2$ кг/м <sup>3</sup> ; $g$ – ускорение силы тяжести, м/с <sup>2</sup> , при нормальных условиях $\gamma = 9,807$ м/с <sup>2</sup> ; $S$ – площадь сечения горной выработки в месте расположения объекта, м <sup>2</sup> ; $S_{м.}$ – миделево сечение, наибольшее сечение тела в плоскости перпендикулярной потоку, м <sup>2</sup> ; $c$ – коэффициент лобового сопротивления трения, безразмерная величина.
		СГО ширина ~ высота ~ длина (ПДМ, ШАС, буровая установка и т.п.)	
		Клеть/скип	
		Комбайн очистной	
	Человек	Группа людей	
		Один человек	
		$h_{ст.} = R_{тр.} \cdot Q^2$ $h_{ст.}$ – депрессия горной выработки, необходимая для преодоления сопротивления трения, кг/м <sup>2</sup> (даПа); $Q$ – количество воздуха, проходящее по горной выработке, м <sup>3</sup> /с.	
		$h_{м.} = \zeta \cdot \gamma \cdot v^2 / 2 \cdot g$ $h_{м.}$ – депрессия горной выработки, необходимая для преодоления местного сопротивления, кг/м <sup>2</sup> (даПа); $v$ – скорость движения воздуха в горной выработке, м/с.	
		$h_{л.} = c \cdot S_{м.} \cdot \gamma \cdot v^2 / 2 \cdot g \cdot (S - S_{м.})$ $h_{л.}$ – депрессия горной выработки, необходимая для преодоления лобового сопротивления, кг/м <sup>2</sup> (даПа).	

## **Выводы и постановка задач исследований**

По некоторым видам добываемого полезного ископаемого возникают сложности в части экологических, организационных или политических аспектов (например, санкции, наложенные на угольные компании, проблемы с логистикой при перевозке угля), но в целом ни одна страна не откажется от ресурсов. Россия – лидер по запасам и добыче многих видов полезных ископаемых.

Одной из проблем в области обеспечения безопасности и эффективности ведения горных работ является плохо организованное проветривание. Проведенный анализ состояния вентиляции шахт и рудников Российской Федерации показал, что аварии и инциденты, связанные с аэрологическим фактором, происходят регулярно. При этом взрывы метана являются самыми тяжелыми случаями, при которых гибнет большое количество горнорабочих и даже горноспасатели. Аварии и инциденты могут происходить из-за недостаточной проработанности проектов по проветриванию горных предприятий. Отсутствие в настоящее время нормативных документов по проектированию вентиляции горных предприятий усложняет 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.

В нашей стране развивается научная школа академика А.А. Скочинского с устоявшимися традициями в области рудничной аэрологии. Лобовое аэродинамическое сопротивление 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), 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 нигде не встречаются значения величин депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением, 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.), а также расстрелы и рудничные стойки. В аэродинамике в других областях науки указывается, что лобовое аэродинамическое сопротивление возникает только у движущихся объектов (машины, самолеты, ракеты и т.д.).

В зарубежной литературе в области аэрологии горных предприятий нет понятия лобового аэродинамического сопротивления. Там такие объекты относят к местным аэродинамическим сопротивлениям.

Для дальнейших исследований была разработана классификация аэродинамических сопротивлений, в которой устранены противоречия.

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

В связи с чем было принято решением выбрать объектом исследования лобовые аэродинамические сопротивления, проявляющиеся при движении СГО, в частности у которого длина, высота и ширина сопоставимы (например, ПДМ, ШАС, буровые установки и т.п.).

Для повышения уровня безопасности необходимо решить следующие задачи:

1. провести анализ состояния проветривания шахт и рудников в Российской Федерации;

2. выполнить анализ существующих исследований в области аэродинамики шахтных вентиляционных потоков в части касающейся определения величины лобового сопротивления;
3. провести натурные исследования на горных предприятиях;
4. исследовать с использованием 3D моделей влияние скорости движения горных машин и оборудования, перекрытия сечений горных выработок, параметров воздушного потока (скорости, давления и направления относительно движения машин) на величину лобового сопротивления;
5. разработать и апробировать методику расчёта величины лобового аэродинамического сопротивления для самоходного горного оборудования при проектировании вентиляции горных предприятий;
6. разработать рекомендации по повышению уровня безопасности, с учетом изменяющейся во времени и пространстве величины лобового аэродинамического сопротивления при эксплуатации шахт и рудников.

## ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

### 2.1 Методика экспериментального определения величин депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением и коэффициента лобового аэродинамического сопротивления

Экспериментальные исследования проводятся в шахте или в аэродинамической трубе в лаборатории. Величина потери напора при обтекании воздухом препятствия (лобового аэродинамического сопротивления) определяется из выражения

$$h_{л.} = h_{об.} - h_{тр.} \pm h_{ск.} \quad (2.1)$$

где  $h_{об.}$  – суммарная величина потерь напора, Па;

$h_{тр.}$  – величина потери напора на трение воздуха о борта, почву и кровлю выработки, Па;

$h_{ск.}$  – разность скоростных напоров при наличии разных скоростей в замерных сечениях, Па.

Известно также, что

$$h_{л.} = \gamma S_M c u_B^2 / gS, \quad (2.2)$$

где  $c$  – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления;

$u_B$  – средняя скорость потока в выработке у тела, формирующее сопротивление, м/с,

$$u_B = v_B S / (S - S_M), \quad (2.3)$$

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>,

$v_B$  – средняя скорость потока в выработке, м/с;

$S_M$  – миделево сечение тела, м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения горной выработки, м<sup>2</sup>,

откуда находим

$$c = gSh_{л.} / (\gamma S_M (v_B S / (S - S_M))^2), \quad (2.4)$$

Следовательно, чтобы определить  $c$ , необходимо опытным путем найти  $h_{л.}$ ,  $v_B$ ,  $S_M$  и  $S$ .

Величина потери напора на трение вычисляется по формуле:

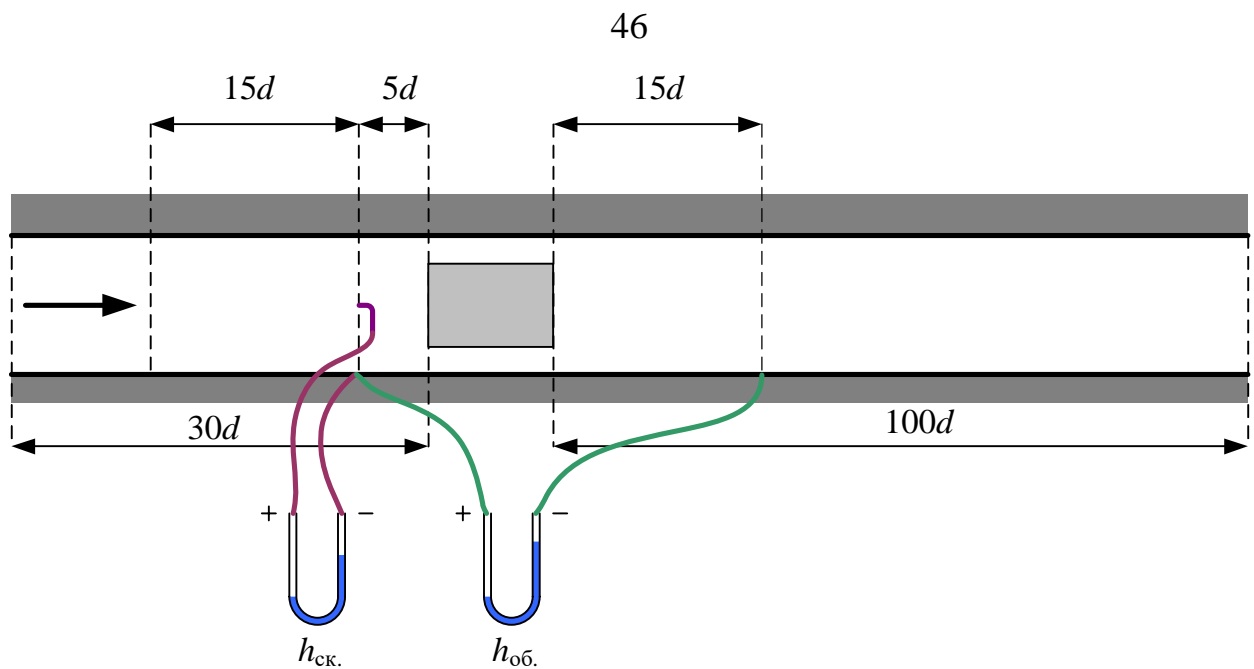
$$h_{\text{тр.}} = \alpha PLQ^2 / S^3, \quad (2.5)$$

причем величины  $P$ ,  $L$ ,  $S$  и  $Q$  измеряются в каждом опыте. Коэффициент  $\alpha$  определяется экспериментальным путем или принимается по справочникам. Для определения величины лобового аэродинамического сопротивления измеряем величину потери напора  $h_{\text{об.}}$ , располагая статические трубки с обеих сторон лобового аэродинамического сопротивления.

По мнению академика Б.Н. Юрьева, для восстановления нормального распределения скорости за препятствием требуется участок прямолинейного канала длиной  $50d$  ( $d$  – гидравлический диаметр выработки, м) и даже  $80d$ , а перед препятствием – не менее  $30d$ .

При выборе места установки статических трубок рекомендуется руководствоваться следующими положениями: первая (по направлению движения потока) статическая трубка должна устанавливаться в таком месте, чтобы расстояние от нее до препятствия было не менее  $5d$  с наличием прямолинейного начального участка длиной  $15d$  перед этой статической трубкой с таким же типом крепи, как на замерном участке; вторая трубка устанавливается за лобовым аэродинамическим сопротивлением на расстоянии не менее  $15d$  (рисунок 2.1).

Для определения длин в реальных условиях рассмотрим некоторые параметры существующих горных выработок (таблица 2.1) Гидравлический диаметр и минимальная длина экспериментального участка ( $L_{\text{min}} = 15d + 5d + 15d = 35d$ ), оптимальная длина для выравнивания потоков ( $L_{\text{optim}} = 50d + 80d = 130d$ ).



**Рисунок 2.1 – Схема расположения микроманометра при определении коэффициента лобового сопротивления ( $c$ )**

**Таблица 2.1 – Гидравлический диаметр и минимальная длина экспериментального участка**

№	Предприятие	$S, \text{ м}^2$	$P, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$L_{\min}, \text{ м}$	$L_{\text{optim}}, \text{ м}$
1	рудник «Скалистый» шахта «Глубокая» ПАО «Норильский Никель»	16,2	14,7	4,4	154	572
2	шахта «Им. С.М. Кирова» ООО «СУЭК-Кузбасс»	18,4	17,4	4,2	148	546
3	Кировский рудник КФ АО «Апатит»	18	23	3,1	109	403

Опыты в лаборатории и в натуральных условиях необходимо проводить при числах Рейнольдса

$$Re = v_B \cdot d / \nu = 4S v_B / P \nu > 100\,000,$$

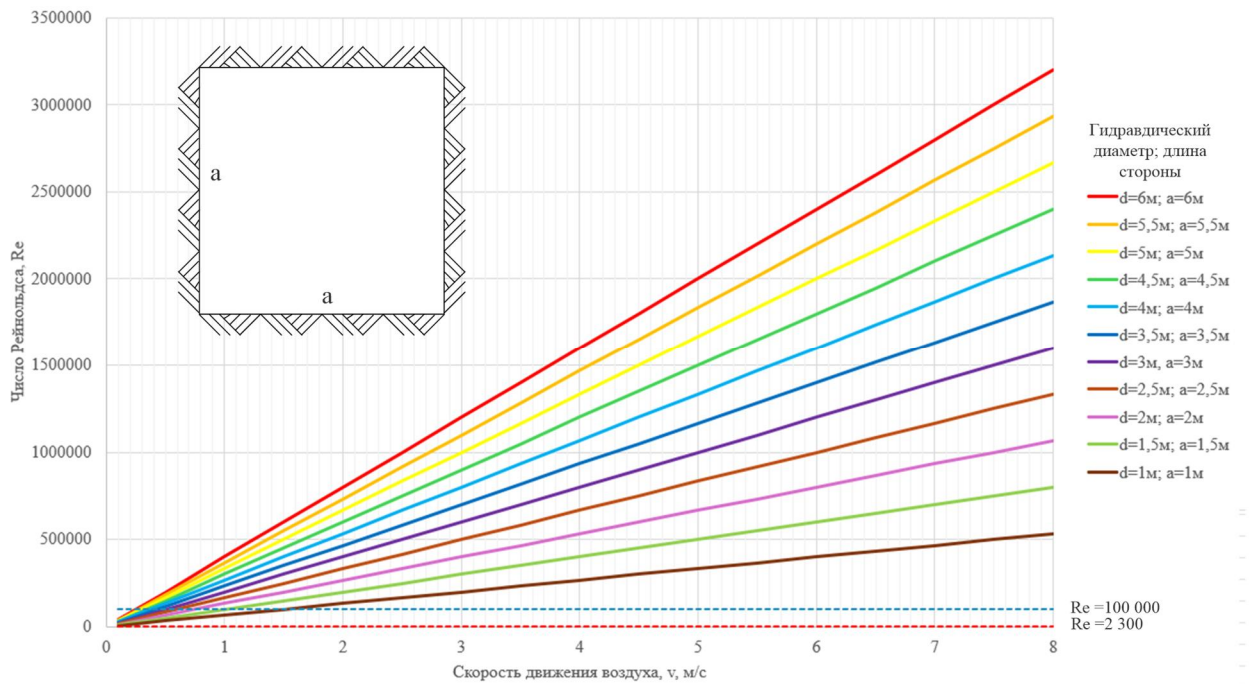
где  $v_B$  – средняя скорость потока в выработке, м/с;

$d$  – гидравлический диаметр выработки, м;

$S$  – площадь поперечного сечения горной выработки,  $\text{м}^2$ ;

$\nu$  – кинематическая вязкость воздуха  $\nu = 0,000015 \text{ м}^2/\text{с}$ .

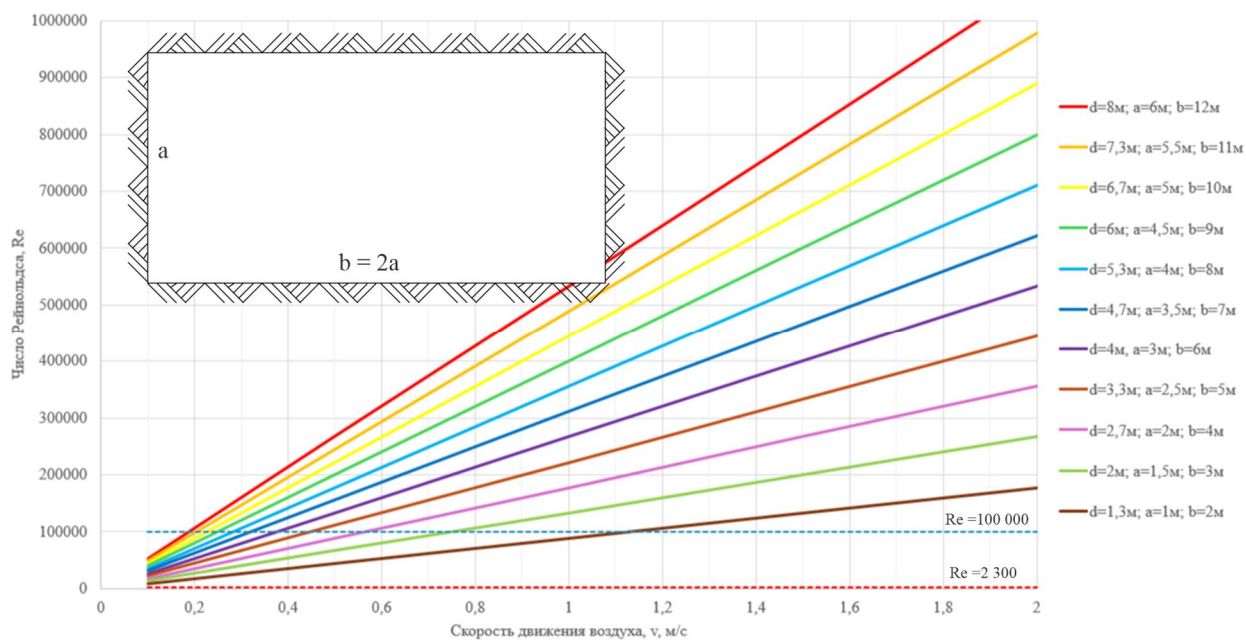
Для выбора места проведения измерений по скорости движения воздушного потока (с учетом выше указанных рекомендаций) можно использовать графики, представленные на рисунках 2.2, 2.3 и 2.4. Порядок использования данных графиков следующий. Если горная выработка имеет квадратную форму, у которой длина сторон равна  $a = 3$  м, то, на рисунке 2.2 находим точку пересечения двух линий: 1-ая, соответствующая данному гидравлическому диаметру линия (тёмно-сиреневого цвета), и 2-ая пунктирная линия (синего цвета), соответствующей числу Рейнольдса 100 000. Из данной точки опускаем перпендикуляр на ось абсцисс и получаем скорость движения воздуха  $v = 0,5$  м/с меньше которой проводить эксперимент не целесообразно.



**Рисунок 2.2 – График изменения числа Рейнольдса в зависимости от скорости движения воздуха при различных значения гидравлического диаметра для горных выработок квадратной формы**



**Рисунок 2.3 – График изменения числа Рейнольдса в зависимости от скорости движения воздуха при различных значения гидравлического диаметра для горных выработок круглой формы**



**Рисунок 2.4 – График изменения числа Рейнольдса в зависимости от скорости движения воздуха при различных значения гидравлического диаметра для горных выработок прямоугольной формы**

Разность скоростных напоров

$$h_{\text{ск.}} = (k_1 v_{B1}^2 - k_2 v_{B2}^2) \gamma / 2g, \quad (2.6)$$

где  $v_{B1}$  и  $v_{B2}$  – средняя скорость соответственно в первом и втором сечениях, м/с;

$k_1$  и  $k_2$  – энергетические коэффициенты (коэффициенты кинетической энергии).

По Л.Д. Ворониной, величина  $k$  в зависимости от  $\alpha$  равна

$$k_i = 0,81 + 282\alpha, \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент трения воздуха о стенки.

Очевидно, потеря напора на преодоление лобового аэродинамического сопротивления,

$$h_{л.} = h_{об.} - \alpha PLQ^2 / S^3 \pm (k_1 v_{B1}^2 - k_2 v_{B2}^2) \gamma / 2, \quad (2.8)$$

Определяем опытным путем величины, входящие в эти формулы, т.е.  $h_{об.}$ ,  $P$ ,  $L$ ,  $S$ ,  $S_m$ ,  $v_{B1}$ ,  $v_{B2}$  и  $\alpha$ . Далее по формуле

$$c = h_{л.} gS / \gamma S_m u_B^2, \quad (2.9)$$

определяем величину коэффициента лобового аэродинамического сопротивления.

Для точности расчетов определения коэффициента лобовых аэродинамических сопротивлений необходимо измерения проводить в горных выработках как без присутствия горной машины, так и с наличием горной машины.

Измерения производятся для четырех случаев:

1. На прямолинейном участке горной выработки без самоходной горной техники.
2. На прямолинейном участке горной выработки с самоходной машиной без движения.
3. На прямолинейном участке горной выработки с самоходной машиной, движущейся в том же направлении, что и воздух в горной выработке.
4. На прямолинейном участке горной выработки с самоходной машиной, движущейся в противоположном направлении относительно движения воздуха в горной выработке.

При условии, что выбранный экспериментальный участок удовлетворяет всем предложенным рекомендациям (выдержанное сечение, один тип крепи, отсутствие местных аэродинамических сопротивлений) количество измеряемых параметров по разработанной методике может быть уменьшено.

При проведении эксперимента, располагаясь в одном сечении, необходимо произвести измерения следующих параметров:

- скорости движения воздуха,  $v_{в}$ , м/с;
- температуры воздуха,  $T$ , °С;
- относительной влажности воздуха,  $W$ , °С;
- абсолютного атмосферного давления,  $p$ , Па;
- перепад давления,  $h$ , Па;
- периметр горной выработки,  $P$ , м;
- площадь сечения горной выработки,  $S$ , м<sup>2</sup>.

Также необходимо зафиксировать:

- скорость движения самоходной горной техники ( $v_{м}$ , м/с) (при этом обязательно необходимо предупредить водителя о том, чтобы скорость в процессе движения не изменялась);
- марку и тип самоходного горного оборудования (машины);
- длину, ширину и высоту самоходного горного оборудования (машины).

Для измерения депрессии необходимо записать длину ( $L$ , м) на котором проводится измерение перепада давления. Она должна быть не менее 100 м.

Для проведения экспериментов были разработаны протоколы измерений, представленные в приложении А.

Для учёта скорости движения самоходного горного оборудования учитываем его скорость, разрешенную нормативными документами, 20 км/ч и 40 км/ч.

Участок длиной 150 м при скорости 10 км/ч (3 м/с) СГО проедет за время равное  $T = 150 \text{ м} / 3 \text{ м/с} = 50 \text{ с}$ .

Схемы проведения измерений при встречном движении СГО и воздуха, а также при попутном движении СГО и воздуха приведены на рисунках 2.5, 2.6 и 2.7.



**Рисунок 2.5 – Схема проведения измерений без СГО**



**Рисунок 2.6 – Схема проведения измерений при встречном движении СГО и воздуха**



**Рисунок 2.7 – Схема проведения измерений при попутном движении СГО и воздуха**

Порядок проведения исследовательских измерений приведен в Приложении А, формы измерений приведены в Приложении Б.

Эксперименты по определению величины депрессии лобового аэродинамического сопротивления и коэффициента лобового аэродинамического сопротивления необходимо произвести при разных скоростях движения СГО (5 км/ч, 10 км/ч).

Для изучения лобовых аэродинамических сопротивлений и их влияния на шахтную вентиляционную сеть вышеуказанная методика была апробирована в филиалах ФГУП «ВГСЧ». Результаты измерений подтвердили наличие изменяющегося аэродинамического сопротивления, обусловленного движущимся самоходным горным оборудованием.

## **2.2 Анализ результатов натуральных экспериментов на Кировском руднике АО «Апатит»**

По разработанной Методике в рамках проведения воздушно-депресссионной съемки специалистами Горного института НИТУ МИСИС был выполнен первый шахтный эксперимент на Кировском руднике АО «Апатит» на горизонт +10 м. Измерения проводились на прямом участке на западном



### 2.3 Анализ результатов натуральных экспериментов на шахте Шерегешская

По разработанной методике сотрудниками ФГУП «ВГСЧ» были проведены эксперименты. Результаты на шахте Шерегешская компании АО «Евраз ЗСМК» представлены в протоколах (Приложение В).

Длина опытного участка составила 100 м. Горная выработка имеет сводчатую форму, а площадь сечения равна 31,3 м<sup>2</sup>. Депрессия, обусловленная только аэродинамическим сопротивлением трения, равна 4 Па. Измерения депрессии проводились прибором МБГО-2, скорости движения воздуха – анемометром АПР-2, температуры и влажности – ТГО-2МП.

Измерения проводились с лобовым аэродинамическим сопротивлением – шахтный автосамосвал (далее ШАС) марки НУУК-30, миделево сечение 5,6 м<sup>2</sup>, перекрытие сечения горной выработки 17,9 %.

Во втором эксперименте СГО останавливалась в горной выработке и проводилось измерение перепада давления на опытном участке. Оно составило 16 Па, это в 4 раза больше, чем депрессия без машины. Скорость движения воздуха возросла всего на 0,08 м/с (прирост 5 %), однако прирост измерения находился в пределах погрешности анемометра АПР-2.

В третьем эксперименте при однонаправленном движении СГО и воздушной струи, как только машина заезжает на опытный участок, наблюдается резкий скачок перепада давления до 27 Па, рост в 6,7 раз. Затем давление падает до 22 Па. Так как СГО движется со скоростью 5 км/ч (1,5 м/с), то участок длиной 100 м она проезжает за 67 с.

В четвертом эксперименте при движении СГО на встречу воздушному потоку депрессия также возрастает и достигает до 25 Па. Небольшое в процентном отношении перекрытие сечения не приводит к опрокидыванию воздушной струи.

Расчёты величины лобового аэродинамического сопротивления и коэффициента аэродинамического лобового сопротивления представлены в таблице 2.2.

**Таблица 2.2 – Расчет параметров лобового сопротивления ШАС марки НУУК-30**

№	Вычисляемая величина	Формула	Значение
1	Расход воздуха, $Q$ м <sup>3</sup> /с	$Q = v_B S$	$Q = 1,5 \cdot 31,3 = 46,9$
2	Удельный вес воздуха, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho = 486 \text{ пабс.} / (273 + T)$	$\rho =$
3	Величина потери напора при обтекании воздухом препятствия, $h_{л.}$ Па	$h_{л.} = h_{об.} - h_{ст.}$	$h_{л.} = 27 - 4 = 23$ Па
4	Средняя скорость потока в выработке у тела формирующее сопротивление, $u_B$ м/с	$u_B = v_B S / (S - S_M)$	$u_B = 1,5 \cdot 31,3 / (31,3 - 5,6) = 1,8$ м/с
5	Лобовое аэродинамическое сопротивление, $R_{л.}$ кμ	$R_{л.} = 9,8 h_{л.} / Q^2$	$R_{л.} = 9,8 \cdot 23 / 46,9^2 = 0,1$ кμ
6	Коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, $c_x$ безразмерная величина	$c = g S h_{л.} / (\gamma S_M (v_B S / (S - S_M))^2)$ или $c = g S h_{л.} / \gamma S_M u_B^2$	$c = 31,3 \cdot 23 / 1,2 \cdot 5,6 \cdot 1,8^2 = 33$

## 2.4 Анализ результатов натуральных экспериментов на руднике

### ООО «Кнауф Гипс Новомосковск»

02 апреля 2025 году на ООО «Кнауф Гипс Новомосковск» по разработанной методике также при участии сотрудников ФГУП «ВГСЧ» были проведены эксперименты. Результаты представлены в протоколах (Приложение В).

Длина опытного участка составила 100 м. Горная выработка имеет прямоугольную форму, а площадь сечения равна 62 м<sup>2</sup>. Депрессия, обусловленная только аэродинамическим сопротивлением трения, равна 2 Па. Измерения депрессии проводились прибором МБГО-2, скорости движения воздуха – прибором АПР-2, температуры и влажности – ТГО-2МП.

Далее измерения проводились с лобовым аэродинамическим сопротивлением – шахтный автосамосвал (далее ШАС) марки Volvo-A40G, миделево сечение 12,2 м<sup>2</sup>, перекрытие сечения горной выработки 19,7 %.

Во втором эксперименте СГО останавливалась в горной выработке и проводилось измерение перепада давления на опытном участке. Оно составило 4 Па, это в 2 раза больше, чем депрессия без машины. Скорость

движения воздуха также незначительно возросла всего на 0,19 м/с, возможно он произошёл из-за деформации воздушного потока.

В третьем эксперименте при однонаправленном движении СГО и воздушной струи, как только машина заезжает на контрольный участок, наблюдается резкий скачок перепада давления до 11 Па, рост в 5,5 раз. Затем перепад давления падает до начального значения. Скорость СГО во время эксперимента была равна 10 км/ч (3 м/с), участок длиной 100 м машина проезжает за 33 с, что также видно в протоколе.

В четвертом эксперименте при движении СГО на встречу воздушному потоку депрессия также возрастает и достигает до 14 Па. Небольшое перекрытие сечения также не приводит к опрокидыванию воздушной струи.

Расчёты величины лобового аэродинамического сопротивления и коэффициента аэродинамического лобового сопротивления представлены в таблице 2.3.

**Таблица 2.3 – Расчет параметров лобового сопротивления ШАС марки Volvo-A40G**

№	Вычисляемая величина	Формула	Значение
1	Расход воздуха, $Q$ м <sup>3</sup> /с	$Q = v_B S$	$Q = 1,65\ 62 = 102,3$
2	Удельный вес воздуха, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho = 486\ p_{абс.}/(273+T)$	$\rho =$
3	Величина потери напора при обтекании воздухом препятствия, $h_{л.}$ Па	$h_{л.} = h_{об.} - h_{ст.}$	$h_{л.} = 14 - 4 = 10$ Па
4	Средняя скорость потока в выработке у тела формирующее сопротивление, $u_B$ м/с	$u_B = v_B S / (S - S_M)$	$u_B = 1,65\ 62 / (62 - 12,2) = 2$ м/с
5	Лобовое аэродинамическое сопротивление, $R_{л.}$ кц	$R_{л.} = 9,8\ h_{л.} / Q^2$	$R_{л.} = 9,8\ 10 / 102,3^2 = 0,01$ кц
6	Коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, $c_x$ безразмерная величина	$c = g S h_{л.} / (\gamma S_M (v_B S / (S - S_M))^2)$ или $c = g S h_{л.} / \gamma S_M u_B^2$	$c = 62\ 10 / 1,2\ 12,2^2 = 10,5$

## 2.5 Анализ результатов натуральных экспериментов на руднике

### Узельгинский

19 апреля 2025 году на руднике Узельгинский АО «Учалинский ГОК» по разработанной методике также при участии сотрудников ФГУП «ВГСЧ»

были проведены эксперименты. Результаты представлены в протоколах (Приложении В).

Длина опытного участка составила 100 м. Горная выработка имеет арочную форму, а площадь сечения равна 16,6 м<sup>2</sup>. Депрессия, обусловленная только аэродинамическим сопротивлением трения, равна 4-12 Па. Измерения депрессии проводились прибором МБГО-2, скорости движения воздуха – прибором АПР-2, температуры и влажности – ТГО-2МП.

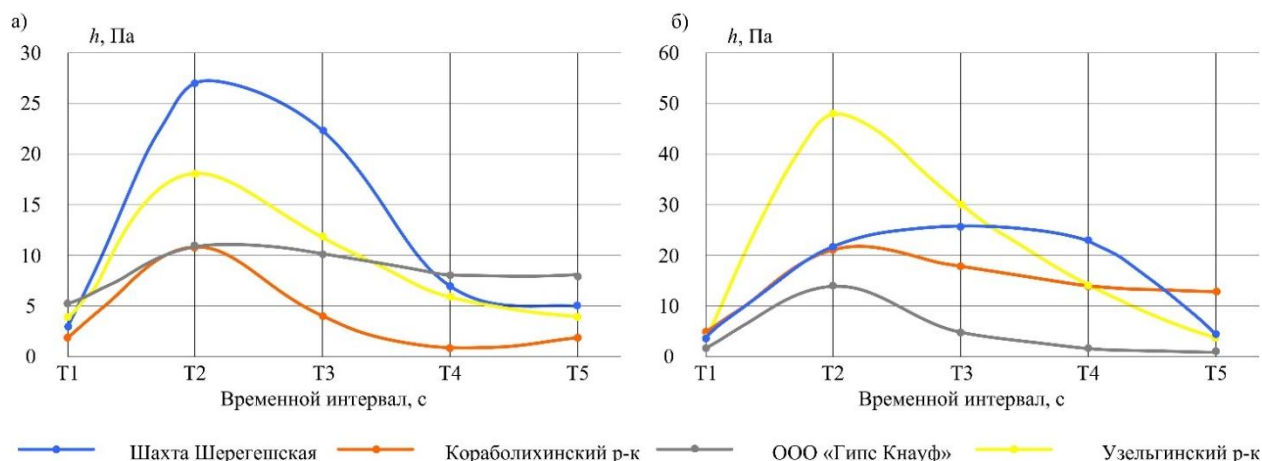
Далее измерения проводились с лобовым аэродинамическим сопротивлением – ПДМ марки ТН-368, миделево сечение 12,2 м<sup>2</sup>, перекрытие сечения горной выработки 20 %.

При однонаправленном движении СГО и воздушной струи, как только машина заезжает на контрольный участок, наблюдается рост депрессии до 12-18 Па, рост в 1,5-3 раза. При движении СГО на встречу воздушному потоку депрессия также возрастает и доходит до 30-48 Па, рост 4-5. Небольшое в процентном отношении перекрытие сечения не приводит к опрокидыванию воздушной струи. Расчёты величины лобового аэродинамического сопротивления и коэффициента аэродинамического лобового сопротивления представлены в таблице 2.4.

**Таблица 2.4 – Расчет параметров лобового сопротивления ТН-368**

№	Вычисляемая величина	Формула	Значение
1	Расход воздуха, $Q$ м <sup>3</sup> /с	$Q = v_B S$	$Q = 1,65 \cdot 16,6 = 27,4$
2	Удельный вес воздуха, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho = 486 p_{абс.} / (273 + T)$	$\rho =$
3	Величина потери напора при обтекании воздухом препятствия, $h_{л.}$ Па	$h_{л.} = h_{об.} - h_{ст.}$	$h_{л.} = 30 - 12 = 18$ Па
4	Средняя скорость потока в выработке у тела формирующее сопротивление, $u_B$ м/с	$u_B = v_B S / (S - S_M)$	$u_B = 1,65 \cdot 16,6 / (16,6 - 12,2) = 6,2$ м/с
5	Лобовое аэродинамическое сопротивление, $R_{л.}$ кц	$R_{л.} = 9,8 h_{л.} / Q^2$	$R_{л.} = 9,8 \cdot 18 / 27,4^2 = 0,24$ кц
6	Коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, $c_x$ безразмерная величина	$c = g S h_{л.} / (\gamma S_M (v_B S / (S - S_M))^2)$ или $c = g S h_{л.} / \gamma S_M u_B^2$	$c = 16,6 \cdot 18 / 1,2 \cdot 12,2 \cdot 6,2^2 = 0,53$

## 2.6 Обобщенный анализ результатов натуральных экспериментов



**Рисунок 2.10 – Сводный график изменения депрессии при движении СГО: а) в 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)**

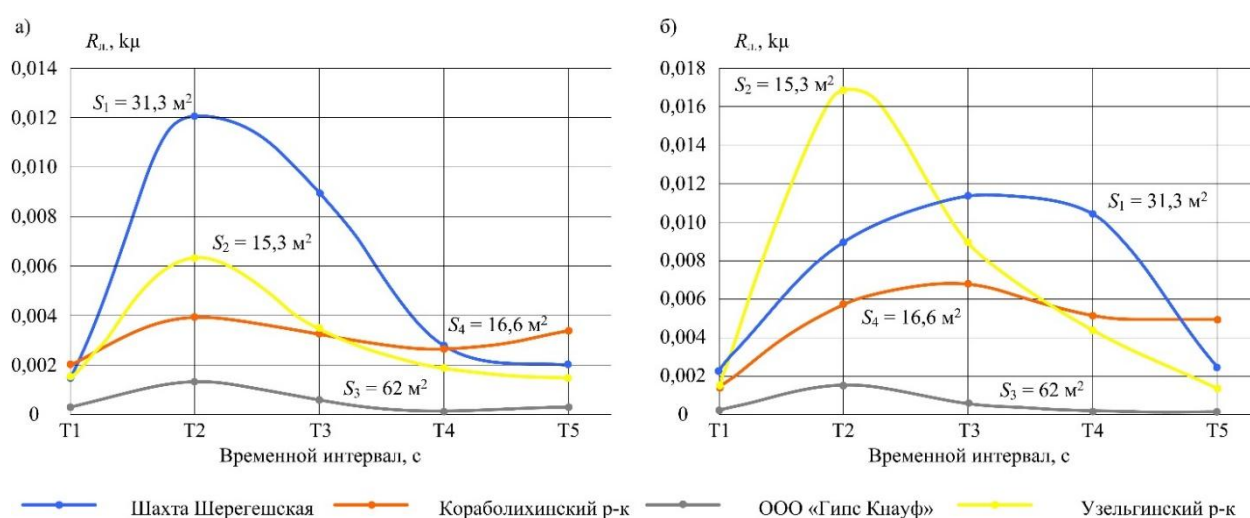
По результатам натуральных экспериментов можно сделать вывод, что при движении в горной выработке СГО происходит существенный рост депрессии на исследуемом участке. Так при движении машины с попутном с воздушной струей направлении (рисунок 2.10а) было зафиксировано увеличение депрессии от 2 до 9 раз, а при движении машины в противоположном с воздушной струей направлении (рисунок 2.10б) депрессия увеличилась от 4 до 12 раз, что наглядно показывает влияние лобового аэродинамического сопротивления на исследуемом участке, а также выявлена корреляция с направлением 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 воздухораспределении 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 2.11).



**Рисунок 2.11– 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**

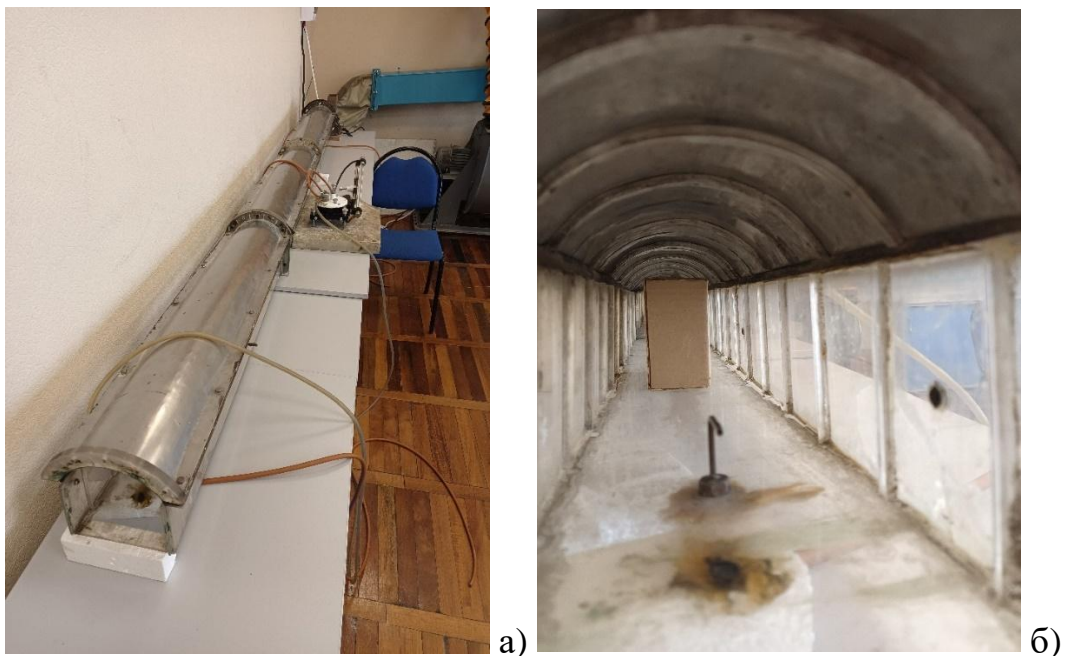
Полученные данные наглядно демонстрируют определяющее влияние лобового аэродинамического сопротивления, создаваемого СГО, а также выявляют его корреляцию с направлением воздушного потока.

Анализ суммарного аэродинамического сопротивления (включающего сопротивление трения и лобовое сопротивление), указанного на рисунке 2.11 подтверждает выявленные закономерности. Так, появление в горной выработке СГО приводит к увеличению аэродинамического сопротивления на исследуемом участке от 2 до 11 раз, в частности при проведении натурного эксперимента на шахте «Шерегешская», после появления в горной выработке

СГО и ее движении с попутном с воздушной струей направлении было зафиксировано увеличение аэродинамического сопротивления в горной выработке в почти 9 раз, а при проведении натурного эксперимента на руднике «Узельгинский» после появления СГО в исследуемой горной выработке и движении машины в противоположном с воздушной струей воздуха направлении, было зафиксировано максимальное в ходе проведения экспериментов увеличение аэродинамического сопротивления в горной выработке – до 12 раз.

### **2.7 Лабораторный эксперимент по определению величины лобового аэродинамического сопротивления**

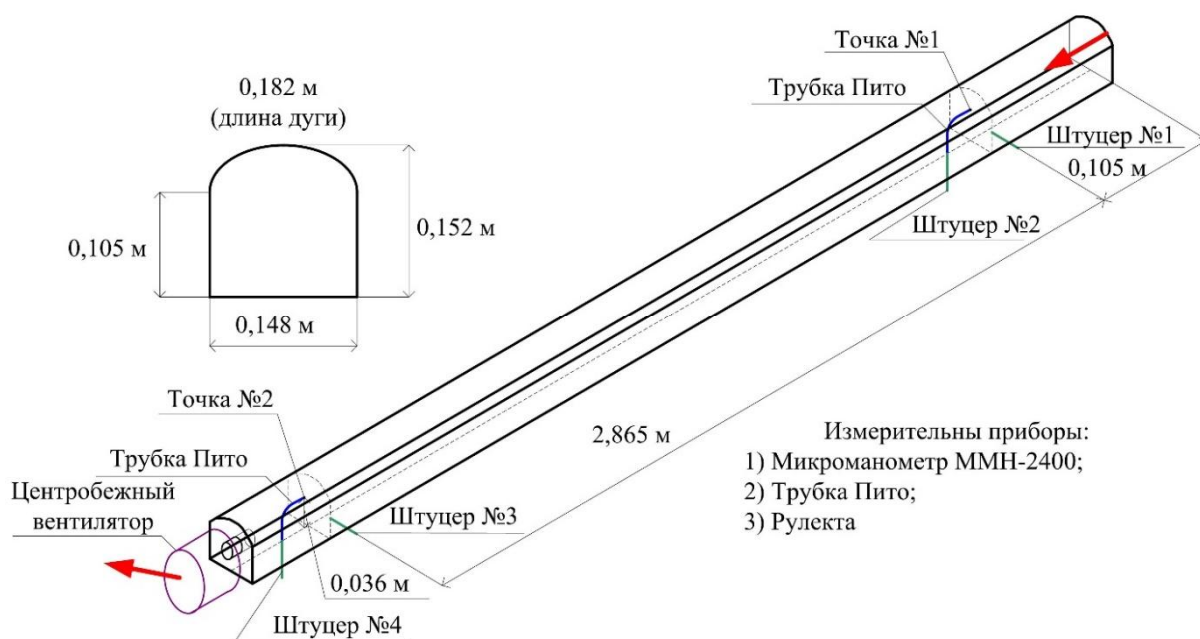
Для определения величины лобового аэродинамического сопротивления на кафедре Безопасности и экологии горного производства Горного института НИТУ МИСИС на учебной лабораторной установке по определению коэффициента аэродинамического сопротивления трения (рисунок 2.14) был поставлен эксперимент.



**Рисунок 2.12 – Фотография лабораторной установки: модель горной выработки (а) с размещенным в ней объекте, имитирующим лобовое аэродинамическое сопротивление (б)**

Эксперимент проводился с целью определения влияния объекта на величину дополнительной депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением, в статике и в движении. Также данный эксперимент использовался для верификации численного моделирования в ПО Ansys CFX.

Для повышения точности результатов измерения применялись два микроманометра (ММН-2400 и Fusse), скорость движения воздуха измерялась при помощи трубки Пито и термоанемометром Testo-425, температура и влажность воздуха определялась по прибору ТГО-2МП и контрольному термометру. По измеренным параметрам лабораторной установки (рисунок 2.12) были вычислены площадь поперечного сечения ( $S = 0,021 \text{ м}^2$ ) и периметр ( $P = 0,54 \text{ м}$ ).



**Рисунок 2.13 – Параметры лабораторной установки и перечень измерительных приборов**

В плоскости точки №1 проводились измерения скоростного напора (перепад давления  $h_d = (n_3 - n_1) \cdot K$ ). Между точками №1 и №2 проводились измерения перепада статического давления  $h_{ст} = (n_2 - n_1) \cdot K$ . Результаты измерений и расчетов приведены в таблице 2.5.

Затем в модели размещалось препятствие, имитирующее лобовое сопротивление. Оно представляло из себя деревянный брусок прямоугольной формы с размерами  $0,11 \times 0,06 \times 0,15$  м, миделево сечение  $S_M = 0,0066$  м<sup>2</sup>. Второй объект имел большую площадь миделевого сечения  $S_M = 0,0111$  м<sup>2</sup>.

При отсутствии объекта, имитирующего лобовое сопротивление, расход воздуха равнялся  $Q = v \cdot S = 2,88 \cdot 0,021 = 0,0593$  м<sup>3</sup>/с. Аэродинамическое сопротивление трения равнялось  $R = h_{ст} / Q^2 = 2,4 / 0,0593^2 = 689,46$  км. Коэффициент аэродинамического сопротивления трения равнялся  $\alpha = (h_{ст} \cdot S^3) / (L \cdot P \cdot Q) = (2,4 \cdot 0,021^3) / (2,865 \cdot 0,54 \cdot 0,0593) = 0,00021$  кг с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>. На выходе из модели скорость движения воздуха резко увеличивается до 3,22 м/с за счёт уменьшения площади сечения до 0,0019625 м<sup>2</sup> (труба на всасе у центробежного вентилятора с диаметром 0,05 м).

Величина депрессии, затрачиваемая на преодоление лобового аэродинамического сопротивления, рассчитывалась по формуле  $h_L = h_{п} - h_{ст}$ .

**Таблица 2.5 – Результаты лабораторного исследования**

Прибор	$n_1$	$n_2$	$K$	$h_{ст}$	$n_3$	$P$	$T$	$h_L$	$\rho$	$v$	$S_M$
	мм	мм	-	даПа	мм	мм рт.ст.	°С	даПа	кг/м <sup>3</sup>	м/с	м <sup>2</sup>
Без лобового аэродинамического сопротивления											
ММН-2400 №338	3,5	15,5	0,2	2,4	7	768	24,6	0,7	1,19	2,88	-
С лобовым аэродинамическим сопротивлением											
ММН-2400 №338	3,5	22	0,2	3,7*	6,5	768	24,6	0,6	1,19	2,67	0,0066 по центру модели
ММН-2400 №338	3,5	22	0,2	3,7*	6,5	768	24,6	0,6	1,19	2,67	0,0066 у борта модели
ММН-2400 №338	3,5	45	0,2	8,3*	5,5	768	24,6	0,4	1,19	2,57	0,0111 по центру модели

В таблице  $K$  – факторприбора;  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$  – измерения по шкале микроманометра, мм;  $P$  – баромтерическое давление в помещении, мм рт. ст.;  $T$  – температура воздуха в помещении, °С;  $\rho$  – плотность воздуха в помещении, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость движения воздуха в модели, м/с;  $S_M$  – миделево

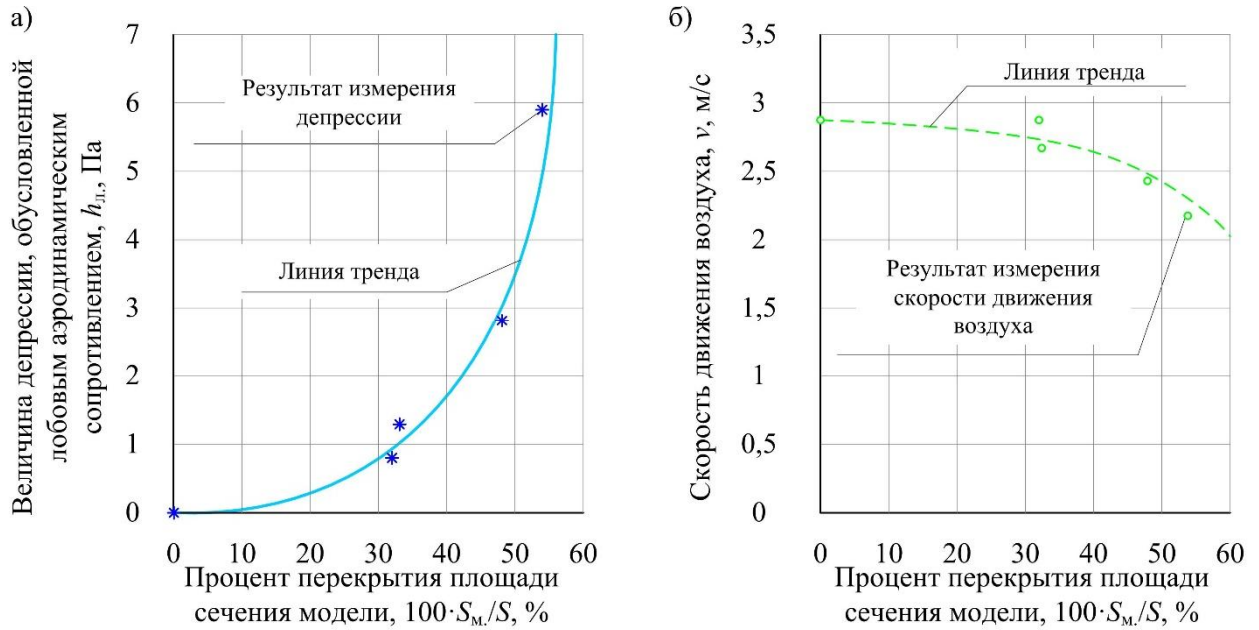
сечение объекта, имитирующее лобовое сопротивление,  $m^2$ ; \* – перепад статического давления, обусловленный аэродинамическим сопротивлением трения и лобовым аэродинамическим сопротивлением.

Величина депрессии лобового аэродинамического сопротивления с процентом перекрытия площади сечения модели приведены в таблице 2.6.

**Таблица 2.6 – Величина депрессии лобового аэродинамического сопротивления с процентом перекрытия площади сечения модели**

Расчётный параметр	Номер эксперимента		
	№1	№2	№3
$S_M/S$	0,32	0,32	0,54
$h_{л}, Па$	1,3	1,3	5,9

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 2.14 б). Характер зависимости величины аэродинамического сопротивления, обусловленного лобовым аэродинамическим сопротивлением, и соответствующий коэффициент от процента перекрытия площади сечения аналогичен зависимости, представленной на рисунке 2.14 а. Исследования влияния движения объекта в модели показали, что теряемая депрессия не является постоянной величиной, она изменяется. Для получения описания установленной зависимости использовалось моделирование в Ansys CFX. Полученные данные лабораторного эксперимента, были использованы для верификации.



**Рисунок 2.14 – Результаты лабораторного эксперимента**

### Выводы

1. Для шахтных условий разработана и апробирована методика определения лобового аэродинамического сопротивления. Методика апробирована в филиалах ФГУП «ВГСЧ».
2. Результаты измерений подтвердили наличие аэродинамического сопротивления, обусловленного движущимся самоходным горным оборудованием. Эксперименты проводились на одной шахте и трех рудниках. Во всех экспериментах наблюдались одинаковые физические процессы. С появлением СГО депрессия на экспериментальном участке длиной 100 м увеличивалась в 2-12 раз в зависимости от перекрытия в процентном отношении сечения горной выработки. Соответственно эквивалентная длина горной выработки в этом случае будет равна 300-700 м, что существенно может влиять на воздухораспределение в горных выработках.
3. За счет появления лобового аэродинамического сопротивления происходит увеличение величины аэродинамического сопротивления участка, на котором проводились измерения (100-200 м).

4. Чем больше в процентном отношении перекрытие сечения горной выработки машинами СГО, тем больше влияние лобового аэродинамического сопротивления на общее сопротивление экспериментального участка.
5. Результаты применения данной методики шахтных экспериментов могут быть использованы для анализа состояния шахтной вентиляционной сети, повышения достоверности расчетов проветривания, что позволит повысить общий уровень безопасности и эффективность ведения горных работ.
6. Проведенные лабораторные исследования подтвердили существенное влияние лобового аэродинамического сопротивления на величину общего аэродинамического сопротивления участка.
7. Полученные данные с лабораторного эксперимента будут использованы в данной работе для верификации компьютерной модели.

### **ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕНТИЛЯЦИИ**

Вычислительная гидродинамика - один из распространённых способов изучения аэродинамики. Данный способ расчётов базируется на методе конечных элементов и реализован в компьютерных программах российских компаний ООО «ТЕСИС» и зарубежных компаний (Ansys, Inc.). Для исследований аэродинамики горных предприятий чаще применяют программный комплекс Ansys CFX.

Трёхмерное моделирование применяется в Санкт-Петербургском горном университете для расчетов воздухораспределения при строительстве и эксплуатации тоннелей. Работы проводятся под руководством профессора С.Г. Гендлера [44, 78-81].

В Горном институте УрО РАН численное моделирование применяется в научных работах по оценке эффективности вентиляции рудников, изучению тепловых режимов проветривания, работы калориферов, применению эжекторов и анализу местных сопротивлений. Исследования проводятся под руководством докторов наук Б.П. Казакова, Л.Ю. Левина, А.В. Шалимова, А.В. Зайцева, М.С. Семина и др. [29, 60-74].

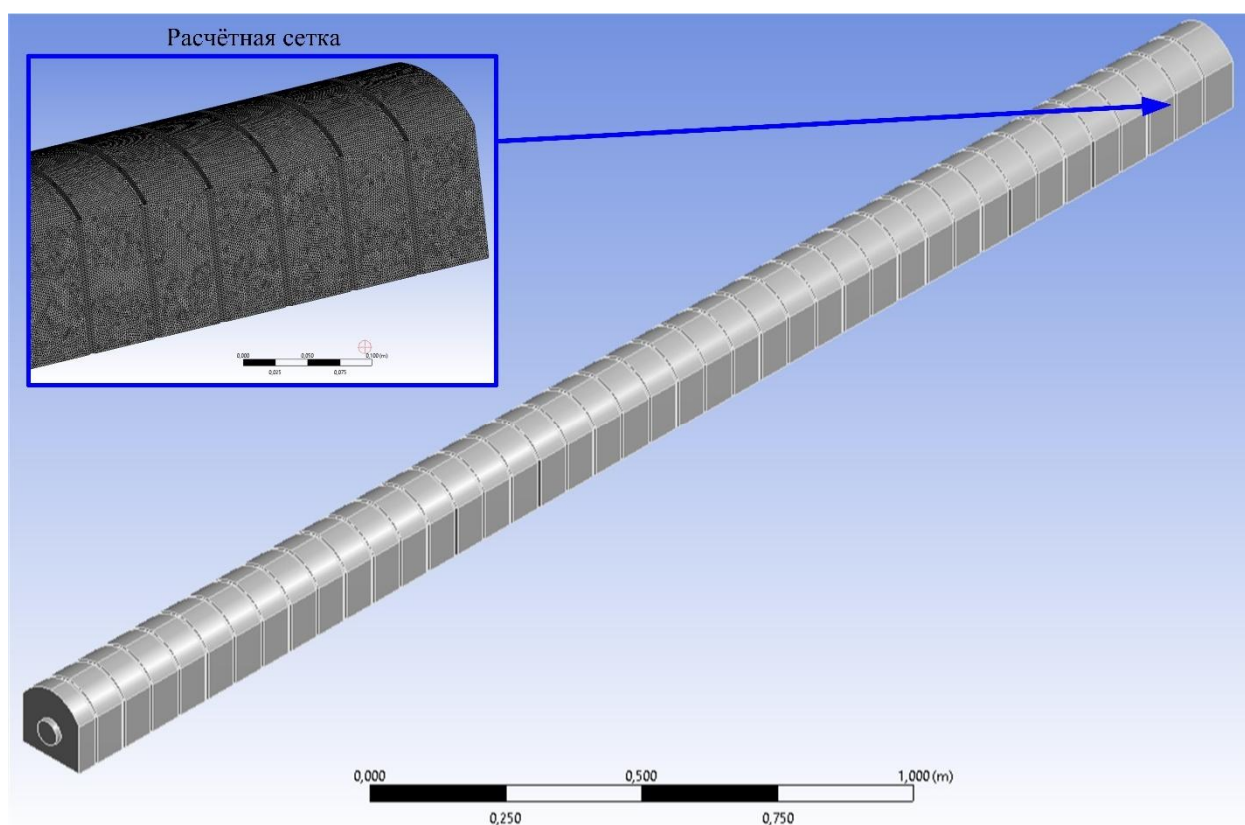
Моделированием аэродинамических процессов, протекающих в угольных шахтах, также занимаются в ИПКОН РАН и Московском горном институте НИТУ МИСИС [3-5].

Все вышеперечисленные учреждения в настоящее время наиболее активно применяют программное обеспечение Ansys CFX. Также существуют аналогичные отечественные программы, например, FlowVision CFX, однако их применение ограничено.

Для исследований лобовых аэродинамических сопротивлений применялся программный комплекс Ansys CFX (лицензия на программное обеспечение № 612013 от 31.12.2013).

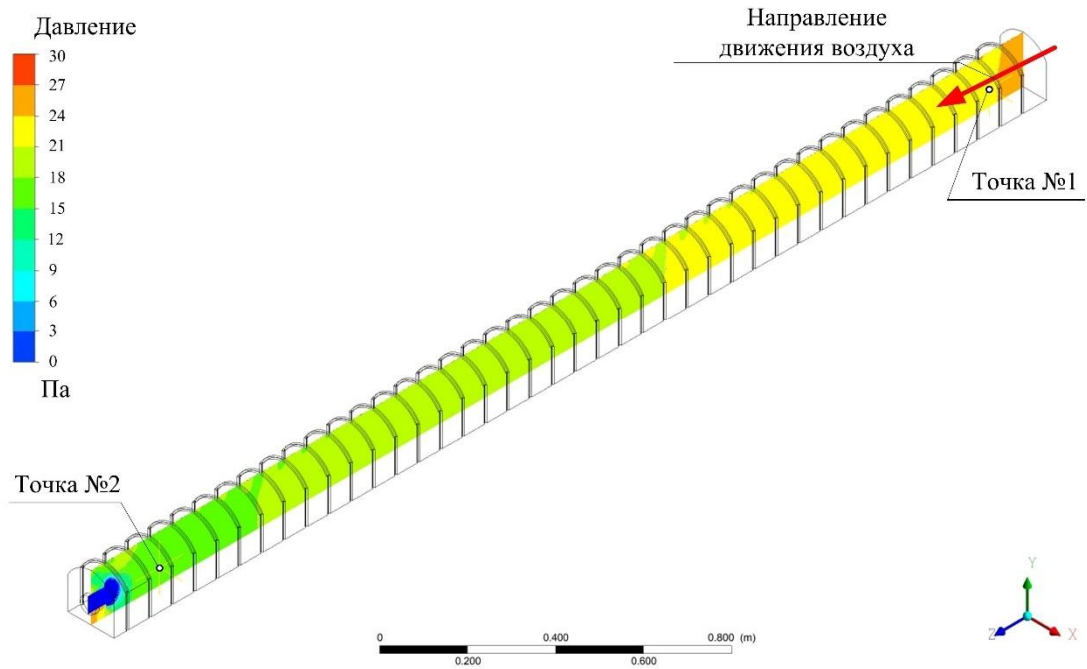
### 3.1 Верификация численного моделирования

Для верификации выбранных моделей, граничных условий было проведено компьютерное моделирование лабораторного эксперимента (раздел 2.6). В программном комплексе Ansys CFX в среде Workbench была создана компьютерная модель, полностью соответствующая лабораторной установке (рисунок 3.1). Масштаб модели 1:1. Объект разбит на элементы – тетраэдры, количество которых равно 8,67 млн. Размер ребра элемента равен 1 мм. Принята модель турбулентности k-Epsilon, воздух с параметрами Air at 25 C. Применена модель Buoyancy.



**Рисунок 3.1 – Внешний вид модели лабораторной установки**

Результаты в графическом виде представлены на рисунке 3.2. По ним видно распределение статического давления по модели горной выработки.

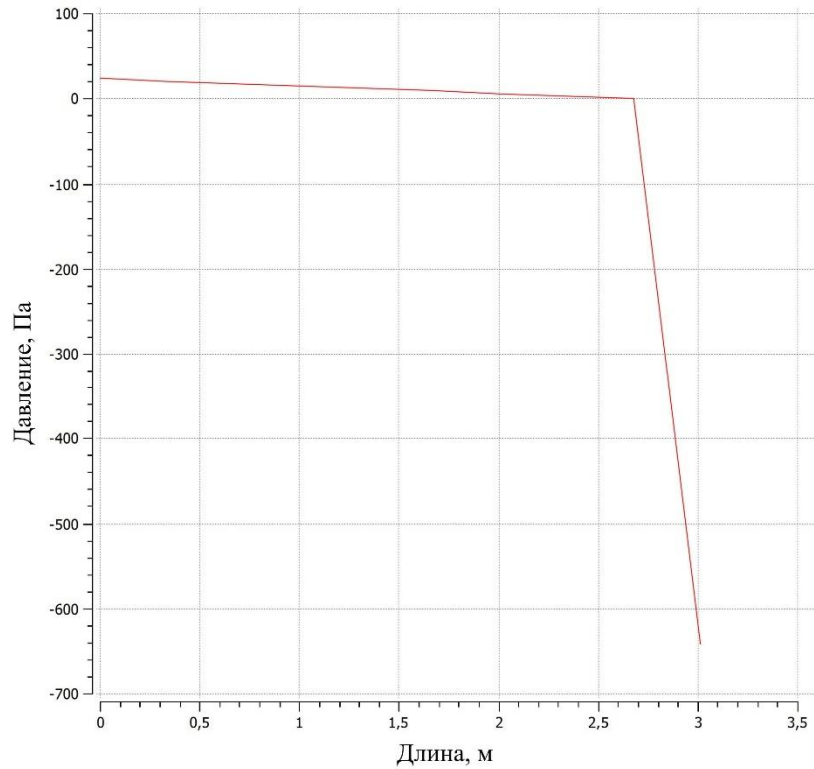


**Рисунок 3.2 – Схема к определению расчётных участков и результаты моделирования**

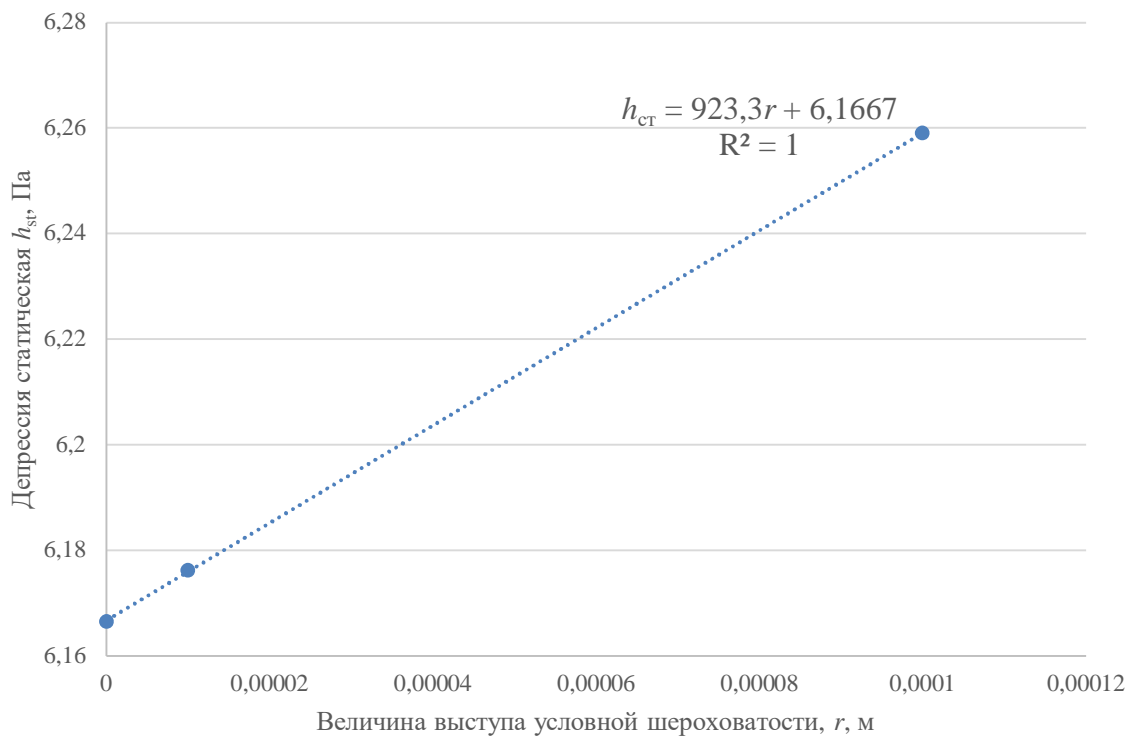
Для верификации модели ставилась задача установить полное соответствие экспериментальных данных результатам, полученным при численном моделировании. В данном случае контроль осуществлялся по величине статической депрессии между двумя точками №1 и №2.

Как видно из графика изменения давления по длине модели при численном моделировании (рисунок 3.3.) депрессия сначала плавно опускается на 25 Па, а затем идет резкое падение, связанное с резким уменьшением сечения (переход в вентилятор). Так как фактическое значение перепада давления на лабораторной установке было 23,5 Па, то можно высчитать величину условной шероховатости модели  $r = (h_{ст} - 6,1667)/923,3 = (23,5 - 6,1667)/923,3 = 0,0188 \text{ м} = 1,88 \text{ мкм}$ . Данная величина учитывает имитацию крепи в лабораторной модели.

Следовательно, при моделировании для полной сходимости результатов необходимо численным экспериментом определить величину условной шероховатости. В Ansys CFX она представляет из себя радиус полусфер, которыми покрыта поверхность.



**Рисунок 3.3 – График изменения давления по длине модели при численном моделировании**

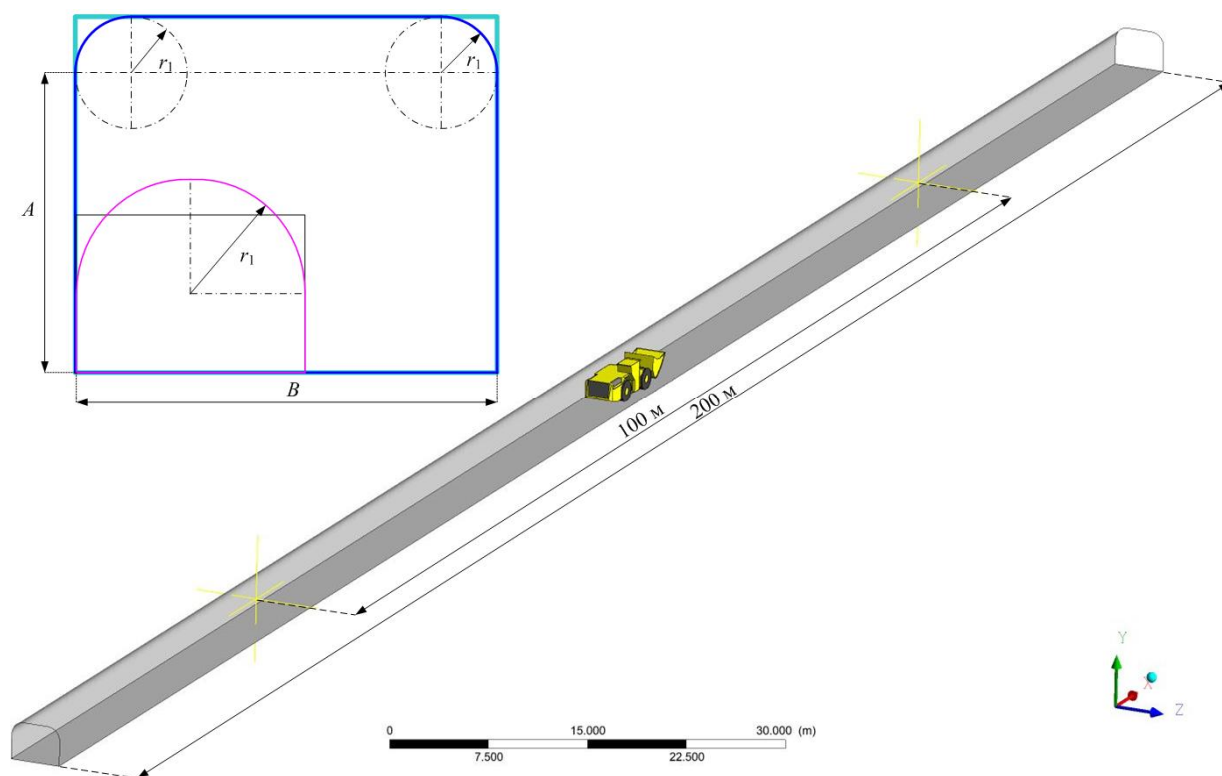


**Рисунок 3.4 – График влияния условной шероховатости в Ansys CFX на величину статической депрессии**

### 3.2 Построение моделей объекта исследований для проведения численных экспериментов

Для изучения лобовых аэродинамических сопротивлений используется метод конечных элементов, позволяющий подробно изучить сложные виды течения газов. Для создания геометрии, расчётной сетки, пре- и пост-процессинга используется среда Workbench.

Трёхмерная модель представляет из себя протяжённую горную выработку с размещенным СГО (рисунок 3.5). Для определения величины депрессии ( $h_{л.}$ ) и лобового аэродинамического сопротивления ( $R_{л.}$ ), коэффициента лобового сопротивления ( $c$ ) построена подробная модель погрузо – доставочной машины Atlas Copco ST-1030 (рисунок 3.6). Минимальный размер детали, учитываемый при создании модели, равен 20 мм.

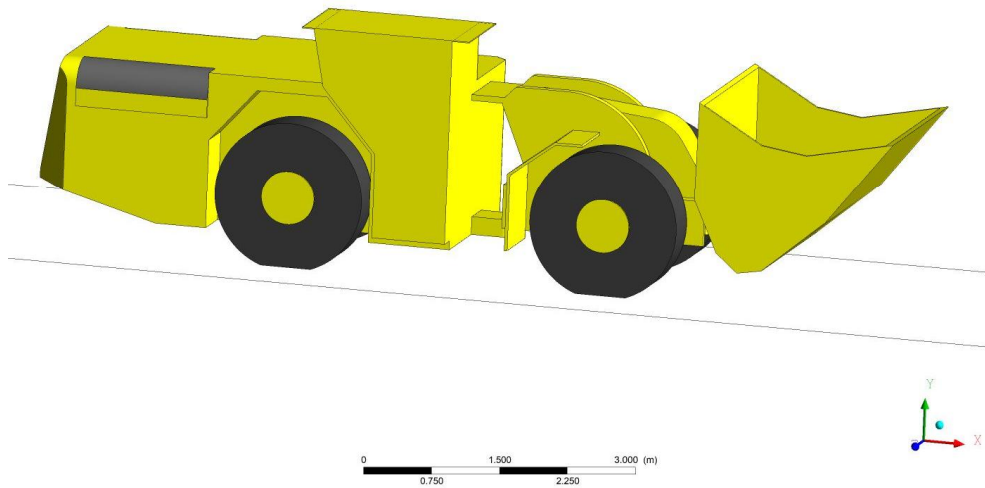
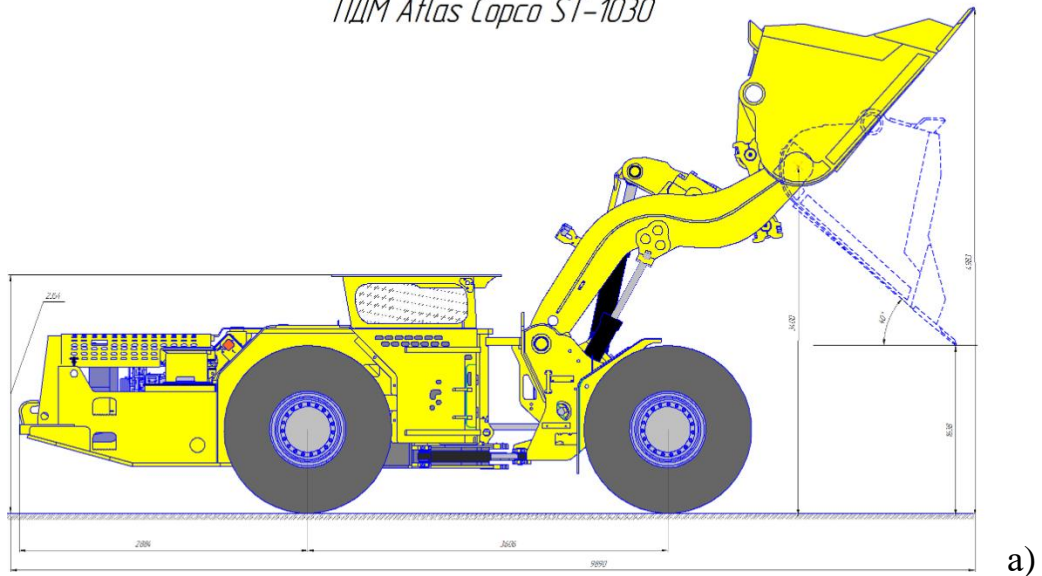


**Рисунок 3.5 – Общий вид расчётной модели**

Площадь сечения и форма горной выработки в процесс численного эксперимента изменяются. Форма изменяется от прямоугольной до сводчатой в широком диапазоне параметров ( $A$ ,  $B$  и  $r_1$ ). Протяженность горной выработки

составляет 200 м. Расстояние, на котором определяется расчётное значение депрессии, теряемой на преодолении лобового сопротивления, равно 100 м. При таких длинах происходит восстановление нормального распределения скоростей и имеются участки, на которых отдельно определяется величина аэродинамического сопротивления трения.

*ПДМ Atlas Copco ST-1030*

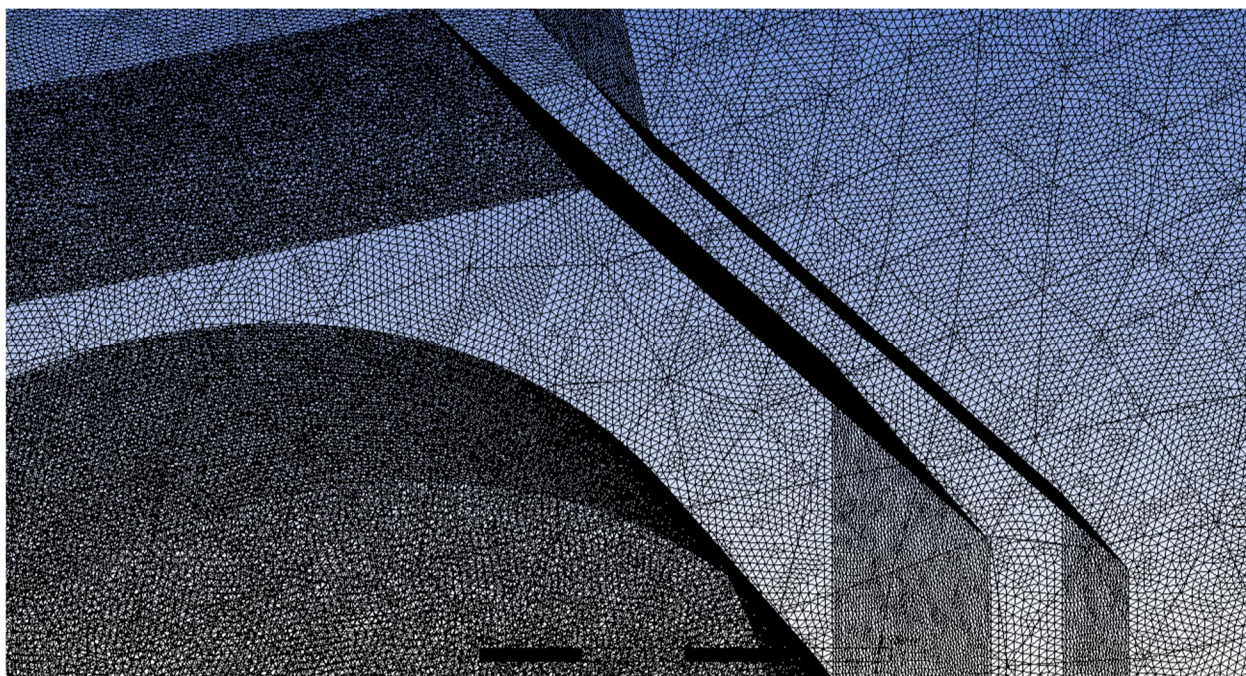


**Рисунок 3.6 – Габаритный чертеж ПДМ Atlas Copco ST-1030 (а) и построенная модель (б)**

Модель построена в модуле Ansys CFX. Он позволяет работать с параметрическими моделями, т.е. задавать изменение в геометрии объекта исследования (в рассматриваемой задаче это длины  $A$ ,  $B$  и радиус  $r_1$ ).

### 3.3 Построение расчетных сеток, выбор модели турбулентности и задание граничных условий

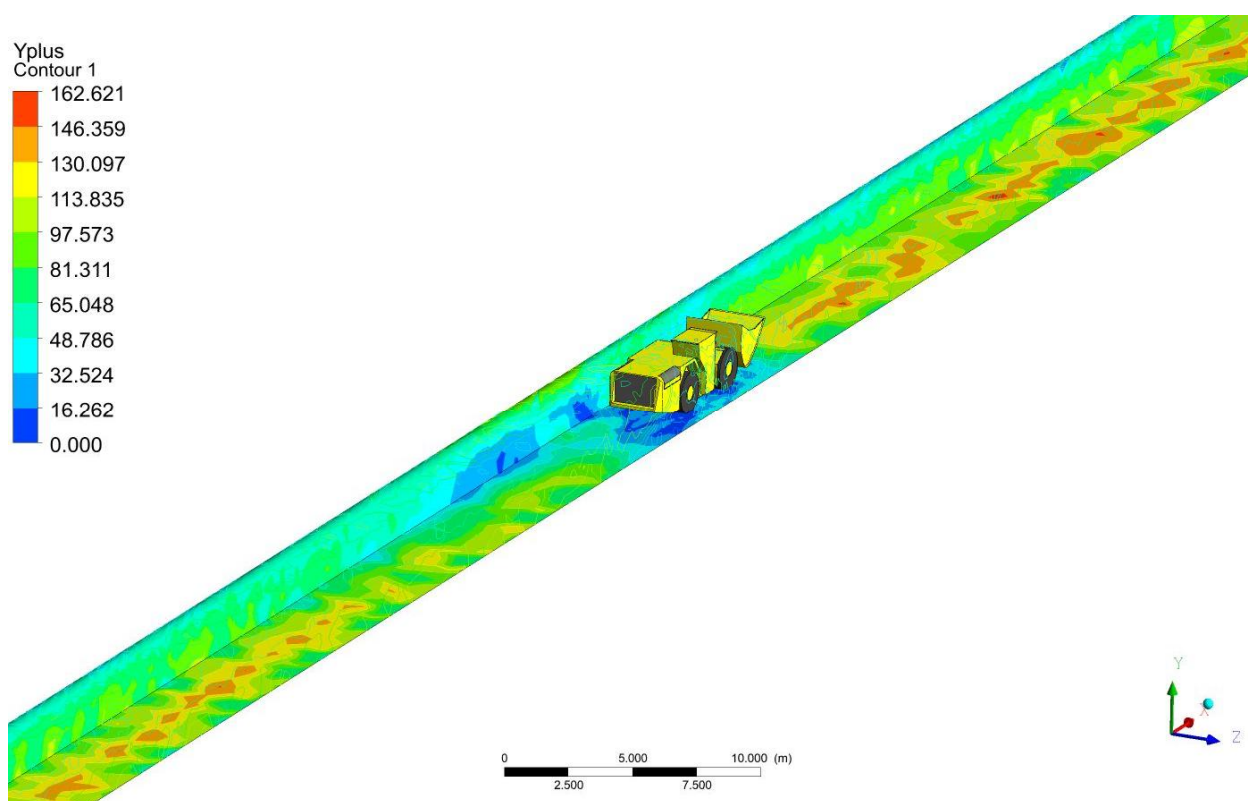
Расчетная сетка строится для аэродинамического расчёта в среде Ansys CFX, модуль Mesh. Для учета изучаемых сил (ударной волны, приходящейся на площадь объекта, перпендикулярную набегающему воздушному потоку; аэродинамического сопротивления трения по поверхности объекта и турбулентного сопротивления вихрей за объектом) создан отдельный регион, включающий все поверхности СГО. На данных поверхностях задается сгущение сетки. Минимальный размер элемента равен 10 мм (рисунок 3.7).



**Рисунок 3.7 – Демонстрация расчётной сетки в районе колеса СГО**

Количество элементов в расчетной области для объекта исследований составляет 36,5 млн. Общее количество поверхностей равно 183.

Размеры расчетной сетки изменяются плавно, параметр роста сетки Growth Rate равен 1,2. Качество расчётной сетки проверялось по критерию  $y^+$ , он находится в пределах от 0 до 300, что говорит о хорошем качестве расчётной сетки (рисунок 3.8).



**Рисунок 3.8 – Показатель  $y^+$  по поверхности горных выработок**

В горных выработках развитое турбулентное течение. Ламинарные потоки возможны при низких скоростях движения воздуха (значениях числа Рейнольдса менее 2300). Основные уравнения [82], описывающие процесс течения газа – закон сохранения массы (уравнение неразрывности), импульса (уравнение переноса импульса) и энергии (уравнение переноса энергии).

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0.$$

Уравнение переноса импульса

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) + S_M,$$

где индексы  $x_i$ ;  $x_j$  – определяют направление декартовой системы координат ( $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$ ),  $u_i$ ,  $u_j$  – декартовы составляющие скорости в направлении соответствующих осей,  $\tau$  – тензор напряжений молекулярной вязкости,  $S_M$  – источник импульса,

$$\tau = \mu \left( \frac{\partial}{\partial x_j} U_i + \frac{\partial}{\partial x_i} U_j \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial}{\partial x} U_i$$

Уравнение переноса энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) = & - \frac{\partial p}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j h} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \right] + S_E, \end{aligned}$$

где векторное поле турбулентности потока

$$\rho \overline{u_j h},$$

работа сил вязкости

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \right],$$

$\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $t$  – время;  $U$  – вектор скорости;  $\delta$  – символ Кронекера;  $\lambda$  – коэффициент молекулярной теплопроводности;  $S_E$  – источник энергии;  $\mu$  – коэффициент молекулярной (динамической) вязкости. Средняя полная энтальпия вычисляется по формуле

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U_i U_j + k,$$

где кинетическая энергия турбулентности  $k$  определяется по формуле

$$k = \frac{1}{2} \overline{U_i^2},$$

а статическая энтальпия как

$$h = C_p T,$$

где  $C_p$  – удельная теплоёмкость при постоянном давлении.

Основой расчетной технологии Ansys CFX является решатель Algebraic Coupled Multigrid, который использует неявную связанную схему решения линеаризованной системы уравнений. Для решения представленной системы уравнений используется метод осреднения уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу (RANS, Reynolds-Averaged Navier Stokes). Здесь уравнения

решаются относительно усредненного во времени потока и величины турбулентных флуктуаций.

Для решения системы уравнений с 6 переменными необходимо дополнить четыре уравнения моделью, описывающей турбулентность. Для определения депрессии, затрачиваемой на преодоление лобового аэродинамического сопротивления, используется модель сдвиговых напряжений shear-stress transport (SST, модель Ф. Ментера). Данная модель сочетает в себе устойчивость и точность разрешения пограничного слоя модели  $k-\omega$  и решения основного потока модели  $k-\varepsilon$ . Модель SST использует переходную функцию для плавного перехода от стандартной модели  $k-\omega$  вблизи стенки к модели  $k-\varepsilon$  для высоких чисел Рейнольдса во внешней части пограничного слоя. Применение стандартной модели  $k-\varepsilon$  в рассматриваемом случае приводит к возникновению отрицательных градиентов давления в точке отрыва воздушных потоков. Модели  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$  не учитывают перенос турбулентного касательного напряжения. Это приводит к завышению значения вихревой вязкости. Каждая модель турбулентности будет моделировать течения по-разному. Выбор модели турбулентности для решения различных задач важен и зависит от требуемой точности моделирования, характера исследуемого потока.

Вихревая вязкость в рассматриваемой модели SST рассчитывается

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}.$$

Кинетическая энергия турбулентности  $k$  примет следующий вид

$$\frac{\partial(k)}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{U_j k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' k \omega.$$

Частота турбулентной диссипации  $\omega$

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{U_j \omega})}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta' \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{2} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}.$$

Константы модели:

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}; \alpha_2 = 0.44; \beta_1 = \frac{3}{40}; \beta_2 = 0.0828; \beta^* = \frac{9}{100}; \sigma_{k1} = 0.85;$$

$$\sigma_{k2} = 1; \sigma_{\omega 1} = 0.5; \sigma_{\omega 2} = 0.856.$$

Для решения поставленных задач важно правильно сформулировать начальные и граничные условия. Цель численного моделирования определить величину коэффициента лобового аэродинамического сопротивления –  $c$ , а также рассчитать величины депрессии ( $h_{л.}$ ) и аэродинамического сопротивления ( $R_{л.}$ ), возникающие при обтекании СГО.

К граничным условиям относят параметры, задаваемые на неподвижных границах модели: поверхность входа потока воздуха в исследуемую область, поверхность выхода потока воздуха из расчётной области и граница адиабатической непроницаемой поверхности (почва, кровля и борта горной выработки). При расчётах используется модель реальных газов Редлиха-Квонга. Учитываются силы плавучести приближением Буссинеска.

Начальные, граничные условия, а также вычисляемые параметры приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

**Таблица 3.1 – Начальные условия**

№	Геометрически параметры горной выработки	Значение / диапазон значений	Параметр
Параметры горной выработки и СГО			
1	Ширина горной выработки, $B$ , м	4-6	да
2	Высота горной выработки, $C$ , м	3-5	да
3	Скругление по верхней кромке горной выработки, $r$ , м	0,1-1	да
4	Миделево сечение ПДМ, $S_M$ м <sup>2</sup>	5,66	нет
Параметры сетки			
5	Минимальный размер элемента, м	0,01	нет

**Таблица 3.2 – Граничные условия**

№		Значение / диапазон значений	Граница	Параметр
Вход в расчетную область				
1	Давление полное $p_{tot}$ , Па	10 – 200	Вход	да
2	Температура полная, °С	24		нет
3	Шероховатость горной выработки, м	0,01-0,1	Стенка	да
Выход из расчетной области				
4	Средняя по сечению скорость движения воздуха, $v$ , м/с	0,1 – 8	Выход	да

### **3.4 Анализ влияния факторов, определяющих величину аэродинамического лобового сопротивления и коэффициента лобового сопротивления**

Основная цель проведения численных расчётов заключается в получении величины депрессии, возникающей при преодолении лобового аэродинамического сопротивления. Зная эту величину, можно вычислить дополнительно величину аэродинамического лобового сопротивления и коэффициента аэродинамического лобового сопротивления.

Порядок определения величины депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением трения, лобового аэродинамического сопротивления, коэффициента лобового аэродинамического сопротивления при численном моделировании следующий:

- 1) рассчитывается удельное аэродинамическое сопротивление трения на участке со стабильной скоростью движения воздуха по оси горной выработки ( $h_{тр.20м}$ ),
- 2) рассчитывается общее падение депрессии на участке 100 м с СГО ( $h_{об.}$ ),
- 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 ( $R_{л.}$ ),

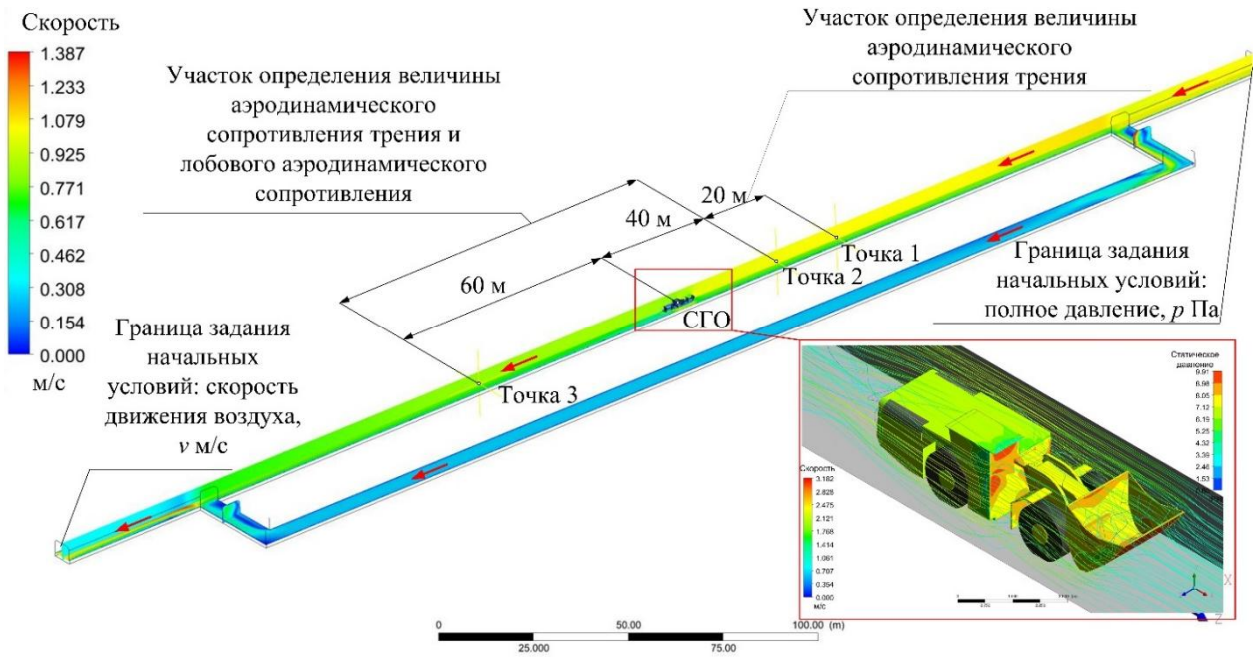
- б) рассчитывается коэффициент лобового аэродинамического сопротивления ( $c$ ).

Расчётные зависимости приведены в таблице 3.3.

**Таблица 3.3 – Вычисляемые параметры**

№	Вход в расчетную область	Формула	Параметр
1	Периметр горной выработки, м	$P = 2(B + C) - 0,86r^2$	Входной
2	Площадь сечения, м <sup>2</sup>	$S = B C - 0,43r^2$	Входной
3	Гидравлический диаметр, м	$D = 4 S / P$	Входной
4	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	$Q = S v$	Входной
5	Депрессия без СГО на участке длиной 20 м, Па	$h_{ст.} = p_1 - p_2$	Входной
6	Удельная потеря давления на трение, Па	$h_{ст.уд.} = h_{ст.} / 10$	Входной
7	Депрессия с СГО на участке длиной 100 м, Па	$h_{п.} = p_1 - p_2$	Выходной
8	Депрессия, затрачиваемая на преодоление лобового аэродинамического сопротивления, Па	$h_{л.} = h_{п.} - 100 h_{ст.уд.}$	Выходной
9	Аэродинамическое лобовое сопротивление, кп	$R_{л.} = h_{л.} / Q^2$	Выходной
10	Коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, безразмерный	$c = (2h_{л.}(S - S_M)) / (\rho v^2 S_M)$ $c = g S h_{л.} / (\gamma S_M (v_B S / (S - S_M))^2)$	Выходной

Общая схема к определению расчётных участков приведена на рисунке 3.9.

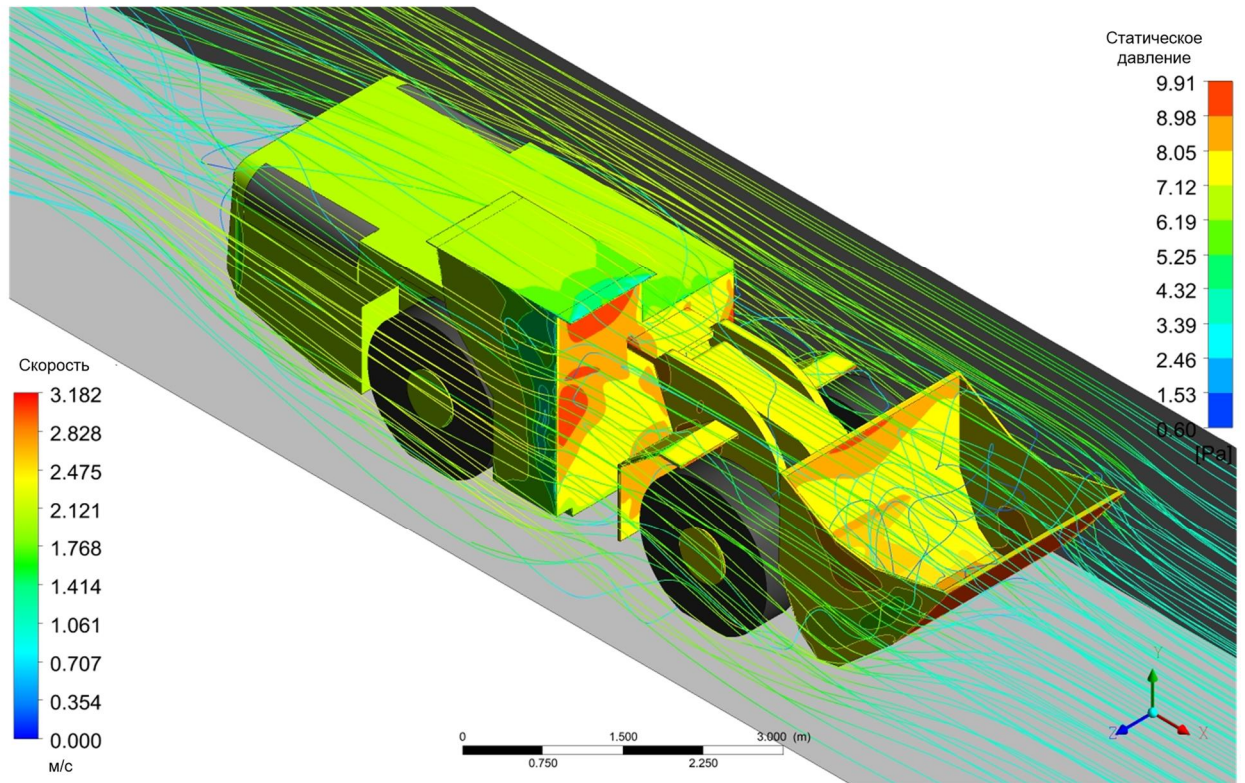


**Рисунок 3.9 – Схема к определению расчётных участков и результаты моделирования**

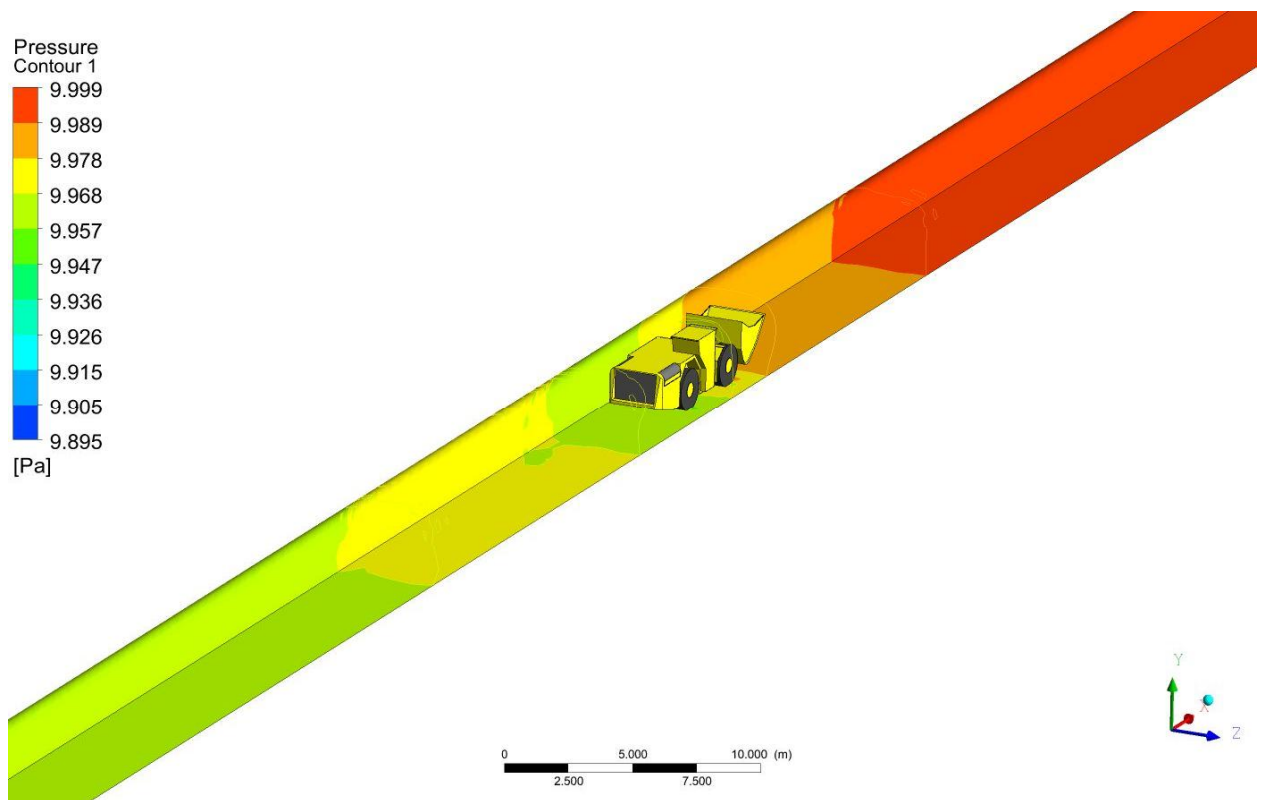
По поверхности ПДМ можно наблюдать выступающие части машины, на которые приходится избыточное давление (рисунок 3.10). На эти места в последствии должны обратить внимание конструктора для снижения лобового аэродинамического сопротивления.

За машиной СГО наблюдается незначительный рост статического давления, скорее всего обусловленный изменением аэродинамики потока (рисунок 3.11). Вихревые потоки создают дополнительный динамический напор на борта, кровлю и почву, но ее величина в пределах сотых долей Па.

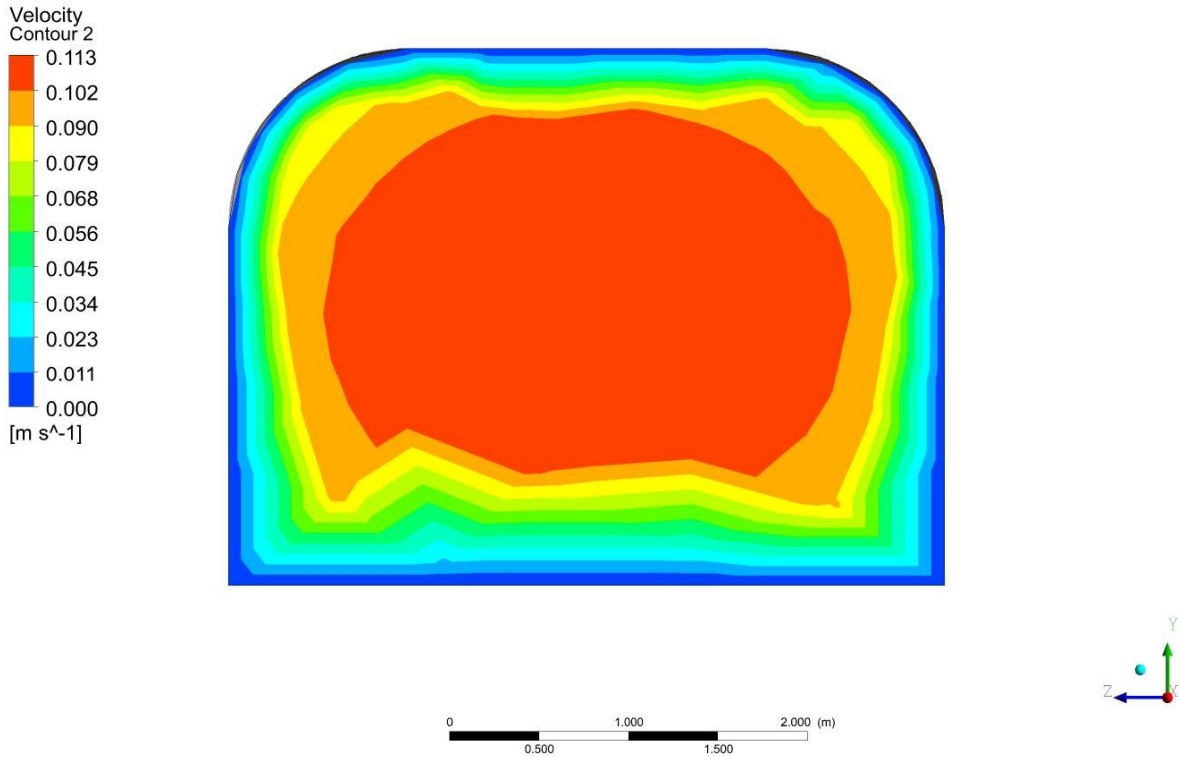
Изовелы скорости движения воздуха приведены на рисунке 3.12. Они полностью соответствуют существующим представлениям о распределении воздушных масс в сечении горной выработки.



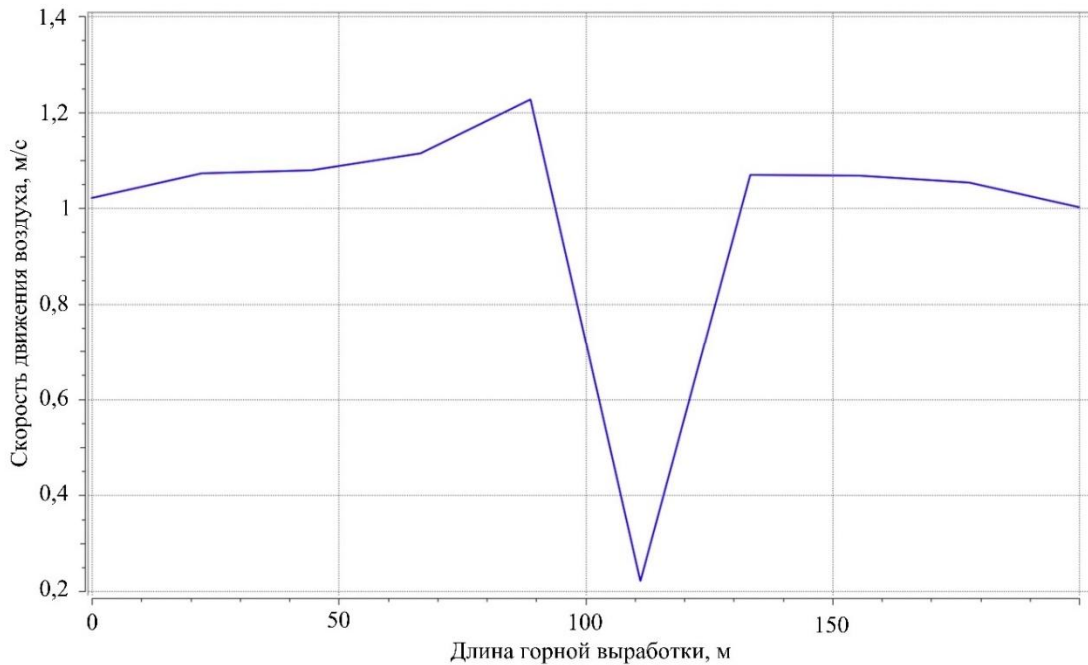
**Рисунок 3.10 – Графическое представление результатов моделирования: давления по поверхности СГО и изолинии скорости движения воздуха**



**Рисунок 3.11 – Графическое представление результатов моделирования: давления по поверхности горной выработки**

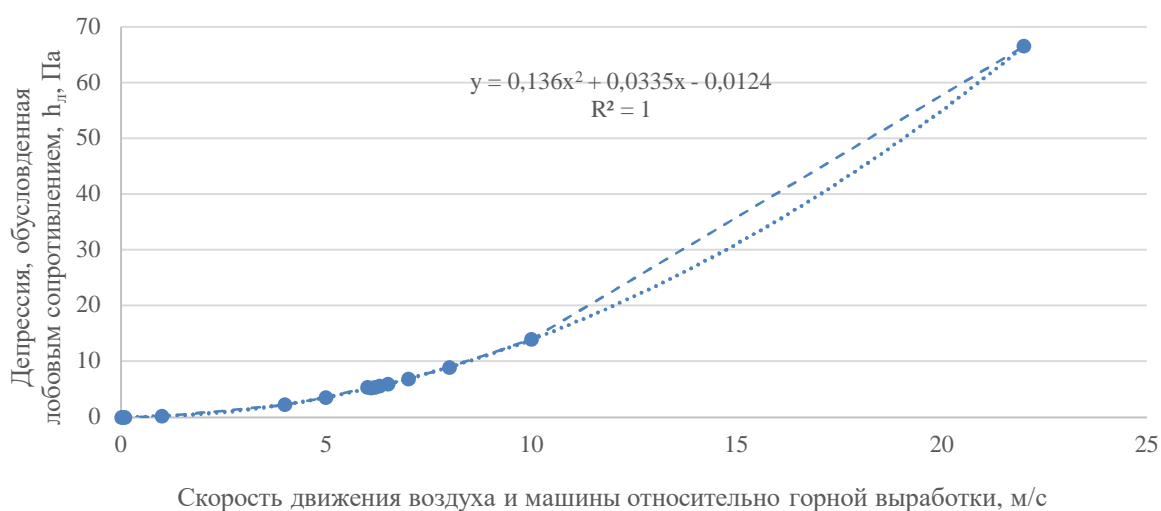


**Рисунок 3.12 – Графическое представление результатов моделирования: распределение скорости движения воздуха по сечению горной выработки**



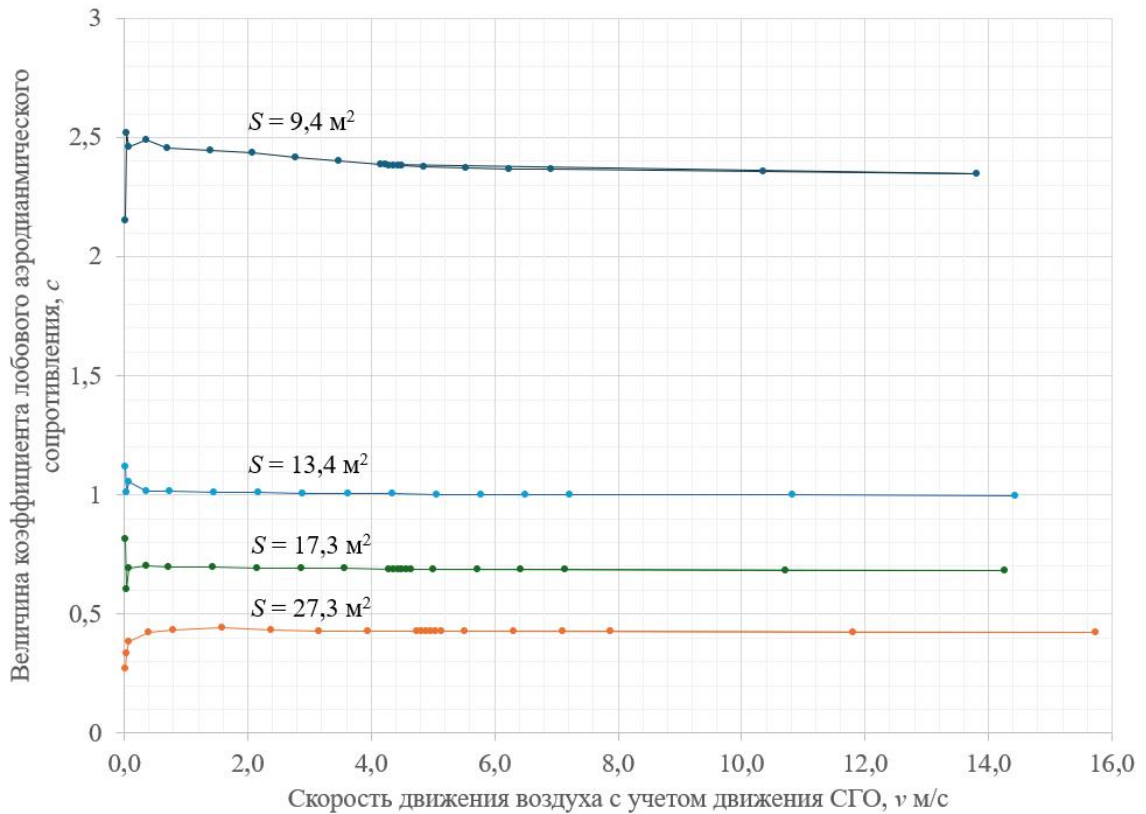
**Рисунок 3.13 – Распределение скорости движения воздуха по горной выработке**

В результате проведения компьютерного моделирования и вычислений впервые определен коэффициент лобового аэродинамического сопротивления для СГО марки Atlas Copco ST-1030.



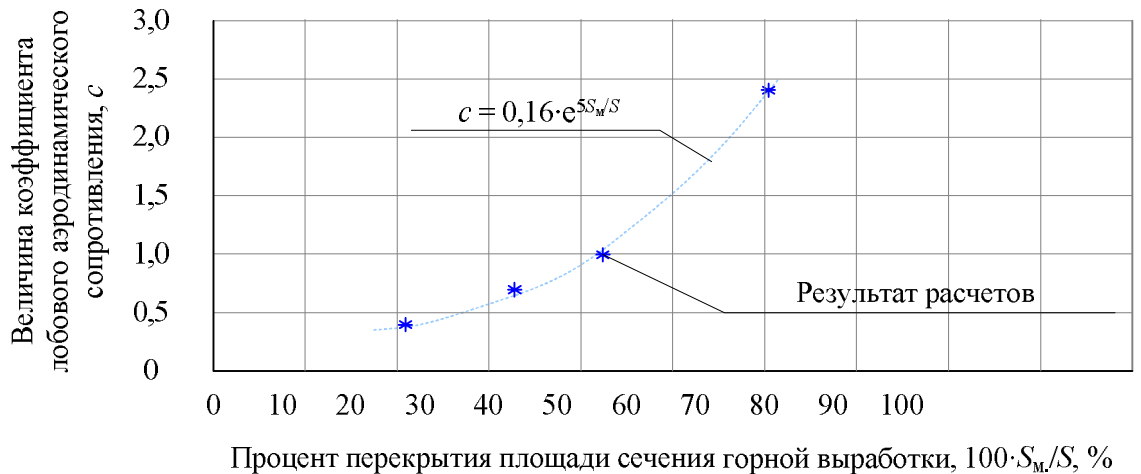
**Рисунок 3.14 – График зависимости депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением в зависимости от скорости движения воздуха и машины**

Численным экспериментом установлено, что значение аэродинамического лобового сопротивления и соответствующий коэффициент для отдельной СГО - величины непостоянные (рисунок 3.15). Он зависит от скорости движения воздуха и машины, а также 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 3.15 – 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 3.16) имеет зависимость аналогичную лабораторным исследованиям.



**Рисунок 3.16 – График зависимости коэффициента лобового аэродинамического сопротивления трения от процента перекрытия площади сечения горной выработки**

### Выводы

Проведенная верификация численного моделирования движения воздуха по лабораторной установке позволила обосновать начальные и граничные условия моделирования лобовых аэродинамических сопротивлений для горных выработок шахт и рудников.

Определено, что при моделировании необходимо скорректировать величину условной шероховатости горной выработки путем сравнения фактического перепада давления за счёт сопротивления трения с модельным значением. Перепад давления в модели линейно зависит от радиуса условной сферы шероховатости, который задается в программном комплексе Ansys CFX.

Численным экспериментом установлено, что величина аэродинамического лобового сопротивления и соответствующий коэффициент для отдельной СГО, величина не постоянная. Она зависит от скорости движения воздуха и машины, площади сечения горной выработки. Результаты численного эксперимента косвенно подтверждаются общими представлениями из аэродинамики простых тел (сфер, цилиндров и т.д.).

В результате проведения компьютерного моделирования и вычислений впервые определен коэффициент лобового аэродинамического сопротивления для СГО марки Atlas Copco ST-1030.

Разработана и верифицирована методика численного моделирования с целью определения величина лобового аэродинамического сопротивления.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЧЕТУ ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕНТИЛЯЦИИ**

В настоящее время отсутствуют значения коэффициентов лобового аэродинамического сопротивления трения ( $c$ ) для всех горных машин (СГО, ПДМ, ШАС, электровозов и т.д.). Соответственно учесть их при проектировании вентиляции шахт и рудников невозможно. Как показали вышеприведенные исследования, величина дополнительной депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением, может быть значительной, сопоставимой с депрессией протяженной горной выработки. При этом данный вид депрессии может менять свое местоположение во времени и пространстве, т.е. горные машины могут перемещаться по сети горных выработок, тем самым изменяя депрессию разных участков, соответственно и лобовые аэродинамическое сопротивление.

### **4.1 Разработка методики натуральных измерений лобовых аэродинамических сопротивлений**

Методика натуральных измерений лобовых аэродинамических сопротивлений для получения величины дополнительной депрессии, затрачиваемой на преодоление лобового аэродинамического сопротивления, для последующего учета данного вида сопротивления при проектировании вентиляции, разработана на основании проведенных натуральных экспериментов (раздел 2.1 данной диссертации).

В ее основу положена идея учета максимального возможного значения депрессии. Как показали исследования, такой перепад давления возникает в процессе движения горных машин. При этом направление движения машин относительно направления движения воздуха существенного влияния не оказывает.

Депрессия лобового аэродинамического сопротивления определяется по Методике косвенным путем с учетом прямых измерений величин, связанных с искомой величиной и известными зависимостями. Все измерения контактные. Методика выполнения измерений (далее – МВИ) представлена в таблице 4.1.

**Таблица 4.1 – Методика выполнения измерений**

<b>1.</b>	<b>Наименование МВИ</b>	Методика выполнения измерений депрессии, обусловленной лобовыми аэродинамическими сопротивлениями.
<b>2.</b>	<b>Нормативные документы, инструкции, справочные материалы</b>	ГОСТ 8.010-2013 — «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики выполнения измерений. Основные положения»; ГОСТ Р 8.563-2009 — «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений». Инструкция по эксплуатации микроанометра многодиапазонного с наклонной трубкой ММН-2400 (5)-1,0 ЛА 2.832.001 ИЭ Руководство по эксплуатации Анемометра переносного рудничного АПР-2 А1.00.000РЭ ТУ У10.1-05411357-001-2001 Паспорт «Измеритель абсолютного и дифференциального давления газа МБГО-2. Паспорт» 304.00.000 ПС ТУ 4212-304-57888324-2008
<b>3.</b>	<b>Область применения</b>	Проветривание шахт и рудников
<b>4.</b>	<b>Метод (методы) измерений</b>	Прямой, контактный метод измерения температуры и влажности; Контактный метод измерения депрессии; Контактный метод измерения скорости движения воздуха (способ обводом в сечении/перед собой или точечный метод); Прямой метод измерения длин.
<b>5.</b>	<b>Средства измерения</b>	1) Микроанометр (например, ММН-2400, МБГО-2 и др.); 2) Анемометр (например, АПР-2, АСО-3 и др.); 3) Барометр (например, БАМ, МБГО-2 и др.); 4) Термометр/психрометр (например, ТГО - 2МН, Ассмана и др.); 5) Рулетка.
<b>6.</b>	<b>Требования к погрешности</b>	В соответствии с паспортами на применяемые средства измерения.
<b>7.</b>	<b>Требования к безопасности</b>	В соответствии с паспортами на применяемые средства измерения.

8.	<b>Подготовка к выполнению измерений</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Выбрать прямолинейный участок горной выработки протяженностью не менее 100 м;</li> <li>2) подготовить микроанометр (ММН-2400, МБГО-2 или др.) к работе на выбранном участке в соответствии с руководством или паспортом;</li> <li>3) проложить шланги от микроанометра (ММН-2400, МБГО-2 или др.);</li> <li>4) подготовить приборы для измерения абсолютного давления (МБГО-2, барометр или др.), влажности и температуры (психрометр Ассмана или ТГО-2МП или др.).</li> </ol>
9.	<b>Порядок выполнения измерений</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) измерить периметр, длину, ширину и другие размеры для вычисления площади сечения горной выработки (рулеткой или лазерной рулеткой);</li> <li>2) измерить абсолютное давление (МБГО, барометр), влажность и температуру (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);</li> <li>3) записать тип и марку СГО, измерить ширину и высоту СГО;</li> <li>4) измерить среднюю скорость движения воздуха способом обвода в сечении или точечным способом (анемометр АПР-2);</li> <li>5) измерить скорость движения воздуха в одной точке (около микроанометра) и высчитать коэффициент для пересчета показаний из одной точки в среднюю скорость по сечению;</li> <li>6) измерить перепад давления (депрессию) экспериментального участка (ММН-2400 или МБГО-2);</li> <li>7) дать команду на движение СГО (по рации или подать любой заранее обговоренный условный сигнал). Примечание: Водитель перед началом движения должен подать звуковой сигнал (три коротких гудка);</li> <li>8) водитель должен придерживаться одной обговоренной заранее скорости движения СГО;</li> <li>9) каждые 30 с необходимо проводить измерения скорости движения воздуха в контрольной точке (анемометр АПР-2) и депрессии (ММН-2400 или МБГО-2);</li> <li>10) заполнить Журнал измерений (таблица 4.2);</li> <li>11) Выполнить расчёты и заполнить Журнал вычислений (таблица 4.3).</li> </ol>
	<b>Разработчик</b>	Федоров Д.А.

Таблица 4.2 – Журнал измерений

№	Параметр										
	Направление движения СГО (по потоку, против потока)	$h_{ст.}$	$h_{об.}$	$p_{абс.}$	$T$	$w$	$v_B$	$S$	$P$	$L$	$S_M$
		Па	Па	мм рт. ст.	°С	%	м/с	м <sup>2</sup>	м	м	м <sup>2</sup>
1											
2											
...											

Таблица 4.3 – Журнал вычислений

№	Вычисляемая величина	Формула	Значение
1	Расход воздуха, $Q$ м <sup>3</sup> /с	$Q = v_B S$	
2	Удельный вес воздуха, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho = 486 p_{абс.}/(273+T)$	
3	Величина потери напора при обтекании воздухом препятствия (лобового аэродинамического сопротивления), $h_{л.}$ Па	$h_{л.} = h_{об.} - h_{ст.}$	
4	Средняя скорость потока в выработке у тела, формирующего сопротивление, $u_B$ м/с	$u_B = v_B S / (S - S_M),$	
5	Лобовое аэродинамическое сопротивление, $R_{л.}$ кп	$R_{л.} = h_{л.} / Q^2$	
6	Коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, $c$	$c = gSh_{л.} / (\gamma S_M (v_B S / (S - S_M))^2)$ или $c = h_{л.} g S / \rho S_M u_B^2$ т.к. $\rho = \gamma / g.$	

Разработанная Методика универсальная и может применяться как для шахт и рудников, так и для любых подземных объектов, где эксплуатируются машины СГО (например, тоннели).

## 4.2 Разработка методики численного расчёта величины лобовых сопротивлений при проектировании вентиляции

Если нет технической возможности провести натурные испытания по определению величины депрессии лобового аэродинамического сопротивления, то рекомендуется провести численное моделирование в специализированном программном обеспечении, например, Ansys CFX или Flow Vision.

Порядок определения величины депрессии лобового аэродинамического сопротивления, лобового аэродинамического сопротивления трения, коэффициента лобового аэродинамического сопротивления трения при численном моделировании рекомендуется применять в начальный период проектирования вентиляции шахты или рудника.

Методика численного расчёта величины лобовых сопротивлений при проектировании вентиляции приведена в таблице 4.4.

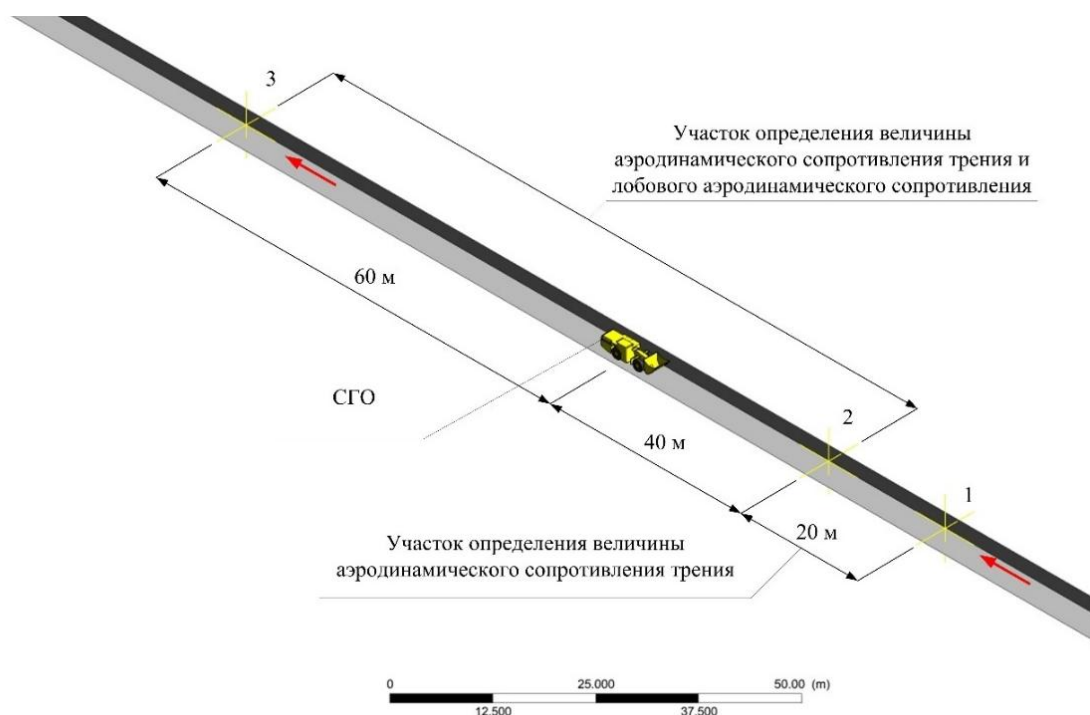
**Таблица 4.4 – Методика численного расчёта величины лобовых сопротивлений при проектировании вентиляции**

№	Действие	Примечания и рекомендации
1	Создается трехмерная модель горной выработки и СГО в CAD редакторе или встроенных модулях (например, в Ansys CFX модуль Geometry в Workbench)	Минимальная длина численной модели горной выработки не менее 200 м. Детали СГО размеры, которых менее 0,1 м, рекомендуется не прорисовывать.
2	Генерируется расчётная сетка по трехмерной модели	Рекомендуется сделать сгущение сетки по поверхности СГО учитывая, что на самой минимальной поверхности должно быть не менее 2 элементов расчётной сетки.
3	В редакторе анализов результата (например, в Ansys CFX модуль Results в Workbench) по ключевым точкам 1 и 2	Ключевые точки выбираются из одной плоскости на одной прямой линии, проведенной в центре горной выработки.

	(рисунок 4.1) вычисляется общее падение депрессии на участке 20 м с СГО ( $h_{тр.}$ )	
4	В модуле Results или Parameter Set по ключевым точкам 1 и 2 (рисунок 4.1) вычисляется удельное аэродинамическое сопротивление трения на участке со стабильной скоростью движения воздуха по оси горной выработки ( $R_{тр.20м}$ )	Для ПО Ansys CFX в модуле Parameter Set в Workbench необходимо записать зависимость $R_{тр.20м} = h_{тр.} / Q^2 = h_{тр.} / (v_B \cdot S)^2$ Скорость движения воздуха и площадь сечения горной выработки задаются как начальные условия и могут быть заданы параметрами
5	В редакторе анализов результата (например, в Ansys CFX модуль Results в Workbench) по ключевым точкам 2 и 3 (рисунок 4.1) вычисляется общее падение депрессии на участке 100 м с СГО ( $h_{об.}$ )	
6	В модуле Parameter Set по ключевым точкам 1 и 2 (рисунок 4.1) вычисляется депрессия аэродинамического сопротивления трения для участка с СГО	$h_{тр.100м} = 5 \cdot h_{тр.20м}$
7	В модуле Results или Parameter Set вычисляется падение депрессии, затраченное на преодоление лобового аэродинамического сопротивления	$h_{л.} = h_{об.} - h_{тр.100м}$
8	В модуле Results или Parameter Set вычисляется величина лобового аэродинамического сопротивления ( $R_{л.}$ ),	$R_{л.} = h_{л.} / Q^2$
9	В модуле Results или Parameter Set вычисляется величина коэффициента лобового аэродинамического сопротивления ( $c_x$ ).	$c_x = h_{л.} g S / \rho S_M u_B^2$

Разработанная Методика численного расчёта величины лобовых сопротивлений универсальна и может применяться при проектировании

вентиляции любых вентиляционных сетей опасных производственных объектов, осуществляющих ведение горных работ подземным способом.

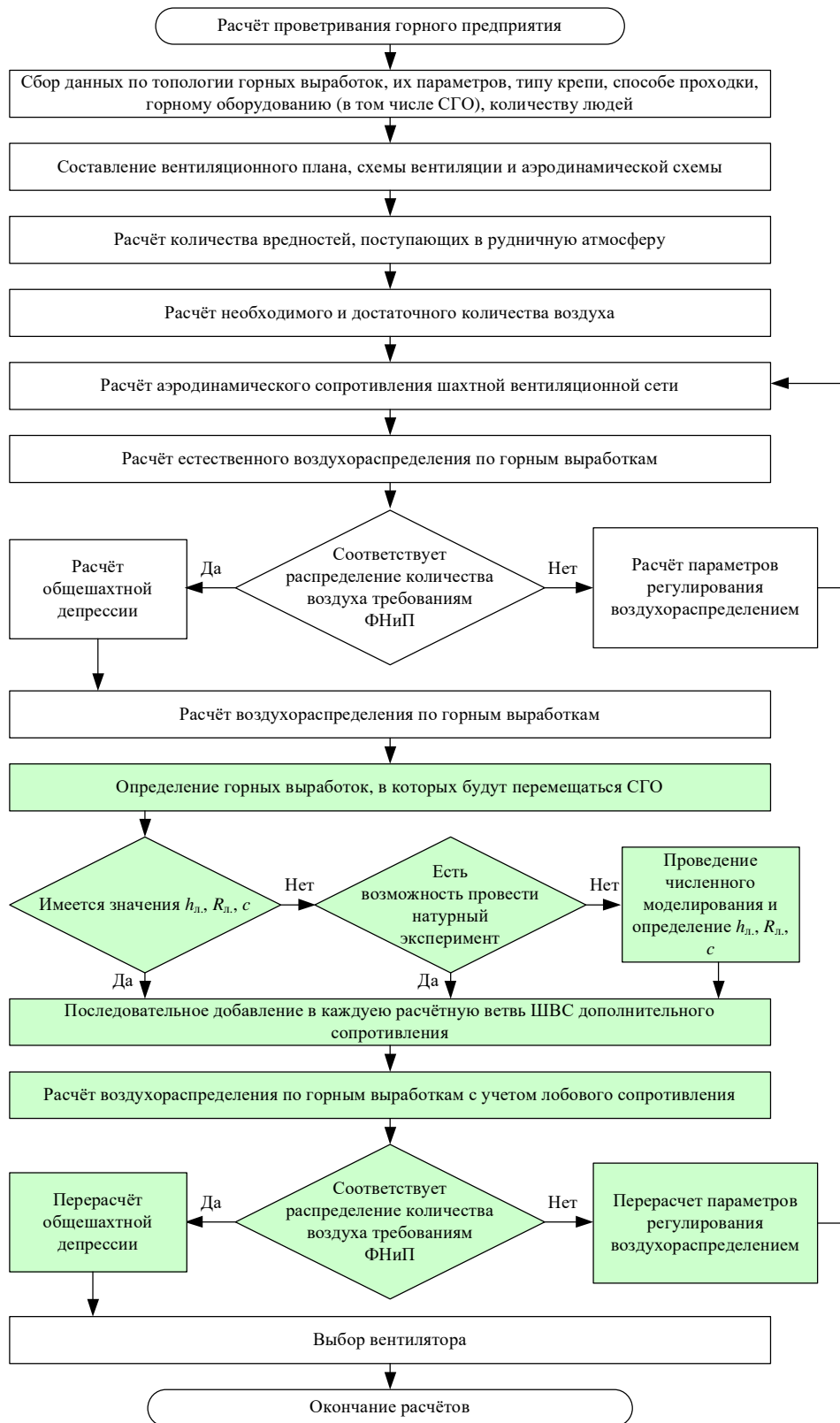


**Рисунок 4.1 – Схема к численному моделированию для определения лобового аэродинамического сопротивления**

### **4.3 Рекомендации учета лобовых сопротивлений при проектировании вентиляции**

Депрессия лобового аэродинамического сопротивления обусловлена движущимся объектом – СГО. 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 сети и на перераспределение воздуха предлагается следующий алгоритм (рисунок 4.2), который может быть реализован в программных комплексах, таких как Вентиляция 2, Аэросеть, РЕВОД, Динавент или др. Данные программы активно развиваются [43, 60-64], однако лобовые аэродинамические сопротивления не учитывают.



**Рисунок 4.2 – Алгоритм учета лобовых аэродинамических сопротивлений**

#### 4.4 Расчёт проветривания горных выработок рудника «Скалистый» с учетом лобовых аэродинамических сопротивлений

Для апробации Методики численного расчёта величины лобовых сопротивлений и рекомендаций по порядку учета лобовых сопротивлений были проведены расчёты для действующего горного предприятия Норильского Никеля. Строящийся комплекс горных выработок одностороннего заезда в камеру питателя (отн. отм. -1989,0 м), соединительной выработки до конвейерной выработки с дозаторной (отн. отм. -2012,5) и уклона выдачи просора (отн. отм. -2048,5) ствола СКС-1 рудника «Скалистый» шахты «Глубокая», представлен на рисунке 4.3. Типовое сечение горных выработок показано на рисунке 4.4, как видно большую его часть перекрывает СГО.

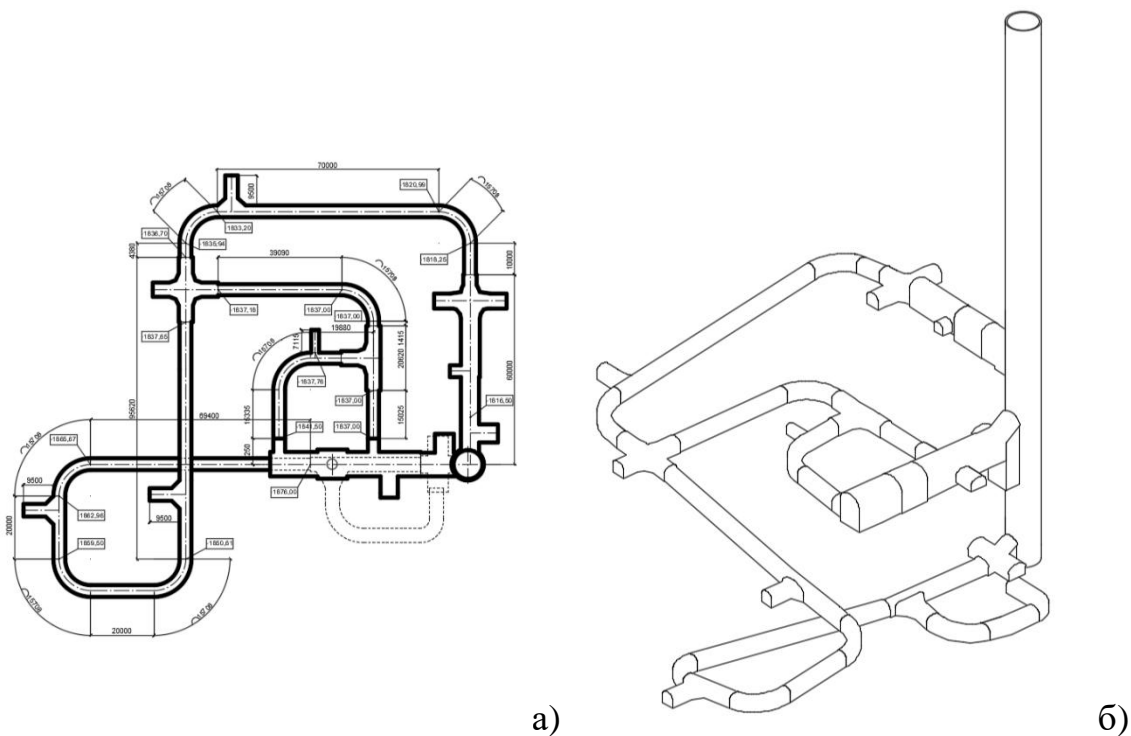
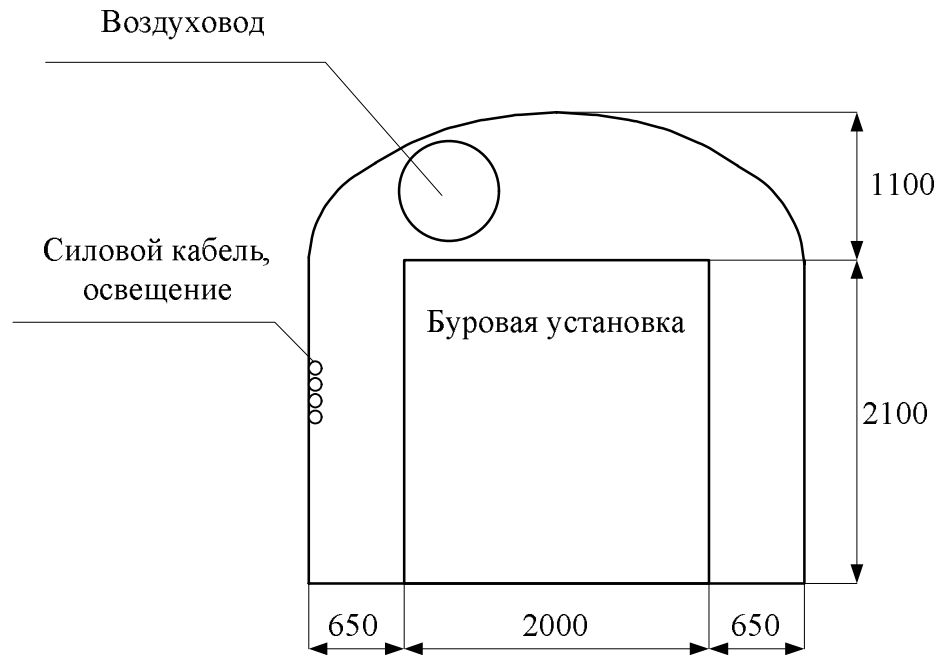


Рисунок 4.3 – План горных выработок (а) и аксонометрическая схема (б)



**Рисунок 4.4 – Типовое сечение горной выработки**

В результате выполненных расчётов по определению расчетного количества воздуха для проветривания одного участка были получены следующие значения по основным факторам

По людям  $Q_{\text{л}} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ ,

По машинам с ДВС  $Q_{\text{ДВС}} = 12 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Общее расчётное количество воздуха будет определяться по фактору разбавления вредных газов, образующихся при применении машин с ДВС

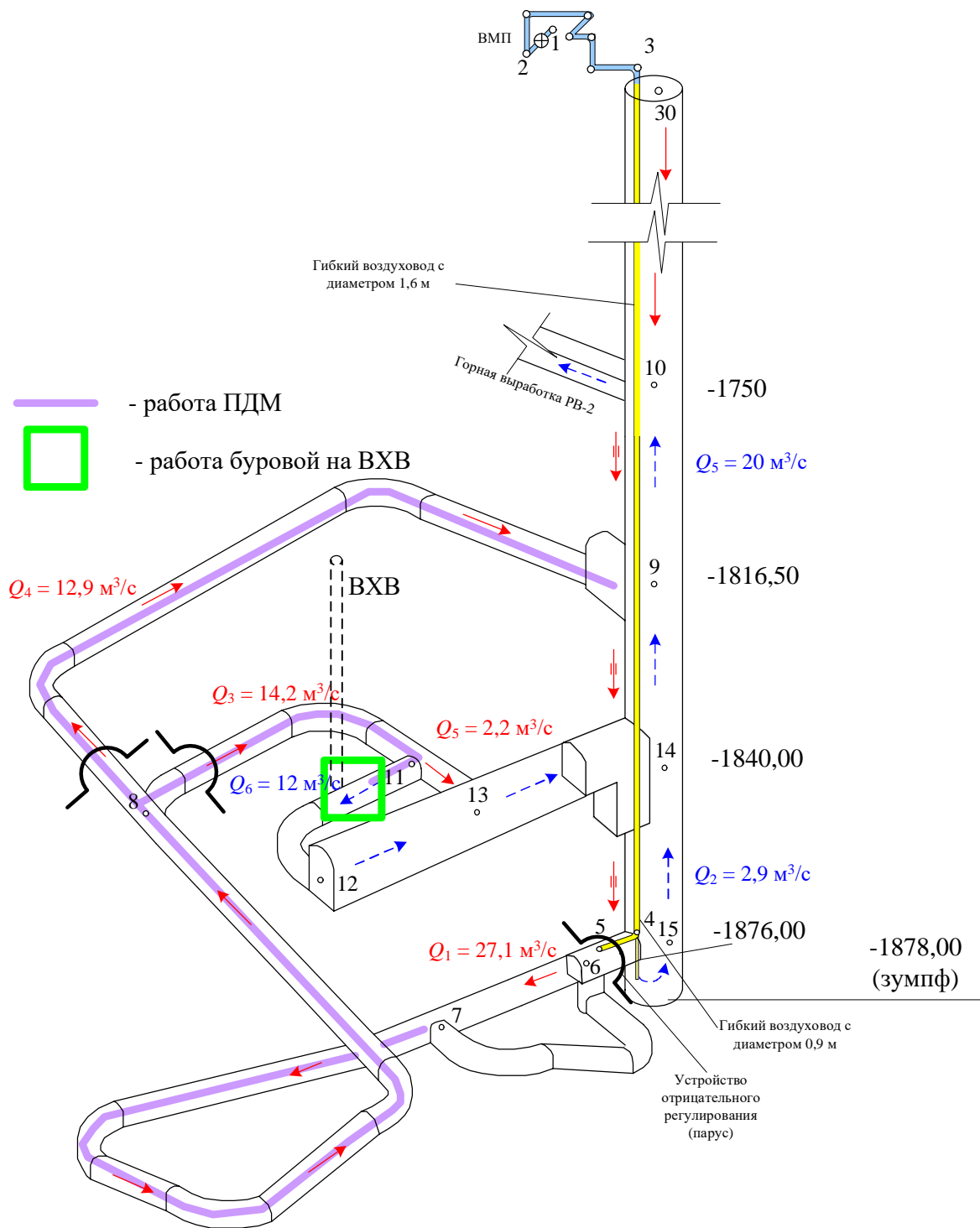
$$Q_{\text{р.}} = Q_{\text{ДВС}} = 12 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границы по допустимым минимальному и максимальному значениям расхода воздуха

$$Q_{U_{\text{min}}} = 3,1 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{U_{\text{max}}} = 122,4,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для проветривания комплекса горных выработок при бурении ВХВ ствола СКС-1 принимается нагнетательно способ проветривания с помощью дополнительного вентилятора с гибким воздуховодом. Для проветривания предусматриваются два проходческих вентилятора – основной и резервный (аварийный). Аксонометрическая схема проветривания приведена на рисунке 4.5.

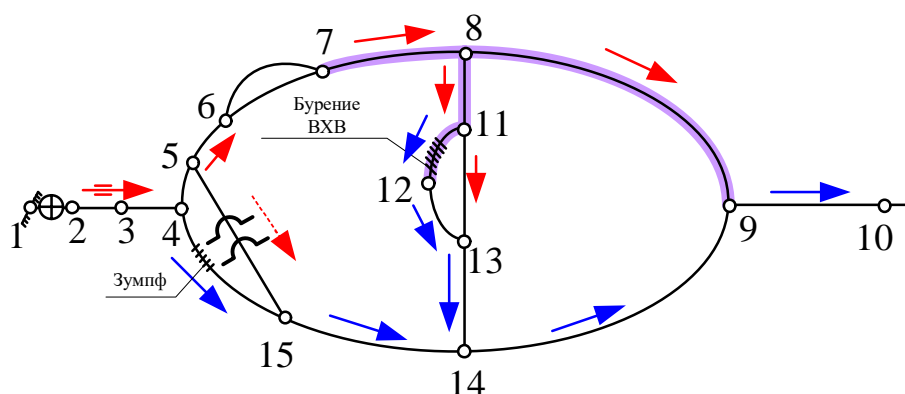


**Рисунок 4.5 – Аксонометрическая схема проветривания горных выработок околоствольного двора при бурении ВХВ**

Воздух подается по гибкому воздухопроводу с поверхности до уклона выдачи просора (отн. отн. -2048,5). Участок по поверхности имеет общую

протяженность 61 м. Металлический воздуховод диаметром 1,6 м (радиус 0,8 м). Коэффициент аэродинамического сопротивления трения равен  $0,00032 \text{ кг с}^2/\text{м}^8$ . Воздуховод на поверхности имеет 7 поворотов на  $90^\circ$ . От металлического воздуховода по стволу проложен гибкий воздуховод с диаметром 1,6 м от отметки 0 до -1840 м и далее до -1876 м с диаметром 0,9 м. Далее воздуховод разделяется на две части, одна с диаметром 1,6 м поворачивает под углом  $90^\circ$  и заходит в примыкающую к стволу горную выработку на длину 5 м, другая часть опускается ниже сужается до зумпфа.

Схема проветривания – простая диагональная (рисунок 4.6). Для распределения воздушных потоков используются вентиляционные сооружения (парус). Расстояние паруса над почвой позволяет проводить отрицательное регулирование воздухораспределения.



**Рисунок 4.6 – Аэродинамическая схема**

Параметры вентиляционной сети к аксонометрической и аэродинамической схемам с расчётами аэродинамического сопротивления трения приведены в таблице 4.5.

Сопротивление, вызванное поворотом, определяется по формуле

$$R_{\text{пов.}} = x_{\text{пов.}} \frac{r}{2 \times g \times S^2},$$

где  $S$  – площадь сечения выработки (воздуховода) за поворотом,  $\text{м}^2$ ;

$g$  – ускорение свободного падения  $g = 9,807 \text{ м/с}^2$ ;

$\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ . Принимается равным  $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$ ;

$\xi_{\text{пов.}}$  – безразмерный коэффициент сопротивления поворота, в сильной степени зависящий от угла поворота, принимаем  $\xi_{\text{пов.}} = 0,6$ .

При 7 поворотах на поверхности до устья ствола (учитывая скругление) общее местное аэродинамическое сопротивление приведено в таблице 4.6.

**Таблица 4.5 – Параметры вентиляционной сети с расчётами**

	ветвь	$L$	$S$	$P$	$a$	$d$	$R$
вентилятор	1 – 2	м	м <sup>2</sup>	м		м	кц
труба металлическая	2 – 3	60	2,0096	5,024	0,00032	1,6	0,011886
труба	3 – 4	2045,5	2,0096	5,024	0,0002	1,6	0,253250
труба	4 – 5	5	2,0096	5,024	0,0002	1,6	0,000619
горная выработка	5 – 6	5	16,2	14,7	0,00205		0,000035
горная выработка	6 – 7	33	16,2	14,7	0,00205		0,000234
горная выработка	7 – 8	248,7	16,2	14,7	0,00205		0,001763
горная выработка	8 – 9	186,1	16,2	14,7	0,00205		0,001319
ствол	9 – 10	66,5	63,585	28,26	0,0586	9	0,000428
горная выработка	8 – 11	75,4	16,2	14,7	0,00205		0,000534
горная выработка	11 – 12	59,2	16,2	14,7	0,00205		0,000420
горная выработка	12 – 13	30	16,2	14,7	0,00205		0,000213
горная выработка	13 – 14	30	16,2	14,7	0,00205		0,000213
ствол	14 – 9	30	63,585	28,26	0,0586	9	0,000193
водоотлив	6 – 7	60	16,2	14,7	0,00205		0,000425
воздуховод	4 – 15	10	16,2	14,7	0,00205		0,000071
ствол	15 – 14	36	63,585	28,26	0,0586	9	0,000232
горная выработка	11 – 13	10	16,2	14,7	0,00205		0,000071

**Таблица 4.6 – Исходные и расчётные значения местных аэродинамических сопротивлений**

№	Наименование ветви	Вид местного сопротивления	Узел	Площадь сечения, м <sup>2</sup>	$\xi_{\text{пов.}}$	$R_{\text{м.с.}}$ , кгж <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>
1	Воздуховод на поверхности	поворот воздуховода на 90°	б.н.	2,0096	0,6	0,009
2	Воздуховод на поверхности	поворот воздуховода на 90°	б.н.	2,0096	0,6	0,009
3	Воздуховод на поверхности	поворот воздуховода на 90°	б.н.	2,0096	0,6	0,009
4	Воздуховод на поверхности	поворот воздуховода на 90°	б.н.	2,0096	0,6	0,009
5	Воздуховод на поверхности	поворот воздуховода на 90°	б.н.	2,0096	0,6	0,009
6	Воздуховод на поверхности	поворот воздуховода на 90°	б.н.	2,0096	0,6	0,009
7	Воздуховод на поверхности	поворот воздуховода на 90°	б.н.	2,0096	0,6	0,009
Общее местное аэродинамическое сопротивление						0,065

На разветвлении воздуховода также теряется часть давления. При разветвлении воздуховода на два под углом  $60^\circ$  безразмерный коэффициент сопротивления  $\xi_{с.с.} = 1,5$ . Сопротивление, появляющееся при входе воздуха в устье горной выработки, при двойном повороте, сопряжении нескольких выработок и т.д., определяется по формуле

$$R_{с.с.} = \chi_{с.с.} \frac{r}{2 \times g \times S_2^2} = 1,5 \frac{1,2}{2 \times 9,81 \times 2,0096^2} = 0,022 \text{ кж.}$$

Далее идет поворот на  $30^\circ$ .

№	Наименование ветви	Вид местного сопротивления	Узел	Площадь сечения, м <sup>2</sup>	$\xi_{пов.}$	$R_{м.с.},$ кЖх <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>
1	Воздуховод на сопряжении	поворот воздуховода на $30^\circ$	б.н.	2,0096	0,156	0,0024

При сужении воздуховода с сечения 2,0096 м<sup>2</sup> на сечение 0,6385 м<sup>2</sup> происходит также потеря энергии. При сужении плавном (по форме струи с углом  $15^\circ$ ) коэффициент сопротивления равен 0,001, а при сужении под  $90^\circ$  с закругленным углом коэффициент сопротивления равен 0,047.

Принимая коэффициент сопротивления равным 0,047, рассчитаем величину дополнительного аэродинамического сопротивления

$$R_{с.с.} = \chi_{с.с.} \frac{r}{2 \times g \times S_2^2} = 0,047 \frac{1,2}{2 \times 9,81 \times 0,6358^2} = 0,007 \text{ кж.}$$

Расчёт общего аэродинамического сопротивления сети производится с учётом простого диагонального соединения (рисунок 4.7), расчётные значения приведены в таблице 4.7. Расчёты выполнены вручную, так как имеет место простое диагональное соединение.

С учетом установки паруса в горной выработке – уклон выдачи просора (отн. отм. -2048,5) (на участке от сопряжения со стволом СКС-1 до ответвления на водоотлив) распределение воздуха, поступающего в количестве  $Q = 30 \text{ м}^3/\text{с}$ , будет следующее:

$$q_1 = 12,9 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (ветвь 8-9);}$$

$$q_2 = 14,2 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (ветвь 8-11-13-14);}$$

$$q_3 = 2,9 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (ветвь 4-15-14).}$$

**Таблица 4.7 – Расчётные данные к определению аэродинамического сопротивления вентиляционной сети**

Последовательное соединение		
$R_{1-2-3-4}$	0,265136	кμ
Параллельное соединение		
$R_{6-7}$	0,0001022	кμ
Последовательное соединение		
$R_{4-5-6-7-8}$	0,1031036	кμ
Последовательное соединение		
$R_{11-12-13}$	0,103941	кμ
Параллельное соединение		
$R_{11-13}$	0,0000885	кμ
Последовательное соединение		
$R_{8-11-13-14}$	0,0010783	кμ
Последовательное соединение		
$R_{5-15-14}$	0,1453024	кμ

С учетом местных сопротивлений общее сопротивление сети будет равно  $R_{\text{общ.}} = 0,272 + 0,65 = 0,337$  кμ.

Дополнительная депрессия, затрачиваемая на преодоление аэродинамического лобового сопротивления, прибавляется к ветвям 4-5-6-7-8 или 8-11-13-14, или 8-9. Согласно результатам моделирования, дополнительная депрессия зависит от скорости движения воздуха и СГО,  $h_{\text{л}}$  находится в диапазоне от 0,1 Па (при скорости движения 1 м/с) до 67 Па (при скорости 22 м/с). Дополнительное аэродинамическое сопротивление в ветви будет в районе 0,001 кμ. Сводные параметры для трех возможных вариантов размещения СГО в вентиляционной сети приведены в таблице 4.8.

Как видно из приведенных расчётов во 2-м варианте произойдет существенное падение расхода воздуха на 2,3 м<sup>3</sup>/с (16 %). Также значительно вырастет депрессия рассматриваемого участка вентиляционной сети с 19 Па до 86 Па (452 %). 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.

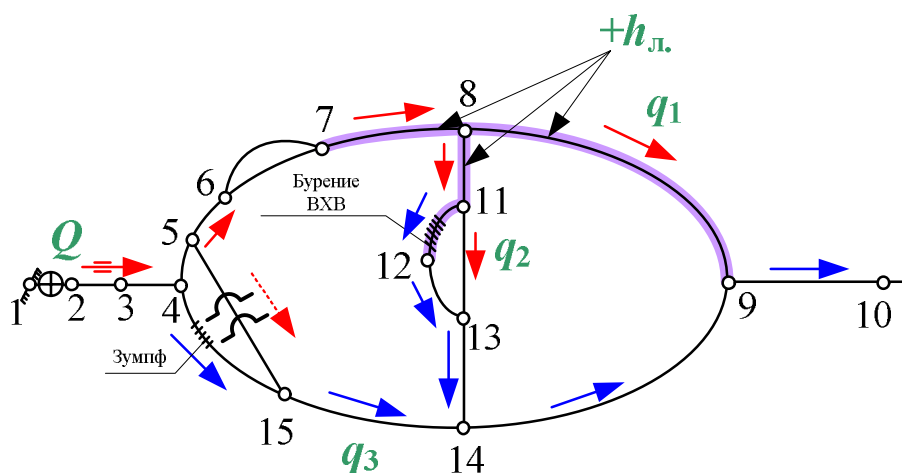


Рисунок 4.7 – Аэродинамическая схема к расчёту добавочной величины депрессии

Таблица 4.8 – Сводные параметры для трех возможных вариантов размещения СГО в вентиляционной сети

Ветвь	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	Аэродинамическое сопротивление трения, кПа	Дополнительное сопротивление, кПа	$\Delta R$ , %	Депрессия, Па	Дополнительная депрессия, обусловленная лобовым сопротивлением, Па	Расход воздуха с учетом лобового сопротивления, м <sup>3</sup> /с
1 вариант: СГО в горной выработке 8-9							
8-9	12,9	0,001319	+0,00107	<b>+81%</b>	2,16	<b>+67</b>	11,0
8-11-13-14	14,2	0,000799	-	-	1,58	-	<b>16,1</b>
4-15-14	2,9	0,190303	-	-	15,08	-	2,9
2 вариант: СГО 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	<b>+134%</b>	1,58	<b>+67</b>	<b>11,9</b>
4-15-14	2,9	0,190303	-	-	15,08	-	3
3 вариант: СГО 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	-	<b>14,1</b>
4-15-14	2,9	0,190303	+0,00107	<b>+1%</b>	15,08	<b>+67</b>	2,9

Для исключения аварийной ситуации, связанной с загазированием, рекомендуется увеличить расход подаваемого воздуха на  $6 \text{ м}^3/\text{с}$  до  $36 \text{ м}^3/\text{с}$ . При данном расходе воздуха и при наличии самоходного горного оборудования расход воздуха в месте бурения ВХВ будет соответствовать расчётному количеству воздуха. Увеличение расхода воздуха на 20 % возможно посредством существующего вентилятора главного проветривания. Данная рекомендация была учтена при проектировании вентиляции, что позволило исключить возникновение аварийной ситуации.

### **Выводы**

Разработана и апробирована методика натурного определения величины лобового аэродинамического сопротивления горных машин при их движении. 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.

Предложена Методика численного моделирования, учитывающая при проектировании вентиляции предприятия величину лобового сопротивления, обусловленную движением самоходного горного оборудования. Она включает в себя подробный порядок действий, в результате которого определяются величины дополнительной депрессии, аэродинамического лобового сопротивления и его коэффициента. Также даны примечания и рекомендации по каждому этапу действий. Разработанная Методика универсальная и может применяться при проектировании вентиляции горных предприятий.

Приведенный пример учета лобового аэродинамического сопротивления для действующего рудника «Скалистый» шахты «Глубокая» подтвердил существенное влияние на распределение воздуха в вентиляционной сети. При заезде ПДМ в одну из горных выработок произойдет падение расхода воздуха на  $2,3 \text{ м}^3/\text{с}$  (на 16 %). Также значительно вырастет депрессия рассматриваемого участка вентиляционной сети с 19 Па

до 86 Па (452 %), что приведет к падению расхода воздуха, поступающего к объектам проветривания. Рекомендации были использованы при расчёте проветривания околоствольного двора при строительстве горных выработок рудника «Скалистый», компанией ООО «Тиссен Майнинг Констракшн Ист»  
Приложение Г.

## 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. Углетхиздат. – 1949. – 444 С.
2. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте. – М.: – Имедж-Сет. – 1995. – 600 С.
3. Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Объемное моделирование как метод исследования и управления термо и аэрогазодинамическими процессами на горных предприятиях / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № S1. – С. 149-156.
4. Кобылкин С.С. Системное проектирование вентиляции горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1. – С. 150-156.
5. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчёта параметров вентиляции шахт на основе объёмного моделирования аэрогазодинамических процессов // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский государственный горный университет. Б. м., 2011
6. Кашибадзе В.В. Аэродинамическое сопротивление горных выработок. М.: - Недра. – 1983. – 151 С.
7. Машковец И.Л. Проветривание горных выработок. УДН им. Патриса Лумумбы. – М.: – 1978. – 256 С.
8. 1 Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт, утвержденное Минуглепром СССР от 15.08.1989 года
9. Бурчаков А.С., Мустель П.И., Ушаков К.З., Рудничная аэрология. Изд. 2, перераб. и доп. М.: - Недра. – 1971. – 376 С.
10. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. Рудничная аэрология. Изд. 2, перераб. и доп. М.: - Недра. – 1978. – 440 С.
11. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий. Учебник для вузов. Изд. 3, перераб. и доп. М.: - Недра. – 1987. – 421 С.

12. Комаров В.Б., Борисов Д.Ф. Рудничная вентиляция. ГОНТИ НКТП СССР. Ленинград-Москва: 1938. – 454 С.
13. Кашибадзе В.В. Исследование аэродинамического сопротивления механизированных горных выработок. Грузинский политехнический институт им. В.И. Ленине. Тбилиси. – 1965. – 175 С.
14. Чечотт Г.О. К вопросу о проектировании вентиляции рудников. Тип. Товариществава А.Ф. Марксъ. – СПб. – 1908. – 223 С.
15. Протодяконов М.М. Проветривание рудников. ГНТИ. Ленинград-Москва: 1931. – 199 С.
16. Веденяпин А. Курс отопления и вентиляции для Николаевской инженерной академии. Часть I. Изд. 2-е, испр. Типография А. Пороховщикова. – СПб. – 1899. – 411 С.
17. Абрамович Г. Н. Аэродинамика местных сопротивлений. Труды ЦАГИ, выпуск 211, 1935 г.
18. Абрамов Ф. А. Определение коэффициентов сопротивления поворотов рудничных выработок. Рукопись, фонд библиотеки ДГИ, 1942 г.
19. Харев А. А. Методы подсчета местных вентиляционных сопротивлений в шахтных сетях и способы снижения их. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, МГИ, Москва, 1949 г.
20. Харев А. А.: Местные аэродинамические сопротивления шахтных вентиляционных сетей / Москва, Углетехиздат, 1954 г.
21. Идельчик И. Е. Аэродинамика потока и потери напора в диффузорах. Промышленная аэродинамика, сборник №3, 1947 г.
22. Кашибадзе В. В.: Исследование аэродинамического сопротивления горных выработок, диссертация/ Грузинский Политехнический Институт им. В. И. Ленина, Тбилиси, 1965 г.
23. Кашибадзе В. В.: Исследование аэродинамического сопротивления лав и выработок, оборудованных ленточными транспортами. Тбилиси, 1961 г.

24. Кашибадзе В. В.: Исследование коэффициента аэродинамического сопротивления «Альфа» / «Уголь» №II, 1959 г.
25. Чухонцев Н. Ф.: Вентиляционное сопротивление горных выработок, оборудованных конвейерами. Труды Новочеркасского Ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. Серго Орджоникидзе, Том 103, 1959 г.
26. Ксенофонтова А. И., Карпухин В. Д., Харев А. А. Вентиляционные сопротивления горных выработок / Москва, Углетехиздат, 1950 г.
27. Газизуллин Р. Р., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Влияние местных сопротивлений на воздухораспределение в рудниках при реверсивном режиме работы главной вентиляторной установки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №5. – С. 227–230.
28. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Стукалов В. А. Моделирование аэродинамических сопротивлений сопряжений горных выработок // Горный журнал. – 2009. – № 12. – С. 56–58.
29. Левин Л. Ю., Семин М. А., Газизуллин Р. Р. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5 – С. 93–102.
30. Веденеева Л. М. Исследование аэродинамических процессов в местных сопротивлениях и их влияния на воздухораспределение в вентиляционных сетях с большим эквивалентным отверстием: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Пермь, 1995. – 17 с.
31. Семин М. А. Обоснование параметров систем вентиляции рудников в реверсивных режимах проветривания: дисс. канд. техн. наук. – Пермь, 2016. – 151 с.
32. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Определение перепада давления на сопряжении вентиляционного ствола и канала ГВУ // Горный

- информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №S7. С. 93-104
33. Кобылкин С.С., Ушаков В.К., Кузнецов И.И. Анализ влияния местных сопротивлений горных выработок на общешахтное аэродинамическое сопротивление / Горная промышленность. – 2024. – №2. – С. 93-96. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-93-96>
34. Кобылкин С.С., Каледин О.С., Кобылкин А.С., Дядин С.А. Оценка влияния местных сопротивлений на общее аэродинамическое сопротивление воздухопроводов. В кн.: Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: материалы Международной науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию горного факультета, г. Санкт-Петербург, 28-29 окт. 2015 г. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2015. С. 91-92.
35. 2 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», утвержденные приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 г. № 507 (ред. от 23.06.2022).
36. 3 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утвержденные приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505
- Машковец И.Л., Балыхин Г.А. Аэрология и охрана труда на шахтах и в карьерах: Учеб. Пособие. – М.: Изд. УДН, 1986. – 312 С.
37. Харев А.А. Рудничная вентиляция и борьба с подземными пожарами: Учебник для техникумов. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Недра. – 1985. – 248 С.
38. Мустель П.И. Вентиляция шахт. Учебное пособие Metallurgizdat. М.: - 1957. – 222 С.
39. Скочинский А.А., Ксенофонтова А.И., Харев А.А., Идельчик И.Е. Аэродинамическое сопротивление шахтных стволов и способы его снижения. Углетехиздат. – 1953. – 222 С.

40. Рудничная вентиляция: Справочник / Н.Ф. Гращенков, А.Э. Петросян, А.М. Фролов и др.; под редакцией К.З. Ушакова. – 2-е изд. Переработанное и дополненное. – М.: Недра. – 1988. – 440 С.
41. Кобылкин С. С., Федоров Д.А., Кузнецов И.Л. Обновленная классификация аэродинамических сопротивлений горных предприятий // Горная промышленность. – 2025. – №4. – С. 92-96.
42. Кобылкин С.С., Кузнецов И.И., Федоров Д.А., Кобылкин А.С. Оценка влияния местных и лобовых аэродинамических сопротивлений на воздухораспределение в вентиляционной сети // 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.
43. Лукашов О.Ю., Костромин Д.А. Об оптимизации расчетов параметров распространения воздушных ударных волн в местах изменения геометрии выработок угольных шахт. Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2021;19(1):93-103.  
<https://doi.org/10.25205/1818-7900-2021-19-1-93-103>
44. Гендлер С. Г., Романченко С. Б., Тимченко А. Н., Костеренко В. Н. Экспериментальные и теоретические исследования динамики взрывоопасных рудничных аэрозолей. / //Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, Т 1, 2016. С 44 - 44.
45. Ватолин А.К. Пути снижения лобового сопротивления большегрузных автомобилей на основе исследований моделей в аэродинамических трубах // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Казань, 1983
46. Мартынюк Н.П., Мартынюк Е.Н., Шкилев В.Д., Белоусов Ю.В. Устройство уменьшения аэродинамического лобового сопротивления при движении автомобиля // Патент на изобретение RU 2449913 С2, 10.05.2012. Заявка № 2010110460/11 от 22.03.2010.

47. Маслов Г.П., Шерстюк М.А. Снижение аэродинамического лобового сопротивления локомотива // В сборнике: Новые технологии - железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств. Сборник научных статей с международным участием (в 4 частях). Под редакцией Галиева И.И., Омск, 2000. С. 55-57.
48. Николаев Ф.Н. Аэродинамика и динамика полета транспортных самолетов: Учеб. Для вузов. – М.: Транспорт – 1990. – с. 392.
49. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля // Издательство МГИУ. – 2010. – 356 С. – ISBN: 978-5-2760-1707-5
50. Федоров Д.А., Кобылкин С.С. Порядок определения и учета лобовых аэродинамических сопротивлений при проветривании вентиляции шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – СВ № 8. – С. 19.
51. Федоров Д. А. Влияние лобовых аэродинамических сопротивлений на безопасность горных предприятий // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 68–75. EDN YVGFEA
52. 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.
53. 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

54. Jade R. K., Sastry B. S. An experimental and numerical study of two-way splits and junctions in mine airways. 12th North American/U.S. Mine Ventilation Symposium, Reno, NV, USA. 2008, pp. 293–298.
55. Liversage, P., and Trancossi, M. (2018). "Analysis of triangular sharkskin profiles according to second law", *Modelling, Measurement and Control B*. 87(3), 188-196.
56. William R. Kennedy Practical mine ventilation. *Engineering-Handbooks // Primedia*. – 1999. – pp. 47-48. – ISBN 0-929531-50-7
57. Howard L. Hartman Mine Ventilation and air conditioning. Second edition // *Krieger*. – 1999. – pp. 153-159.
58. McPherson M.J. *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering // Springer Science & Business Media*. – 2012. – p. 915
59. Pan Y., Tukkaraja P., Sridharan S. J. Investigation of gas and airflow distribution in a block cave mine. *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2022. – vol. 39. – № 5. – pp. 1-12.
60. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Домрачев А.Н., Лукашов О.Ю. Программа расчёта вентиляции выемочных участков // *Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2016. № 3. С. 445-448.
61. Кормщиков Д.С. Модернизация программы Аэросеть в связи с новыми требованиями к проведению инженерных расчетов для горноспасательных работ // *Горное эхо*. 2019. № 4 (77). С. 111-117.
62. Попов М.Д., Кормщиков Д.С., Семин М.А., Левин Л.Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе "Аэросеть" // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 10. С. 24-32.
63. Захаров Е.А., Кормщиков Д.С., Князев Н.А. Алгоритм расчёта устойчивости проветривания по фактору тепловой депрессии для больших вентиляционных сетей в АК "Аэросеть" // *Горное эхо*. 2024. № 4 (97). С. 77-81.

64. Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Шалимов А.В., Зайцев А.В., Семин М.А. Методы математического моделирования рудничных аэрологических процессов и их численная реализация в аналитическом комплексе "АЭРОСЕТЬ" // Пермь, 2021. – 375 С.
65. Левин Л.Ю., Мальцев С.В., Семин М.А., Колесов Е.В. Расчет аэродинамического сопротивления проектируемых шахтных стволов с использованием методов вычислительной гидродинамики // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2025. № 5. С. 100-117.
66. Мальцев С.В., Семин М.А., Кормщиков Д.С. Метод определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов медно-никелевых рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 6. С. 170-178.
67. Левин Л.Ю., Семин М.А. Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 2. С. 120-130.
68. Семин М.А., Файнбург Г.З. История открытия и применения квадратичного закона сопротивления в рудничной аэрологии // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2025. № 3. С. 25-32.
69. Семин М. А., Бублик С. А., Зайцев А. В., Мальцев С. В. Оценка аэродинамического влияния движущейся клетки на работу главного вентилятора // Горный журнал. 2023. № 11. С. 64-69.
70. Maltsev S. V., Semin M. A., Kormshchikov D. S. A method to determine aerodynamic drag coefficient in copper–nickel mine shafts. Journal of Mining Science. 2020. No. 6. pp. 170–178.
71. Семин М.А., Мальцев С.В., Колесов Е.В. исследование влияния аэродинамических процессов в шахтном стволе с канатной армировкой на колебания движущегося скипа // Недропользование. 2022. Т. 22. № 4. С. 192-200

72. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Расчет местных аэродинамических сопротивлений в моделях вентиляционных сетей шахт и рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 3. С. 265-278.
73. Semin M.A., Levin L.Y. Stability of air flows in mine ventilation networks // Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B. 2019. Т. 124. С. 167-171.
74. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Семин М.А. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 283-291.
75. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчёты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». – 2007. 432 С.
76. Мохирев Н.Н., Захарова Л.А. Исследование поршневого эффекта движущегося в выработке транспорта // Горное эхо. Вестник ГИ УрО РАН. – 1998. - №2 – с. 9-10
77. Мохирев Н.Н., Захарова Л.А. Теоретические основы расчёта потока воздуха, создаваемого движущимся в воздухе предметом // Сб. науч. Тр. «Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений» / Перм. Гос. Техн. Ун-т. – Пермь. – 1997. – С. 101-109
78. Гендлер С.Г., Синявина С.В. Особенности управления вентиляционным режимом нового байкальского железнодорожного тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 11. С. 173-179.
79. Гендлер С.Г., Кастанеда В.Н., Белен А.Г. Управление естественными вентиляционными потоками в транспортных тоннелях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 4. С. 138-149.

80. Гендлер С.Г. Проблемы проветривания транспортных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № S2. С. 282-295
81. Гендлер С.Г., Стомма А.А. Методика выбора параметров схемы проветривания протяжённой тупиковой выработки, использующей вентиляционный став с разрывом // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2025. № 31. С. 97-104
82. Ansys 14.5 Documentation. – Houston: Swanson Analysis Systems, Inc. – 2016.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По планам горных работ с учетом транспортной схемы необходимо заранее определить участки с достаточной протяженностью (более 100 м).
2. Оценить по вентиляционным планам скорости движения воздуха и выбрать участки со скоростью движения воздуха более 1 м/с (или по скорости, рассчитанной по формуле  $v_v \geq 0,375 \cdot P / S$ ).
3. Прийти на выбранный участок и обговорить порядок нахождения на нем СГО в процессе измерений.
4. На первом этапе без СГО на участке:
  - 4.1. установить микроанометр (ММН-2400 или МБГО-2) в центре выбранного участка и подготовить его к работе;
  - 4.2. проложить шланги в обе стороны от микроанометра (ММН-2400 или МБГО-2);
  - 4.3. подготовить приборы для измерения абсолютного давления (МБГО-2, барометр), влажности и температуры (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);
  - 4.4. измерить периметр, длину, ширину и другие размеры для вычисления площади сечения горной выработки (рулеткой или лазерной рулеткой);
  - 4.5. измерить абсолютное давление (МБГО-2, барометр), влажность и температуру (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);
  - 4.6. измерить среднюю скорость движения воздуха способом обвода в сечении (анемометр АПР-2);
  - 4.7. измерить перепад давления (депрессию) экспериментального участка (ММН-2400 или МБГО-2);
  - 4.8. заполнить Форму измерений №1.

5. На втором этапе с СГО на участке без его движения (с 5.1 по 5.4 действия уже выполнены при реализации пунктов 4.1-4.4 первого этапа, значения можно продублировать):
  - 5.1. установить микроанометр (ММН-2400 или МБГО-2) и подготовить его к работе в центре выбранного участка;
  - 5.2. проложить шланги в обе стороны от микроанометра (ММН-2400 или МБГО-2);
  - 5.3. подготовить приборы для измерения абсолютного давления (МБГО-2, барометр), влажности и температуры (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);
  - 5.4. измерить периметр, длину, ширину и другие размеры для вычисления площади сечения горной выработки (рулеткой или лазерной рулеткой);
  - 5.5. измерить абсолютное давление (МБГО-2, барометр), влажность и температуру (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);
  - 5.6. записать тип и марку СГО;
  - 5.7. измерить среднюю скорость движения воздуха способом обвода в сечении (анемометр АПР-2);
  - 5.8. измерить перепад давления (депрессию) экспериментального участка (ММН-2400 или МБГО-2);
  - 5.9. заполнить Форму измерений №2.
6. На третьем этапе с СГО, движущейся в противоположном направлении относительно направления движения воздушной струи (с 6.1 по 6.4 действия уже выполнены при реализации пунктов 4.1-4.4 первого этапа, значения можно продублировать):
  - 6.1. установить микроанометр (ММН-2400 или МБГО-2) и подготовить его к работе в центре выбранного участка;
  - 6.2. проложить шланги в обе стороны от микроанометра (ММН-2400 или МБГО-2);

- 6.3. подготовить приборы для измерения абсолютного давления (МБГО-2, барометр), влажности и температуры (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);
  - 6.4. измерить периметр, длину, ширину и другие размеры для вычисления площади сечения горной выработки (рулеткой или лазерной рулеткой);
  - 6.5. измерить абсолютное давление (МБГО-2, барометр), влажность и температуру (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);
  - 6.6. записать тип и марку СГО;
  - 6.7. измерить среднюю скорость движения воздуха способом обвода в сечении или точечным способом (анемометр АПР-2);
  - 6.8. измерить скорость движения воздуха в одной точке (около микроманометра) и высчитать коэффициент для пересчета показаний из одной точки в среднюю скорость по сечению;
  - 6.9. измерить перепад давления (депрессию) экспериментального участка (ММН-2400 или МБГО-2);
  - 6.10. дать команду на движение СГО (по рации или подать любой заранее обговоренный условный сигнал). Водитель перед началом движения должен подать звуковой сигнал (три коротких гудка);
  - 6.11. водитель должен придерживаться одной, обговоренной заранее, скорости движения СГО;
  - 6.12. каждые 30 с проводить измерения скорости движения воздуха в контрольной точке (анемометр АПР-2) и депрессии (ММН-2400 или МБГО-2);
  - 6.13. заполнить Форму измерений №3.
7. На четвертом этапе с СГО, движущейся в попутном направлении с воздушной струей (с 7.1 по 7.4 действия уже выполнены при реализации пунктов 4.1-4.4 первого этапа, значения можно продублировать):
- 7.1. установить микроманометр (ММН-2400 или МБГО-2) и подготовить его к работе в центре выбранного участка;

- 7.2. проложить шланги в обе стороны от микроманометра (ММН-2400 или МБГО-2);
- 7.3. подготовить приборы для измерения абсолютного давления (МБГО-2, барометр), влажности и температуры (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);
- 7.4. измерить периметр, длину, ширину и другие размеры для вычисления площади сечения горной выработки (рулеткой или лазерной рулеткой);
- 7.5. измерить абсолютное давление (МБГО-2, барометр), влажность и температуру (психрометр Ассмана или ТГО-2МП);
- 7.6. записать тип и марку СГО;
- 7.7. измерить среднюю скорость движения воздуха способом обвода в сечении или точечным способом (анемометр АПР-2);
- 7.8. измерить скорость движения воздуха в одной точке (около микроманометра) и высчитать коэффициент для пересчета показаний из одной точки в среднюю скорость по сечению;
- 7.9. измерить перепад давления (депрессию) экспериментального участка (ММН-2400 или МБГО-2);
- 7.10. дать команду на движение СГО (по рации или подать любой заранее обговоренный условный сигнал). Водитель перед началом движения должен подать звуковой сигнал (три коротких гудка);
- 7.11. водитель должен придерживаться одной обговоренной заранее скорости движения СГО;
- 7.12. каждые 30 с проводить измерения скорости движения воздуха в контрольной точке (анемометр АПР-2) и депрессии (ММН-2400 или МБГО-2);
- 7.13. заполнить Форму измерений №4.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б ФОРМЫ ИЗМЕРЕНИЙ К МЕТОДИКЕ ПО  
ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИНЫ ЛОБОВОГО  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ**

**Форма измерений №1  
без самоходной горной техники**

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения
1	скорость движения воздуха средняя по сечению	$v_{в.ср.}$		м/с
	скорость движения воздуха в контрольной точке	$v_{в.к.т.}$		м/с
2	температура воздуха	$T$		°С
3	относительная влажность воздуха	$W$		%
4	абсолютное атмосферное давление	$p$		Па
5	перепад давления (депрессия)	$h$		Па
6	периметр горной выработки	$P$		м
7	площадь сечения горной выработки	$S$		м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—		—

		Эскиз
Площадь сечения горной выработки и машины		
Горная выработка		

**Форма измерений №2**  
**с самоходной машиной без движения**

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения
1	скорость движения воздуха	$v_{в.}$		м/с
2	температура воздуха	$T$		°С
3	относительная влажность воздуха	$W$		%
4	абсолютное атмосферное давление	$p$		Па
5	перепад давления (депрессия)	$h$		Па
6	периметр горной выработки	$P$		м
7	площадь сечения горной выработки	$S$		м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—		—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—		—
10	марка машины	—		—
11	скорость движения машины	$v_{м}$		км/ч

		Эскиз
Площадь сечения горной выработки и машины		
Горная выработка		

**Форма измерений №3**  
**с самоходной машиной, движущейся в том же направлении, что и воздух**  
**в горной выработке**

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения																					
1	скорость движения воздуха в сечении (определяется методом обвода в сечении) без СГО в горной выработке	$v_{в.ср.}$		м/с																					
	скорость движения воздуха в контрольной точке без СГО в горной выработке	$v_{в.т.}$		м/с																					
	скорость движения воздуха в контрольной точке при движущемся СГО	$v_{в.т.ср.}$		м/с																					
	<table border="1"> <tr> <td align="center">Старт движения</td> <td align="center">Через 30 секунд</td> <td align="center">Через 60 секунд</td> <td align="center">Через 90 секунд</td> <td align="center">Через 120 секунд</td> <td align="center">Через 150 секунд</td> <td align="center">Через 180 секунд</td> <td align="center">Через 210 секунд</td> <td align="center">Через 240 секунд</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд															
Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд																	

2	перепад давления (депрессия)					$h_{ср.}$	Па		
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд

3	температура воздуха	$T$		$^{\circ}C$
4	относительная влажность воздуха	$W$		%
5	абсолютное атмосферное давление	$p$		Па
6	периметр горной выработки	$P$		м
7	площадь сечения горной выработки	$S$		м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—		—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—		—
10	марка машины	—		—

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка	

**Форма измерений №4**  
**с самоходной машиной, движущейся в противоположном направлении**  
**относительно движения воздуха в горной выработке**

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения				
1	скорость движения воздуха в сечении (определяется методом обвода в сечении) без СГО в горной выработке	$V_{в.ср.}$		м/с				
	скорость движения воздуха в контрольной точке без СГО в горной выработке	$V_{в.т.}$		м/с				
	скорость движения воздуха в контрольной точке при движущемся СГО	$V_{в.т.ср.}$		м/с				
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд

2	перепад давления (депрессия)	$h_{ср.}$	Па						
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд

3	температура воздуха	$T$		$^{\circ}C$
4	относительная влажность воздуха	$W$		%
5	абсолютное атмосферное давление	$p$		Па
6	периметр горной выработки	$P$		м
7	площадь сечения горной выработки	$S$		$м^2$
8	форма горной выработки	—		—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—		—
10	марка машины	—		—


Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка	

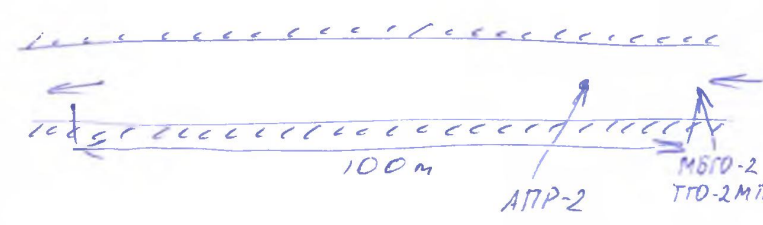
## ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты натурных исследований шахте Шерегешская

### Протокол измерений №1 без самоходной горной техники


Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
АО «Евраз ЗСМК»	Горизонт +10м.	14.04.2025г.
Шахта Шерегешская	Транспортный штрек	11г 30м

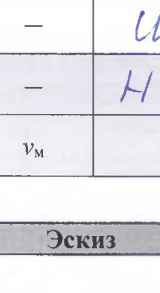

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения
1	скорость движения воздуха средняя по сечению	$v_{в.ср.}$	1,45	м/с
	скорость движения воздуха в контрольной точке	$v_{в.к.т.}$	1,5	м/с
2	температура воздуха	$T$	13,7	°C
3	относительная влажность воздуха	$W$	81,6	%
4	абсолютное атмосферное давление	$p$	100700	Па
5	перепад давления (депрессия)	$h$	3-4	Па
6	периметр горной выработки	$P$	21,5	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	31,3	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—		—

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка	

**Протокол измерений №2**  
с самоходной машиной без движения

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
АО «Евраз ЗСМК»	Горизонт +10м.	14.04.2025г.
Шахта Шерегешская	Транспортный штрек	

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения
1	скорость движения воздуха	$v_{в.}$	1,53	м/с
2	температура воздуха	$T$	13,7	°C
3	относительная влажность воздуха	$W$	84,3	%
4	абсолютное атмосферное давление	$p$	100700	Па
5	перепад давления (депрессия)	$h$	16	Па
6	периметр горной выработки	$P$	21,5	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	31,3	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—		—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	ШАС	—
10	марка машины	—	НУУК-30	—
11	скорость движения машины	$v_{м.}$	5	км/ч

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка	

**Протокол измерений №3**  
с самоходной машиной, движущейся в том же направлении, что и воздух  
в горной выработке

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
АО «Евраз ЗСМК»	Горизонт +10м.	14.04.2025г.
Шахта Шерегешская	Транспортный штрек	

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения																			
1	скорость движения воздуха в сечении (определяется методом обвода в сечении) без СГО в горной выработке	$v_{в.ср.}$	1,45	м/с																			
	скорость движения воздуха в контрольной точке без СГО в горной выработке	$v_{в.т.}$	1,5	м/с																			
	скорость движения воздуха в контрольной точке при движущемся СГО	$v_{в.т.ср.}$	1,53	м/с																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Старт движения</th> <th>Через 30 секунд</th> <th>Через 60 секунд</th> <th>Через 90 секунд</th> <th>Через 120 секунд</th> <th>Через 150 секунд</th> <th>Через 180 секунд</th> <th>Через 210 секунд</th> <th>Через 240 секунд</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,46</td> <td>1,53</td> <td>1,57</td> <td>1,55</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table>	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд	1,46	1,53	1,57	1,55	—	—	—	—	—				
Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд															
1,46	1,53	1,57	1,55	—	—	—	—	—															
2	перепад давления (депрессия)	$h_{ср.}$	25	Па																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Старт движения</th> <th>Через 30 секунд</th> <th>Через 60 секунд</th> <th>Через 90 секунд</th> <th>Через 120 секунд</th> <th>Через 150 секунд</th> <th>Через 180 секунд</th> <th>Через 210 секунд</th> <th>Через 240 секунд</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>27</td> <td>22</td> <td>7</td> <td>5</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table>	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд	27	22	7	5	—	—	—	—	—				
Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд															
27	22	7	5	—	—	—	—	—															
3	температура воздуха	$T$	13,8	°C																			
4	относительная влажность воздуха	$W$	85,1	%																			
5	абсолютное атмосферное давление	$p$	100710	Па																			
6	периметр горной выработки	$P$	21,5	м																			
7	площадь сечения горной выработки	$S$	31,3	м <sup>2</sup>																			
8	форма горной выработки	—	□	—																			
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	ШАС	—																			
10	марка машины	—	МУУК - 30	—																			

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	<p>скорость движения ШАС - 5 км/ч</p>
Горная выработка	

**Протокол измерений №4**  
с самоходной машиной, движущейся в противоположном направлении относительно движения воздуха в горной выработке

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
АО «Евраз ЗСМК»	Горизонт +10м.	14.04.2025г.
Шахта Шерегешская	Транспортный штрек	

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения					
1	скорость движения воздуха в сечении (определяется методом обвода в сечении) без СГО в горной выработке	$v_{в.ср.}$	1,46	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке без СГО в горной выработке	$v_{в.т.}$	1,5	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке при движущемся СГО	$v_{в.т.ср.}$	1,42	м/с					
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд
	1,53	1,49	1,46	1,45	1,43	—	—	—	—

2	перепад давления (депрессия)					$h_{ср.}$	Па		
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд
	5	6	22	25	23	—	—	—	—

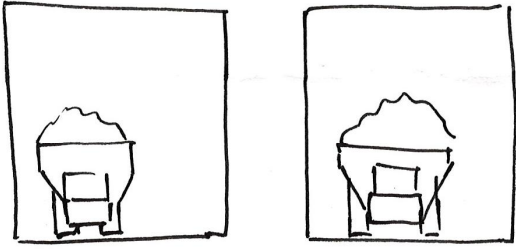
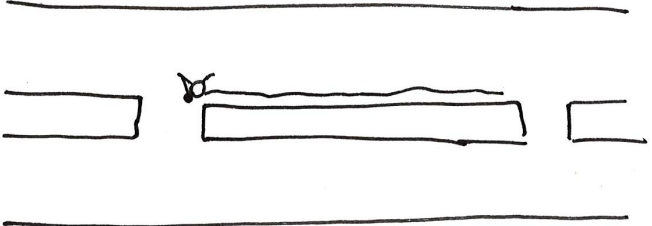
3	температура воздуха	$T$	13,9	°C
4	относительная влажность воздуха	$W$	86,4	%
5	абсолютное атмосферное давление	$p$	100710	Па
6	периметр горной выработки	$P$	22,2	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	33,4	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	□	—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	ШАС	—
10	марка машины	—	МУУК-30	—

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	Скорость движения ШАС - 5 км/ч
Горная выработка	

**Протокол измерений №1**  
без самоходной горной техники

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
Рудник (шахта)	1 восточный квершлаг	02.04.2025
ООО «КНАУФ ГИПС Новомосковск»	2 восточной квершлаг	02.04.2025

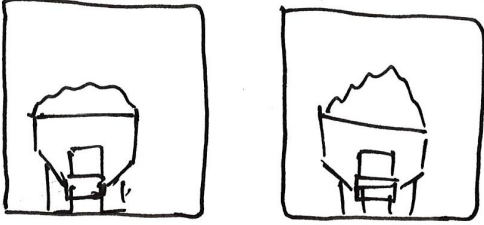
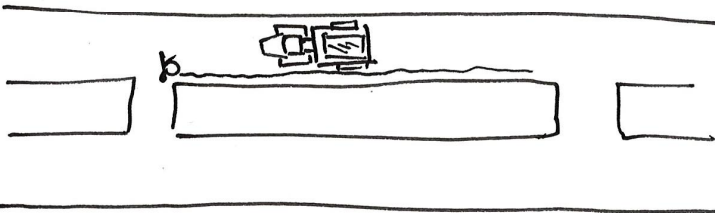
№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения
1	скорость движения воздуха средняя по сечению	$v_{в.ср.}$	1,65	м/с
	скорость движения воздуха в контрольной точке	$v_{в.к.т.}$	1,48	м/с
2	температура воздуха	$T$	13,4	°С
3	относительная влажность воздуха	$W$	204	%
4	абсолютное атмосферное давление	$p$	99980	Па
5	перепад давления (депрессия)	$h$	0-2	Па
6	периметр горной выработки	$P$	32	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	62	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	прямоугольник	—

	Эскиз
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка	<p>В-катушка</p> 

**Протокол измерений №2**  
с самоходной машиной без движения

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
Рудник (шахта)	1 восточный квершлаг	02.04.2025
ООО "КНАУФ ГИПС Ново-Московск"	2 восточный квершлаг	02.04.2025

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения
1	скорость движения воздуха	$v_v$	1,84	м/с
2	температура воздуха	$T$	13,8	°C
3	относительная влажность воздуха	$W$	26,5	%
4	абсолютное атмосферное давление	$p$	100,150	Па
5	перепад давления (депрессия)	$h$	0 - 4	Па
6	периметр горной выработки	$P$	32	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	62	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	прямоугольник	—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	ШАС	—
10	марка машины	—	Volvo A40G	—
11	скорость движения машины	$v_m$	10	км/ч

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка Б-катушка	

### Протокол измерений №3

с самоходной машиной, движущейся в том же направлении, что и воздух в горной выработке

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
Рудник (шахта) ООО «КНАУФ ГИПЕ Новомосковский»	1 восточный квершлаг 2 восточный квершлаг	02.04.2025 02.04.2025

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения					
1	скорость движения воздуха в сечении (определяется методом обвода в сечении) без СГО в горной выработке	$V_{в.ср.}$	1,65	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке без СГО в горной выработке	$V_{в.т.}$	1,48	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке при движущемся СГО	$V_{в.т.ср.}$	1,52	м/с					
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд
	1,52	1,49	1,50	1,48					

2	перепад давления (депрессия)					$h_{ср.}$	0 - 2			Па
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд	
	11	4	0	0						

3	температура воздуха	$T$	13,8	°C
4	относительная влажность воздуха	$W$	26,4	%
5	абсолютное атмосферное давление	$p$	100,100	Па
6	периметр горной выработки	$P$	32	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	62	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	прямоугольник	—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	ШАС	—
10	марка машины	—	Volvo A40G	—

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка В-катушка	

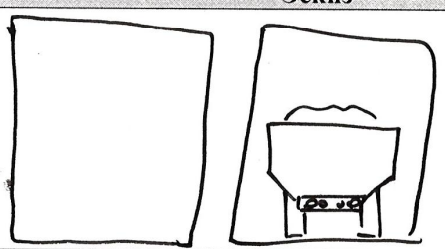
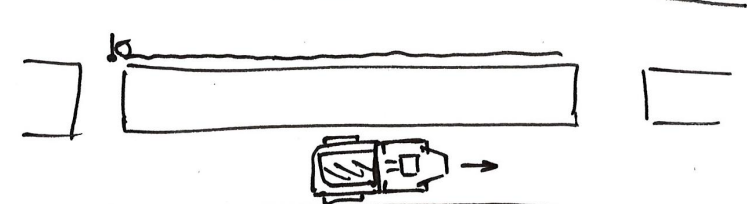
**Протокол измерений №4**  
с самоходной машиной, движущейся в противоположном направлении  
относительно движения воздуха в горной выработке

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
Рудник (шахта) ООО "КНДУФ ГИИС Новомосковский"	1 восточный квершлаг 2 восточный квершлаг	02.04.2025 02.04.2025

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения					
1	скорость движения воздуха в сечении (определяется методом обвода в сечении) без СГО в горной выработке	$V_{в.ср.}$	1,65	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке без СГО в горной выработке	$V_{в.т.}$	1,48	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке при движущемся СГО	$V_{в.т.ср.}$	1,56	м/с					
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд
	1,48	1,56	1,43	1,46					

2	перепад давления (депрессия)	$h_{ср.}$	0 - 2	Па					
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд
	14	5	0-2	0					

3	температура воздуха	$T$	13,8	°C
4	относительная влажность воздуха	$W$	26,4	%
5	абсолютное атмосферное давление	$p$	100,100	Па
6	периметр горной выработки	$P$	32	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	62	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	прямоугольник	—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	ШАС	—
10	марка машины	—	Volvo A40G	—

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка	

## Результаты натурных исследований руднике Узельгинский

### Протокол измерений №1 без самоходной горной техники

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
Рудник "Узельгинский" АО "Чайнинский ГОК"	Транспортный наклонный съезд (бездь 1765)	15.04.2025

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения
1	скорость движения воздуха средняя по сечению	$v_{в.ср.}$	3,20	м/с
	скорость движения воздуха в контрольной точке	$v_{в.к.т.}$	3,22	м/с
2	температура воздуха	$T$	12,6	°C
3	относительная влажность воздуха	$W$	60	%
4	абсолютное атмосферное давление	$p$	96,62	Па
5	перепад давления (депрессия)	$h$	4-12	Па
6	периметр горной выработки	$P$	15,4	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	16,6	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	г/ка	—

	Эскиз
Площадь сечения горной выработки и машины	
Горная выработка	

**Протокол измерений №2**  
**с самоходной машиной без движения**

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
Фирма "Узловинский" АО "Узловинский ГОК"	Прокладочный наклонный ствол (б/н/б 1765)	15.04.2025

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения
1	скорость движения воздуха	$v_{в.}$	3,34	м/с
2	температура воздуха	$T$	12,6	°C
3	относительная влажность воздуха	$W$	60,0	%
4	абсолютное атмосферное давление	$P$	98,56	Па
5	перепад давления (депрессия)	$h$	6-8	Па
6	периметр горной выработки	$P$	15,4	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	16,6	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	ква	—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	Тн 368	—
10	марка машины	—	Чукава МОН	—
11	скорость движения машины	$v_{м.}$	0,0	км/ч

	Эскиз
Площадь сечения горной выработки и машины	<p><math>P = 15,4 \text{ м}</math> <math>S = 16,6 \text{ м}^2</math> <math>S_{\text{м}} =</math></p>
Горная выработка	<p>срез 2 <math>v = 3,34 \text{ м/с}</math></p> <p>срез 1</p> <p>МОН</p> <p>Прокладочный н/с</p> <p>4,6</p> <p>4,6</p> <p>40°</p> <p>н/с 0,140</p> <p>н/с</p>

**Протокол измерений №3**  
**с самоходной машиной, движущейся в том же направлении, что и воздух**  
**в горной выработке**

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
Угольщик "Узельчинский" АО "Узельчинский ГОК"	Транзитный наклонный ствол (берг 1865)	15.04.2015

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения					
1	скорость движения воздуха в сечении (определяется методом обвода в сечении) без СГО в горной выработке	$v_{в.ср.}$	3,20	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке без СГО в горной выработке	$v_{в.т.}$	3,22	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке при движущемся СГО	$v_{в.т.ср.}$	3,56	м/с					
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд

2	перепад давления (депрессия)					$h_{ср.}$	12 - 18				Па
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд		

3	температура воздуха	$T$	12,6	°C
4	относительная влажность воздуха	$W$	60,0	%
5	абсолютное атмосферное давление	$p$	96,62	Па
6	периметр горной выработки	$P$	154	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	16,6	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	арка	—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	пдм ТН 362	—
10	марка машины	—	узловый	—

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	<p><math>P = 154 \text{ м}</math>  <math>S = 16,6 \text{ м}^2</math>  <math>S_m = 8,6 \text{ м}^2</math></p>
Горная выработка	<p>ТН 362</p>

**Протокол измерений №4**  
**с самоходной машиной, движущейся в противоположном направлении**  
**относительно движения воздуха в горной выработке**

Наименование горного предприятия	Название горной выработки	Дата проведения эксперимента
Горное предприятие "Узельинский ГОК"	Транспортный наклонный штрек (вент. 1765)	15.04.2015

№	Параметр в месте проведения эксперимента	Символ	Значение	Единицы измерения					
1	скорость движения воздуха в сечении (определяется методом обвода в сечении) без СГО в горной выработке	$v_{в.ср.}$	3,20	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке без СГО в горной выработке	$v_{в.т.}$	3,22	м/с					
	скорость движения воздуха в контрольной точке при движущемся СГО	$v_{в.т.ср.}$	3,49	м/с					
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд

2	перепад давления (депрессия)					$h_{ср.}$	Па			
	Старт движения	Через 30 секунд	Через 60 секунд	Через 90 секунд	Через 120 секунд	Через 150 секунд	Через 180 секунд	Через 210 секунд	Через 240 секунд	
						30-42				

3	температура воздуха	$T$	12,6	°C
4	относительная влажность воздуха	$W$	60,0	%
5	абсолютное атмосферное давление	$p$	96,62	Па
6	периметр горной выработки	$P$	15,4	м
7	площадь сечения горной выработки	$S$	16,6	м <sup>2</sup>
8	форма горной выработки	—	прямо	—
9	тип машины (ПДМ, буровая, ШАС и т.п.)	—	ПДМ шибрал	—
10	марка машины	—	ТН 202	—

Эскиз	
Площадь сечения горной выработки и машины	<p><math>P = 15,4 \text{ м}</math>  <math>S = 16,6 \text{ м}^2</math>  <math>S_n = 86 \text{ м}^2</math></p>
Горная выработка	

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г. СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ



Обособленное подразделение Общества с ограниченной ответственностью «Тиссен Майнинг Констракшн Ист» в г. Норицк

Номер документа	Дата составления
8/4	08.06.2025

### СПРАВКА

**о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта НИТУ МИСИС кафедры  
Безопасности и экологии горного производства Федорова Д.А. на тему: «Исследование  
влияния динамических лобовых аэродинамических сопротивлений на воздухораспределение  
в шахтной вентиляционной сети»**

Результаты диссертационного исследования в части учета лобовых аэродинамических сопротивлений, полученные Федоровым Д.А. на основе проведенных им научных изысканий, использованы при расчетах проветривания околоствольного двора (уклона просора) и при строительстве горных выработок рудника «Скалистый» шахты «Глубокая».

Результаты исследований позволяют повысить точность расчётов и надежность проветривания, а также избежать возможного опрокидывания вентиляционной струи в диагональных соединениях при движении самоходного горного оборудования.

рудника «Скалистый» шахты «Глубокая».

И.о. руководителя  
Обособленного  
подразделения ООО  
«Тиссен Майнинг  
Констракшн Ист»  
(должность)

(личная подпись)

Подымов В.С.  
(расшифровка подписи)

Главный инженер  
Обособленного  
подразделения ООО  
«Тиссен Майнинг  
Констракшн Ист»  
(должность)

(личная подпись)

Юнак Д.В.  
(расшифровка подписи)

Начальник ПУВ  
Обособленного  
подразделения ООО  
«Тиссен Майнинг  
Констракшн Ист»  
(должность)

(личная подпись)

Ерин А.С.  
(расшифровка подписи)