

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Белехов Павел Александрович



РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗА КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ
ВЕЩЕСТВ В ВОЗДУХЕ ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ РАБОТЕ
МАШИН С ДВС

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Гендлер С.Г.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	12
1.1 Анализ отечественного и мирового опыта в области нормирования количества воздуха для проветривания горных выработок при работе дизельной техники	12
1.2 Отечественный и мировой опыт в области решения задач эффективного проветривания в горнорудной промышленности	17
1.3 Экологические стандарты двигателей горнотранспортной техники.....	20
1.4 Выводы по главе 1	31
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	33
2.1 Общие сведения об эксперименте	33
2.2 Основные положения методики экспериментальных исследований	34
2.3 Результаты инструментальных замеров концентраций CO и NO _x в воздухе при работе погрузочно-доставочной машины ST-2D.....	39
2.4 Расчёт выбросов загрязняющих веществ и необходимого количества воздуха для обеспечения нормативных значений воздуха для машинного парка рудника	41
2.5 Выводы по главе 2.....	45
ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ РАБОТЕ В НЕЙ МАШИНЫ С ДВС.....	47
3.1 Принципы использования математического моделирования аэрогазодинамических процессов в тупиковой горной выработке при работе в ней машины с ДВС.....	47
3.2 Численное моделирование технологического цикла работы дизельного транспортного средства с ДВС в тупиковой горной выработке	51
Математическое моделирование включала в себя следующие основные этапы: ..	52
3.4 Анализ результатов математического моделирования исходной модели	64

3.5 Оценка влияния скорости движения транспортного средства на эффективность разбавления выхлопных газов	75
3.6 Численное моделирование влияния различных параметров на эффективность проветривания тупиковой горной выработки, в которой эксплуатируется дизельное транспортное средство с ДВС.....	85
3.7 Вывод по главе 3	89
ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ В ОБЛАСТИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ОТ ВЫБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ	91
4.1 Применение метода анализа размерности и безразмерных величин	91
4.2 Статическое положение транспортного средства.....	93
4.3 Динамическое движение транспортного средства	96
4.4 Выводы по главе 4.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	103
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт об использовании результатов кандидатской диссертации	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Значительная часть полезных ископаемых в настоящее время добывается с помощью подземного способа, использующего при выполнении различных производственных процессов (бурение зарядных скважин или шпуров, погрузка разрыхленной взрывом горной породы, ее последующая транспортировка на поверхность) горное оборудование с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), в том числе работающие на дизельном топливе. Процесс эксплуатации этого оборудования сопровождается выделением в рудничную атмосферу выхлопных газов, содержащих вредные и опасные для здоровья человека вещества. Одновременно с применением каталитических нейтрализаторов, позволяющих уменьшить концентрацию загрязняющих компонентов в выхлопных газах, наиболее эффективным средством нормализации рудничной атмосферы является вентиляция, предполагающая подачу в горную выработку воздуха, в количестве достаточном для разбавления загрязняющих веществ до концентраций, не превышающих предельно-допустимые.

Для определения необходимого количества воздуха следует руководствоваться положениями «Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности (ФНИП) «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых», определяющими требования к газовой обстановке в горных выработках при работе в них горных машин с ДВС в части снижения концентраций окиси углерода и окислов азота у кабины машиниста ниже установленных предельно-допустимых значений, а также к исключению попадания в кабину выбросов выхлопных газов.

Эти требования, с одной стороны, расширяют и уточняют ранее применяемые критерии для вычисления необходимого количества воздуха по фактору разбавления выхлопных газов от машин с ДВС, которые устанавливали удельные нормы расхода свежего воздуха в м³/мин на лошадиную силу (кВт), максимальная величина которых составляла 5 м³/мин.

С другой стороны, выполнение требований ФНИП ПБ предполагает необходимость осуществления специальных исследований, в том числе натурных наблюдений, по качественному и количественному определению параметров выбросов загрязняющих веществ и их влиянию на распределение концентраций окиси углерода и окислов азота по объёму выработки, в том числе у кабины водителя. Результаты этих исследований дают возможность обоснованного нахождения количества воздуха, которое гарантирует нормативные содержания загрязняющих веществ в рабочих зонах.

При этом, не исключается, что для горных машин с аналогичными техническими характеристиками (мощность двигателя, экологический стандарт топлива и его расход при различных режимах работы, качество нейтрализации вредных примесей в выхлопных газах, конструктивные особенности устройств для организации выбросов и т.п.) для вычисления количества воздуха может быть использован вышеуказанный показатель – удельный расход воздуха на единицу мощности.

Имеющиеся в настоящее время методические подходы не позволяют выполнить научно-обоснованное определение этого параметра, так как основаны или на ограниченных инструментальных замерах параметров выбросов выхлопных газов или на математическом моделировании, не учитывающем их фактические значения.

Решение задачи вычисления удельного расхода воздуха на единицу мощности следует искать на пути комплексного использования экспериментальных исследований и математического моделирования, на основе исходных данных, установленных в результате натурных замеров.

Актуальность диссертационной работы заключается в реализации комплексного подхода к обоснованию необходимого расхода воздуха для проветривания тупиковых горных выработок по фактору разбавления вредных газов, содержащихся в выбросах горнотранспортных машин с ДВС, использующими дизельное топливо.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами газо- и тепло-распределения, и переноса вещества в горнодобывающей отрасли были посвящены исследования многих отечественных и зарубежных ученых: С.Г. Гендлера, В.В. Смирнякова, А.С. Серёгина, С.С. Кобылкина, Е.В. Колесова, А.С. Рослякова, Chang P., Bickert S., Benbrahim-Tallaa, Bugarski A., Halim A., Greger D., Hoang, A.T., Huang R.

Объект исследования - аэрогазовый режим подземных горных выработок при работе в них транспортных дизельных средств с двигателями внутреннего сгорания.

Предмет исследования – процессы переноса газовых примесей, содержащихся в выхлопных газах горнотранспортных машин, при нагнетательном проветривании тупиковых выработок.

Цель работы: обоснование процедуры определения количества воздуха для обеспечения нормативных параметров загрязняющих веществ, содержащихся в выхлопных газах, на рабочих местах водителей погрузочно-доставочных машин с ДВС при проходке горных выработок.

Идея работы последовательность определения количества воздуха, определяющего нормативные величины концентраций загрязняющих веществ на рабочем месте водителя при работе погрузочно-доставочных машин с ДВС в период проходки, должна включать измерения в натуральных условиях расхода выхлопных газов, их температуры и концентраций основных загрязняющих веществ с последующим математическим моделированием газодинамических процессов, учитывающих конструктивные размеры и относительное расположение машин в тупиковых выработках, воздуховода для подачи воздуха в забой, расположения выхлопной трубы относительно места подачи свежего воздуха, её диаметра, а также скорости движения машины и времени её нахождения в забое под погрузкой.

Задачи исследования:

- изучение мирового опыта нормализации газового режима при эксплуатации в горных выработках машин с ДВС;

- экспериментальные исследования параметров выбросов загрязняющих веществ при работе в горных выработках машин с ДВС;
- численное моделирование полей концентраций CO и NO_x в тупиковых горных выработках при работе машин с ДВС;
- верификация математической модели по результатам натурных измерений;
- определение алгоритма вычисления необходимого для обеспечения у кабины водителя нормативных концентраций, загрязняющих компонент расхода воздуха.

Научная новизна исследования

1. Выявлены закономерности, характеризующие распределения концентраций оксида углерода и окислов азота по объёму тупиковой выработки при работе машин с ДВС при выполнении различных технологических операций, в том числе при погрузке разрыхлённой горной массы и её последующей транспортировке по выработке

2. Установлены зависимости, определяющие концентрацию оксида углерода и окислов азота у кабины машиниста, в функции безразмерных комплексов и симплексов, характеризующих величину выброса загрязняющего вещества, геометрических параметров выработки и выхлопной трубы, времени погрузки разрыхлённой горной массы и соотношения между скоростью воздуха и машины.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам:

11. «Гидро-, аэро-, газо- и термодинамические процессы, методы и средства управления ими в массивах горных пород и грунтов, горных выработках и выработанном пространстве»,

12. «Геомеханические и экологические факторы при выборе способов и средств разрушения горных пород в массиве, мест размещения опасных объектов, в том числе ядерно-топливного комплекса».

Теоретическая и практическая значимость работы

Обоснование аэрогазодинамической модели формирования полей концентраций оксида углерода и окислов азота, содержащихся в выбросах горнотранспортных машин с ДВС, в процессе выполнения технологических операций при погрузке разрыхлённой горной массы в забое тупиковой выработки и её последующей транспортировке до устья выработки. Практическая значимость работы состоит в разработке методики расчёта необходимого расхода воздуха для обеспечения нормативных концентраций оксида углерода и окислов азота у кабины машиниста горнотранспортной техники. Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению в Сибирской Каменноугольной Компании (акт № 04.03-К от 04.03.2026, Приложение Б) в ходе работ по Обоснованию безопасности опасного производственного объекта Рудник с подземным способом разработки, II класса опасности, *«Проект увеличения производственной мощности ОАО «Комбинат КМАруда» Этап 1. Рудно-сырьевая база комбината. Увеличение производственной мощности по добыче руды за счет запасов нижних горизонтов Коробковского месторождения. Корректировка в части недостаточности требований обеспечения безопасности нормы удельного расхода воздуха, подаваемого для проветривания выработок подземного рудника по фактору рассеивания отработанных газов от самоходного дизельного оборудования на 1 л.с. паспортной мощности двигателя»*. В ходе исследования определены нормативные значения удельных расходов воздуха, необходимые для проветривания подземных горных выработок при эксплуатации горнотранспортного оборудования с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Установлено, что для поддержания объёмной доли кислорода в рудничной атмосфере на уровне не менее 20% требуемый удельный расход воздуха варьируется в диапазоне 1,76-3,51 м³/мин на 1 л.с. мощности используемого дизельного оборудования, в зависимости от его типа. В рамках разработки обоснования промышленной безопасности проведена количественная оценка уровня риска методом средневзвешенного балла. До внедрения комплекса мероприятий показатель составлял 0,550, после их реализации — снизился до

0,100. Таким образом, использование предложенных мер позволила существенно снизить уровень риска и повысить показатели безопасности производственных процессов.

Методология и методы исследований

В ходе выполнения работы использовался комплексный метод, который включал в себя: анализ и обобщение результатов ранее опубликованных экспериментальных исследований аэрогазодинамических процессов в горных выработках; натурные исследования аэрогазодинамических процессов при работе машины с ДВС в условиях экспериментальной тупиковой горной выработки в случаях её стационарного положения при погрузке в забое выработки и движения к устью выработки; математическое моделирование аэрогазодинамических процессов в стационарном положении и при динамическом движении транспортного средства при различных скоростях движения; использовании метода анализа размерностей для обоснования безразмерных комплексов и симплексов; статистическая обработка данных натурных наблюдений и результатов математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. При проведении натурных исследований газовой обстановки в тупиковых горных выработках при работе машин с дизельным приводом (ДВС) следует осуществлять комплексные измерения расходов подаваемого свежего воздуха и выхлопных газов, начальных концентраций в них основных загрязняющих веществ, а также их распределения по сечению и длине выработки для условий всех технологических операций, связанных с использованием машин.

2. Аэрогазодинамическая модель, характеризующая распределение концентраций загрязняющих компонентов по длине и сечениям тупиковой выработки при нахождении погрузочно-доставочной машины с дизельным двигателем в проходческом забое, должна быть построена с учетом геометрических параметров выработки и конструктивных размеров машины, её расположения относительно вентиляционного става, расхода подаваемого воздуха, интенсивности, скорости истечения и температуры выхлопных газов.

3. Необходимый расход воздуха, обеспечивающий нормативные значения концентраций загрязняющих компонентов выброса выхлопных газов у рабочего места машиниста, следует определять при движении погрузочно-доставочной машины с ДВС к устью выработки с учетом соотношения скоростей собственно транс-портного средства и подаваемого воздуха, а также распределения полей концентраций загрязняющих веществ в тупиковой выработке, сформировавшимся в период нахождения машины в забое.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается использованием современного программного обеспечения для осуществления математического моделирования аэрогазодинамических процессов и соответствия их результатам натурных измерений, а также непротиворечивостью данных полученными в данной работе, и данных других авторов, проводивших исследования по аналогичным проблемам.

Апробация результатов диссертации проведена на 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 6 международных; за последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных:

1. XI Форум Союзного государства ВУЗов инженерно-технологического профиля (БНТУ, 12-16 декабря 2022);

2. XI научно-практическая конференция «Метан угольных пластов» (ООО «Газпром добыча Кузнецк», 01-10 января 2024 г.);

3. Международные научные симпозиумы «Неделя горняка» (НИТУ МИСИС, февраль 2024 г.); Международные научные симпозиумы «Неделя горняка» (НИТУ МИСИС, февраль 2024 г.);

4. XI Международная научно-практическая конференция молодых учёных и студентов (ТулГУ, 05-08 ноября 2024 г.)

5. Актуальные проблемы недропользования 2024 (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 01-07 декабря 2024 г.)

6. Международные научные симпозиумы «Неделя горняка» (НИТУ МИСИС, февраль 2025 г.);

7. 17 международная научная школа молодых учёных и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (ИПКОН РАН, 27-31 октября 2025 г).

Личный вклад автора заключается в постановки цели и задач исследования анализе отечественных и зарубежных научных источников, разработке методики и участии в проведении натурных исследований, и разработке математической модели аэрогазодинамических процессов, в верификации математической модели по результатам экспериментальных исследований, разработке инженерной методики вычисления необходимого расхода воздуха по фактору разбавления вредных веществ, содержащихся в выхлопных выбросах машин с ДВС.

Публикации. Результаты диссертационных исследований в достаточной степени освещены в 8 печатных работах (пункты списка литературы № 5-7, 10, 11, 13, 15, 61), в том числе в 2 статьях в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (пункт списка литературы № 51, Приложение А).

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 128 наименований, и 2 приложения. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка и 15 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.т.н. профессору Гендлеру Семёну Григорьевичу, а также к.т.н. доценту Серегину Александру Сергеевичу за помощь в проведении натурных исследований и компьютерного моделирования. За ценные научные советы и рекомендации в процессе подготовки диссертационного исследования автор выражает благодарность всему коллективу кафедры безопасности производств.

ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

1.1 Анализ отечественного и мирового опыта в области нормирования количества воздуха для проветривания горных выработок при работе дизельной техники

Ежегодное активное развитие производительности горнодобывающей отрасли требует повсеместного улучшения требований к правилам безопасности [33,14,42]. Огромную роль в современной добыче полезных ископаемых играет использование самоходного горного оборудования, оснащенного двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в качестве средств доставки полезного ископаемого и горной массы, транспортировки персонала и проходке горных выработок [46,75,80]. Эксплуатация таких технических дизельных средств с ДВС сопровождается выделением в рудничную атмосферу значительных объёмов токсичных и вредных для здоровья человека веществ, образующихся в результате неполного сгорания топлива, а также химического преобразования продуктов сгорания под действием факторов окружающей среды [79,80,81]. Среди таких веществ можно выделить монооксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x), соединения альдегидов, сажу, а также другие компоненты [88,83]. Контроль за содержанием в выхлопных газах концентраций перечисленных компонентов создает необходимость строгого их контроля и регулирования с целью обеспечения безопасных условий труда персонала и минимизации негативных воздействий [7].

Количество вредных компонентов выхлопных газов и их состав зависят от ряда факторов, например, технического состояния двигателя транспортного средства, режима его работы, качества топлива, эффективности системы газоочистки, а также технологических параметров эксплуатации [84,89,91]. В этой связи важной комплексной частью обеспечения экологической безопасности является оптимизация процесса подачи свежего воздуха в горные выработки. Подача свежего воздуха в горные выработки, в которых эксплуатируется дизельная техника с двигателями внутреннего сгорания, является основным способом

регулирования содержаний вредных веществ выхлопных газов и поддержания необходимого количества кислорода согласно нормативным значениям.

В стандартах экологической безопасности дополнительно указывается допустимый уровень выделения токсичных соединений, что позволяет регулировать нагрузку. Вторым фактором является степень эффективности систем газоочистки, включая установленные катализаторы, фильтры и другое, целью которых является уменьшение концентраций вредных веществ в выхлопных газах. Современные системы позволяют значительно уменьшить содержание вредных компонентов, что в свою очередь снижает необходимое количество подаваемого свежего воздуха для поддержания их требуемых предельных уровней [92,3,34], а также оказывают влияние режимы работы, длительность эксплуатации, нагрузка на двигатель, конструктивные особенности и уровень технического обслуживания двигателей [36].

Изучение влияния факторов, определяющих величину требуемого объёма, подаваемого для разбавления вредных выхлопных газов, количества воздуха, и условий эксплуатации оборудования с ДВС позволит выработать стратегию снижения выброса загрязняющих веществ путём введения более экологически чистых видов топлива, совершенствования двигателей, применение современных систем очистки выхлопных газов.

В таблице 1.1 представлены нормативные значения удельного количества воздуха, необходимого для разбавления газов, образующихся в результате работы машин с ДВС, используемые в России и других странах.

Таблица 1.1 - Значения величины количества воздуха, необходимого для разбавления газов, образующихся в результате работы машин с ДВС [118]

Страна	Величина Q на единицу мощности машин с ДВС, м ³ /мин. на л.с.
Российская Федерация (Норильский ГМК, АО «Апатиты»)	3
Австралия	2,6
Канада	2 - 4
Чили	2,8
Китай	3
ЮАР	2,8

Продолжение Таблицы 1.1

Страна	Величина Q на единицу мощности машин с ДВС, м ³ /мин. на л.с.
США	0,44 -6,1 (зависит от стандартов Tier по каждому типу двигателей)
Германия	3 - 5
Франция	2 -4
Казахстан	5,0

Анализ представленной таблицы демонстрирует достаточно большую величину разброса значений удельной величины потребности в количестве свежего воздуха для разбавления продуктов выхлопных газов от двигателей внутреннего сгорания (ДВС) автомобилей. Эти различия обусловлены спецификой типа установленного двигателя, уровнем соблюдения экологического стандарта (норматива выделения загрязняющих веществ), качеством системы очистки отработавших газов, характерными особенностями условий эксплуатации горнодобывающего оборудования [40,41].

Наибольшее значение рассматриваемого показателя характерно для стандартов токсичности уровня Tier 1, 2; Stage I, II, III A; Euro 1—3, тогда как наименьшие показатели соответствуют нормам уровней Tier 3, 4; Stage III A, III B, IV; Euro 4—6.

Под удельным расходом воздуха понимается количество воздуха, необходимое для разбавления одного условного эквивалента (обычно — 1 лошадиная сила) мощности двигателя за единицу времени. В России, начиная с 1970-х годов, была установлена норма удельного расхода воздуха, равная 5 м³/мин на 1 л.с. установленной мощности дизельных двигателей. Эта норма была впервые введена Госгортехнадзором СССР в инструкции по эксплуатации подземного самоходного оборудования (см. инструкцию «По применению самоходного (нерельсового) оборудования в подземных рудниках», Москва, «Недра», 1973, с.32). После этого, данный норматив был закреплен в правилах безопасности, таких как ПБ 03-553-03 и соответствующих приложениях к требованиям безопасности при эксплуатации машин в условиях подземных горных выработок.

Новые Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых», введённые в действие в приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505, регламентируют необходимость обеспечения горных выработок с работающими в них машинами с ДВС, содержание кислорода в воздухе не менее 20% (по объему) и содержание вредных примесей в исходящей струе ниже предельно - допустимых концентраций, установленных ПБ.

В таблице 1.2 представлены величины ПДК вредных компонентов выхлопных газов дизельного подземного оборудования для условий Российской Федерации.

Таблица 1.2 - Предельно-допустимые концентрации ядовитых газов, содержащихся в выбросах отработанных газов, в рудничной атмосфере (% по объему/мг/м³) [53]

Наименование ядовитых газов (паров)	Формула	Предельно допустимая концентрация газа в действующих горных выработках	
		% по объему	мг/м ³
Оксид углерода (оксид углерода)	CO	0,0017	20
Оксиды азота (оксиды азота) в пересчёте на NO ₂	NO ₂	0,00026	5
Сернистый газ (диоксид серы, сернистый ангидрид)	SO ₂	0,00038	10
Сероводород	H ₂ S	0,00071	10
Акролеин	C ₃ H ₄ O	0,000009	0,2
Формальдегид	CH ₂ O	0,00004	0,5
Ртуть металлическая	Hg	-	0,01
Аммиак	NH ₃	0,0025	20
Углеводороды алифатические (C ₁ -C ₁₀) предельные в пересчете на углерод	C _n H _{2n+2}	-	300

Появление новых экологических стандартов приводит к пересмотру нормативных требований к показателям удельного расхода воздуха, используемых для проветривания горных выработок. Меньшие показатели выбросов загрязняющих веществ в выхлопных газах дизельных двигателей позволяют учитывать более низкую потребность в объеме воздуха, необходимого для их

разбавления и как следствие обеспечения безопасных условий труда в подземном пространстве. Это определило реализацию новых научных исследований в этой области, которые уже демонстрируют возможность не только сохранения, но и повышения эффективности проветривания при одновременном снижении их энергозатрат и себестоимости.

Обоснование изменения нормы удельного расхода воздуха стало предметом научных исследований, проводимых в ведущих горнодобывающих предприятиях Российской Федерации, что свидетельствует о высокой актуальности и необходимости внедрения инновационных решений для сохранения безопасности горного производства [43,57,86].

Так, выполнение таких исследований на базе ГМК «Норильский никель» и АО «Апатиты» позволило сформировать научно обоснованные методики определения минимально допустимых нормативов расхода воздуха, соответствующих современным технологическим и экологическим требованиям. В рамках проектов, выполненных для АО "Кольская ГМК" и АО "Апатит" в 2015 году, была разработана методика расчета необходимого количества воздуха для обеспечения проветривания подземных рудников, учитывающая актуальные показатели выбросов дизельных транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания.

Работы основывались на моделировании процессов распространения загрязняющих веществ в воздухе подземных выработок, а также на оценке возникновения превышенных концентраций вредных компонентов выхлопных газов при различных режимах работы вентиляторных установок и условиях эксплуатации [94,93,97]. В результате была получена и доказана возможность снижения удельной нормы расхода воздуха до уровня 3 м³/мин на 1 лошадиную силу (л.с.), что является значительным шагом вперед по сравнению с ранее принятыми показателями, зачастую превышающими указанный уровень. Такое уменьшение приводит к снижению общих энерго и экономических затрат на проветривание без ущерба безопасности труда [106].

1.2 Отечественный и мировой опыт в области решения задач эффективного проветривания в горнорудной промышленности

В 1999 году была предложена методика [66,44] для расчета вредных выбросов для комплекса оборудования открытых горных работ, которая была разработана с целью создания единой методологической основы по определению выбросов вредных веществ при работе различного оборудования открытых горных разработок. Методика включала в себя расчёт вредных выбросов при бурении, взрывании, погрузо-доставочных работах, транспортировании и отвалообразовании [3].

Осуществление добычи полезных ископаемых открытым способом оказывает негативное воздействие на ключевые элементы окружающей среды, обеспечивающие жизнедеятельность человека, включая атмосферный воздух, водные объекты и земную кору. Степень воздействия отличается разнообразием и определяется множеством взаимосвязанных условий. К основным факторам, способствующим образованию пыли и выделению газов, относятся: бурильное оборудование, взрывные работы, оборудование по экскавации горной массы, транспортные средства повышенной грузоподъемности, железнодорожные составы, землеройные машины, конвейерные линии, отвальные сооружения, дробильно-сортировочное оборудование, дорожные покрытия, наружные и внутренние техногенные насыпи.

Буровые работы оказывают влияние на экологическое состояние окружающей среды преимущественно посредством увеличения концентрации взвешенных частиц в воздухе [99,115,125]. Уровень деформации подземных водных ресурсов не слишком высока вследствие естественного снижения уровня грунтовых вод.

Максимальное неблагоприятное воздействие на природную среду обусловлено выделением твёрдых аэрозольных частиц, появляющихся в ходе осуществления процессов бурения [27,69]. Проведение шахтных выработок с использованием бурильных агрегатов шарошечного типа и очистки ствола скважины воздуха приводит к образованию значительных объемов пыли массой

порядка сотен килограммов. Согласно усредненным данным анализа стандартного сценария бурения поверхностных слоев грунта, удельный вес фракций размером менее 0,05 мм среди общей массы отбитых пород варьируется в пределах 12-15%. Отсутствие специальных технических решений для снижения уровня образования и улавливания пыли в условиях бурения скважин диаметром 320 мм с интервалом 8 на 8 метров способствует формированию высокого объема загрязненной воздушной среды.

Современные установки сухой аспирации, используемые на буровом оборудовании, характеризуются наличием значимого недостатка: захваченная и накапливаемая в специально предназначенных резервуарах тонкодисперсная минеральная взвесь регулярно подвергается сбросу на площадь рабочей площадки [21]. Впоследствии данная пыль способна повторно поступать в воздушное пространство вследствие воздействия интенсивных воздушных потоков [16,25].

Воздействие неблагоприятных примесей проявляется в форме газопылевого аэрозоля, выбрасываемого в окружающее пространство. Значительная доля токсичных газовых соединений (примерно треть общего объема) остаётся внутри взорванной горной массы, постепенно мигрируя в атмосферу и вызывая загрязнение территории взрывного участка и смежных территорий [22]. Выпавшие частицы пыли, перемещаясь из состава пылегазового облака, оседают на поверхности откосов, вблизи карьерных разработок и населенных пунктов поблизости, выступая потенциальным вторичным источником дальнейшего пылевыведения [67]. Токсичные компоненты взрывчатых составов, используемых в карьерах, способствуют росту концентрации оксидов азота (NOx) в промышленных гидроресурсах [76].

Операции погрузки и разгрузки горных пород сопряжены с интенсивным образованием пыли. Наиболее значительное образование пыли происходит при работе экскаваторного оборудования, тогда как работа бульдозерных машин характеризуется несколько меньшей степенью пылеобразования [49,70]. Содержание пылевых частиц в зоне производства выемочно-погрузочных работ аналогично процессам буровзрывных операций определяется такими факторами,

как физико-механические свойства и уровень естественной увлажненности перерабатываемых пород [30]. Анализ измерений уровней концентрации пыли в кабинах машинистов и непосредственно в забое действующих рудных карьеров привёл к постоянству аналогичных значений показателя независимо от сезона или даже превышению показателей в зимний период по сравнению с летним. Это объясняется как отсутствием эффективных систем водного обеспыливания, так и усилением силы ветра в холодное время года. Дополнительным фактором повышения уровня запыленности зимой выступает частое осыпание замороженных фрагментов пород с верхней кромки забоя.

Работа автотранспорта приводит к дополнительному загрязнению атмосферы за счёт выделения опасных химических соединений, образующихся в процессе горения топливных смесей в двигателях внутреннего сгорания.

Основными компонентами выбросов являются как аэрозольная фаза, так и газообразные продукты. Среди последних наибольшую угрозу представляют регламентируемые показатели загрязнителей: окислы азота NO_x (значение NO и NO_2 в пересчёте на NO_2); монооксид углерода CO ; углеводородные соединения CH (газовая фаза неполного сгорания топлива и масел, нормированная по формуле $\text{CH}_{1,88}$); твердые частицы C (продукт неполного сгорания топлива в виде сажи) и аэрозоль неразложившихся нефтепродуктов и моторных масел [2, 50, 55].

Выделение вредных компонентов (мелкодисперсных частиц) дизельной техникой в процессе отвалообразования производится вне зависимости от типа. Точечные, линейные или площадные источники выбросов. Точечные источники включают технику для вскрыши и перемещения породы (экскаваторы, бульдозеры), при эксплуатации которой наблюдается активное выделение вредных компонентов, причём степень запылённости воздушной среды существенно выше при использовании экскаваторной техники, чем при проведении работ бульдозерами [20,48]. Протяжёнными источниками выступают конвейеры, железнодорожные вагоны и автомобильные дороги. Общей характеристикой всех подходов к созданию отвалов является возникновение обширных неизолированных площадок (площадных источников), которые в неблагоприятных

климатических условиях становятся причиной интенсификации процесса пылеобразования, определяющегося природой материала, структурными характеристиками зернистых составляющих и погодными условиями [17].

В 2011 году в статье [71] было осуществлено компьютерное моделирование пульсирующей вентиляции в сквозных горных выработках. Результаты позволили визуализировать направление и распределение изолиний скорости и импульсов в зависимости от различных принимаемых параметров, а также оценить их влияние на изменение характеристик.

Применение методов математического компьютерного моделирования широко распространено в настоящее время [37,38,77].

1.3 Экологические стандарты двигателей горнотранспортной техники

Двигательное горнотранспортное оборудование, используемое в процессе добычи и транспортировки минеральных ресурсов, подвергается строгой оценке концентраций выбросов загрязняющих веществ, содержащихся в выхлопных газах оборудования с двигателями внутреннего сгорания [72]. Следовательно, особую значимость дают научные исследования и внедрение нормативно-правовых актов, устанавливающих предельно допустимые концентрации опасных соединений в продуктах сгорания, выделяемых оборудованием с дизельными двигателями внутреннего сгорания [124, 128].

Данные стандарты формируют нормативную базу, ориентированную на минимизацию негативного воздействия горнорудной деятельности на окружающую среду и здоровье подземного персонала.

В настоящее время значительное распространение получили экологические стандарты уровня токсичности выхлопных газов, среди которых особое место занимает стандарт Tier, принятый в Соединённых Штатах Америки. Стандарт Tier представляет собой систематизированный подход к классификации двигателей по их мощности и уровню эмиссии вредных веществ, выделяемых в атмосферу в процессе работы оборудования. В рамках стандарта Tier дизельные двигатели группируются по 9 основным группам, соответствующим диапазону мощности от 8 кВт (около 11 л.с.) до 560 кВт (приблизительно 750 л.с.). Данная стратификация

позволяет учитывать характерные особенности каждой категории при определении лимитов на выбросы. Данные стандарты базируются на разработанных в результате научных исследований допустимых уровней концентраций таких загрязнителей, как оксиды азота (NO_x), твердые частицы (PM), углеводороды (C_x) и монооксид углерода (CO). В рамках каждой из девяти групп мощности регламентируются строгие пределы на суммарные выбросы этих веществ, с учетом современных технологических возможностей снижения выбросов [111].

Штат Калифорния (США) на протяжении многих лет является одним из регионов с наиболее высокими экологическими требованиями. В рамках своего законодательства устанавливаются более жесткие стандарты качества воздуха по сравнению с федеральными нормативами, требуя от производителей и компаний внедрять передовые технологии очистки выхлопных газов, такие как системы селективного каталитического восстановления (SCR), теплообменники и системы фильтрации твердых частиц (таблица 1.3). В результате, использование дизельного оборудования, соответствующего стандарту Tier, в штате Калифорния подразумевает соблюдение дополнительных требований по снижению уровня эмиссии, что способствует уменьшению негативного влияния на окружающую среду и здоровье людей [107]. Однако, в Соединенных Штатах в пределах каждого штата предоставляется возможность либо самостоятельно устанавливать эти нормы, либо следовать общенациональному стандарту Tier, либо вводить более строгие локальные нормативы [104,82].

В начале 2000 в США были введены Федеральные стандарты Tier 1-3 для контроля компонентов выбросов дизельных двигателей с номинальной мощностью, превышающей 50 л.с.

В результате, компании вынуждены учитывать специфические особенности локальных нормативных актов, что, в свою очередь, в достаточной мере влияет на выбор технических устройств, её модернизацию и автоматизацию систем очистки выхлопных газов.

Таблица 1.3 - Нормы токсичности ОГ дизельных двигателей внедорожных машин Tier 1-3, установленные ЕРА, г/кВт·ч (г /л.с.·ч) [90]

Мощность двигателя, кВт (л.с.)	Стандарт	Год введения	СО	СН	NMHC+NOx	NO _x	Сажа
Менее 8 (менее 11)	Tier 1	2000	8,0 (6,0)	-	10,5 (7,8)	-	1,0(0,75)
	Tier 2	2005	8,0 (6,0)	-	7,5 (5,6)	-	0,8(0,6)
8...19 (11...25)	Tier 1	2000	6,6 (4,9)	-	9,5 (7,1)	-	0,8(0,6)
	Tier 2	2005	6,6 (4,9)	-	7,5 (5,6)	-	0,8(0,6)
19...37 (25...50)	Tier 1	1999	5,5 (4,1)	-	9,5 (7,1)	-	0,8(0,6)
	Tier 2	2004	5,5 (4,1)	-	7,5 (5,6)	-	0,6(0,45)
37...75 (50...100)	Tier 1	1998	-	-	-	9,2 (6,9)	-
	Tier 2	2004	5,0 (3,7)	-	7,5 (5,6)	-	0,4(0,3)
	Tier 3	2008	5,0 (3,7)	-	4,7 (3,5)	-	-*
75...130 (100...175)	Tier 1	1997	-	-	-	9,2 (6,9)	-
	Tier 2	2003	5,0 (3,7)	-	6,6 (4,9)	-	0,3(0,22)
	Tier 3	2007	5,0 (3,7)	-	4,0 (3,0)	-	-*
130...225 (175...300)	Tier 1	1996	11,4 (8,5)	1,3 (1,0)	-	9,2 (6,9)	0,54(0,4)
	Tier 2	2003	3,5 (2,6)	-	6,6 (4,9)	-	0,2(0,15)
	Tier 3	2006	3,5 (2,6)	-	4,0 (3,0)	-	-*
225...450 (300...600)	Tier 1	1996	11,4 (8,5)	1,3 (1,0)	-	9,2 (6,9)	0,54(0,4)
	Tier 2	2001	3,5 (2,6)	-	6,4 (4,8)	-	0,2(0,15)
	Tier 3	2006	3,5 (2,6)	-	4,0 (3,0)	-	-*
450...560 (600...750)	Tier 1	1996	11,4 (8,5)	1,3 (1,0)	-	9,2 (6,9)	0,54(0,4)
	Tier 2	2002	3,5 (2,6)	-	6,4 (4,8)	-	0,2(0,15)
	Tier 3	2006	3,5 (2,6)	-	4,0 (3,0)	-	-*
Более 560 (более 750)	Tier 1	2000	11,4 (8,5)	1,3 (1,0)	-	9,2 (6,9)	0,54(0,4)
	Tier 2	2006	3,5 (2,6)	-	6,4 (4,8)	-	0,2(0,15)

*Не установлены. Двигатели должны соответствовать нормам Tier 2 по уровню содержания сажи.

Примечание. СО – угарный газ, NO_x- оксиды азота, NMHC -неметановые углеводороды, СН-углеводороды.

Современные дизельные двигатели горнотранспортных машин оснащаются системами электронного управления, что обеспечивает не только оптимальный режим работы для повышения топливной эффективности, но также и эффективное снижение выбросов вредных веществ. Использование каталитических нейтрализаторов, систем рециркуляции выхлопных газов, а также систем фильтрации твердых частиц позволяет существенно уменьшить воздействие вредных компонентов на атмосферу и здоровье персонала. Одновременно с этим, процесс соответствия экологическим стандартам требует регулярного мониторинга и контролем за состоянием транспортных средств. Для этих целей часто применяются системы диагностики состояния оборудования в реальном времени, позволяющие выявлять отклонения от нормативных параметров и обеспечивать своевременное обслуживание и ремонт оборудования.

Нормы Tier 4 постепенно вводились с 2008 по 2015 год. Эти стандарты осуществляют оценку по ПДК выбросов, допускающих повышение величин компонентов в отработавших газах почти на 25% от предыдущих. В таблице 1.4 приведены нормы токсичности ОГ дизельных двигателей внедорожных машин для стандарта Tier 4.

Таблица 1.4 - Нормы токсичности ОГ дизельных двигателей внедорожных машин Tier 4, г/кВт·ч (г/л.с.·ч), двигатели мощностью до 560 кВт [64]

Мощность двигателя, кВт (л.с.)	Год	СО	NMHC	NMHC+NO _x	NO _x	Сажа
Менее 8 (менее 11)	2008	8,0 (6,0)	-	7,5 (5,6)	-	0,4*1(0,3)
8...19 (11...25)	2008	6,6 (4,9)	-	7,5 (5,6)	-	0,4(0,3)
19...37 (25...50)	2008	5,5 (4,1)	-	7,5 (5,6)	-	0,3(0,22)
	2013	5,5 (4,1)	-	4,7 (3,5)	-	0,03(0,022)
37...56 (50...75)	2008	5,0 (3,7)	-	4,7 (3,5)	-	0,3*2(0,22)
	2013	5,0 (3,7)	-	4,7 (3,5)	-	0,03(0,022)
56...130 (75...175)	2012-2014*3	5,0 (3,7)	0,19 (0,14)	-	0,4 (0,3)	0,02(0,015)
130...560 (175...750)	2011-2014*4	3,5 (2,6)	0,19 (0,14)	-	0,4 (0,3)	0,02(0,015)
Примечание. СО – угарный газ, NO _x - оксиды азота, NMHC -неметановые углеводороды, СН-углеводороды						

В Европе для аналогичных машин существует стандарт Euro, а для внедорожников и дизельных генераторов - Stage. Европейские нормы охватывают узкую категорию дизельных двигателей мощностью от 56 до 129 кВт и от 130 до 560 кВт (таблица 1.5).

Таблица 1.5 - Нормы Евросоюза по токсичности ОГ дизельных двигателей внедорожных машин, кВт·ч [64]

Мощность двигателя, кВт	Стандарт	Год введения стандарта	CO	CH	NOx	Сажа	Примечание
37...75	Stage I	1999	6,5	1,3	9,2	0,85	-
75...130	Stage I	1999	5,0	1,3	9,2	0,7	-
130...560	Stage I	1999	5,0	1,3	9,2	0,54	-
18...37	Stage II	2001	5,5	1,5	8,0	0,8	-
37...75	Stage II	2004	5,0	1,3	7,0	0,4	-
75...130	Stage II	2003	5,0	1,0	6,0	0,3	-
130...560	Stage II	2002	3,5	1,0	6,0	0,2	-
18...37	Stage IIIA	2006	5,5	-	7,5*	0,6	*) NO _x + CH
37...75	Stage IIIA	2007	5,0	-	4,7*	0,4	*) NO _x + CH
75...130	Stage IIIA	2006	5,0	-	4,0*	0,3	*) NO _x + CH
130...560	Stage IIIA	2005	3,5	-	4,0*	0,2	*) NO _x + CH
18...37	Stage III B	2012	5,0	4,7*	0,025	-	*) NO _x + CH
37...75	Stage III B	2011	5,0	0,19	3,3	0,025	-
75...130	Stage III B	2011	5,0	0,19	3,3	0,025	-
130...560	Stage III B	2010	3,5	0,19	2,0	0,025	-
56...130	Stage IV	2014	5,0	0,19	0,4	0,025	-
130...560	Stage IV	2013	3,5	0,19	0,4	0,025	-

Законодательные органы Европейского Союза, Соединенных Штатов Америки и Японии на современном этапе развития транспортных технологий активно сотрудничают с целью достижения согласованности и стандартизации мировых стандартов, регламентирующих величины выбросов и токсичности выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания. Совместная деятельность включает в себя разработку, совершенствование и введение новых нормативных документов. В рамках этих стандартов осуществляется систематизация требований к уровню и величине токсичности и выбросам твердых частиц. Так, нормы Stage I и Stage II приводятся не в полной мере и соответствуют американским стандартам Tier 1 и Tier 2. При этом нормы, определенные на стадиях Stage I и II, не могут

превышать величин, указанных в таблицах, что обеспечивает стандартизацию величин загрязнения. В Stage I регулируются показатели токсичности ОГ непосредственно из камеры сгорания (КС), то есть на периоде максимально приближенном к периоду образования выбросов.

В рамках этих нормативных документов вводится ограничение содержания твердых частиц (сажи), соответствующее более высоким уровням экологических стандартов. Так, норма по содержанию сажи в выбросах устанавливается в диапазоне 0,020–0,025 г/кВт·ч. Соответствие стандартам Stage IV требует, чтобы системы выпуска двигателей были сконструированы с учетом необходимости снижения уровней выбросов твердых частиц и токсичных газов. Системы должны быть оснащены эффективными нейтрализаторами — системами каталитической нейтрализации, частично или полностью устраняющими выбросы сажи и другие вредные компоненты. Эти системы позволяют добиться снижения содержания токсичных веществ примерно на 90% по сравнению со стандартами Stage II. В то же время стандарты Stage IV предусматривают внедрение дополнительных технологий для контроля выбросов, таких как системы рециркуляции отработанных газов (EGR), системы селективной каталитической нейтрализации (SCR) и фильтры твердых частиц.

В условиях возрастающего международного взаимодействия и взаимообмена экологические требования, предусмотренные европейскими стандартами Euro/Stage, частично соотносятся с аналогичными нормативами, действующими в Соединенных Штатах Америки, такими как нормы Tier. На территории Российской Федерации начиная с 2011 года введено обязательное требование соответствия всех транспортных средств, производимых либо импортируемых в страну, уровню экологической защиты Euro 3, а впоследствии, с 2014 года, повышен уровень требований до стандартов Евро.

Требования экологических стандартов для внедорожной техники Stage IV и Tier 4 подобны нормам для магистральных автомобилей Euro 5/6, только сроки вступления в действие первых запаздывают примерно на три года относительно вторых (рисунок 1.1).

Таким образом, нормы выбросов для дизельных двигателей горнотранспортного самоходного оборудования, используемого на шахте «Ангидрит», соответствующие стандарту Tier 3, коррелируют со стандартом ЕС для внедорожных машин Stage IIIA и занимают промежуточное место между стандартами Euro 3 и Euro 4, используемыми в РФ.

Регулирование уровней вредных выбросов дизельных двигателей внутреннего сгорания в странах Азии и формирование там нормативной правовой базы – это достаточно сложный и многоступенчатый процесс, в том числе по причине внешнего международного влияния, местных экологических особенностей экономической политики и технологического прогресса.

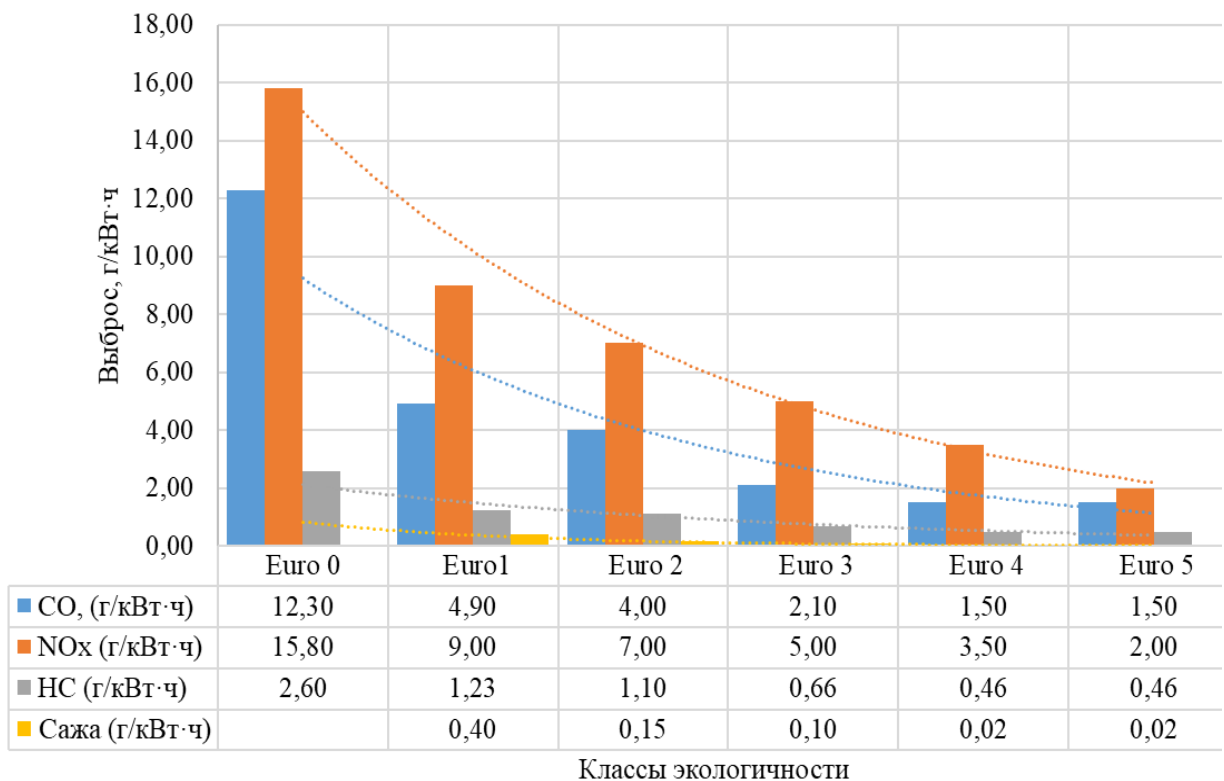


Рисунок 1.1 - Величина выбросов компонентов выхлопных газов в зависимости от классов экологичности (составлено автором)

Данная нормативно-правовая система представляет собой сочетание стандартов Европейского Союза и Соединенных Штатов Америки, адаптированных с учетом специфики местных условий и требований к охране окружающей среды. Министерством экологии и окружающей среды (MEE, SAMR) разработаны следующие национальные стандарты выбросов для двигателей дизельных транспортных средств в Китае: China I-V, IV-a, VI-b, которые были

приняты с 2000 по 2023 г, которые соответствуют стандартам GB 17691-2001, GB 17691-2005 и GB 17691-2018. Эти требования применимы для машин с большой грузоподъемностью (таблица 1.6).

Таблица 1.6 - Нормы предельных значений выбросов для машин большой грузоподъемностью [52]

Стандарт	Тест	CO	HC	NMHC	CH ₄ *	NO _x	PM
		г/кВт·ч					
China III	ESC+ ELR	2,1	0,66	–	–	5,0	0,10/0,13**
	ETC	5,45	–	0,78	1,6	5,0	0,16/0,21*
China IV	ESC+ ELR	1,5	0,46	–	–	3,5	0,02
	ETC	4,0	–	0,55	1,1	3,5	0,03
China V	ESC+ ELR	1,5	0,46	–	–	2,0	0,02
	ETC	4,0	–	0,55	1,1	2,0	0,03
China VI	WHSC (двигатель с воспламенением сжатия)	1,5	0,13	–	–	0,4	0,1
	WHTC (двигатель с воспламенением сжатия)	4,0	0,16	–	–	0,46	0,1
	WHTC (двигатель с искровым зажиганием)	4,0	–	0,16	0,5	0,46	0,1

Дополнительно в Китае устанавливаются требования к минимальным срокам службы выпускаемых технических транспортных средств, в течение которых производитель гарантирует соблюдение и не превышение норм выбросов [52] (таблица 1.7).

Таблица 1.7 - Минимальный срок службы большегрузных транспортных средств [52]

Категория ТС	Минимальный срок*	
	Пройденное расстояние, тыс. км	Срок службы (лет)
M1-2, N1	80	5
N2-3, M3	160	5

* Минимальное пройденное расстояние или время обслуживания, необходимая для соблюдения норм выбросов

Стандарты China 5 и 6, введенные в крупных городах таких как Пекин, Шанхай и Гуанчжоу, являются более строгими, чем соответствующие международные стандарты Евро 6. Так, нормы выбросов для автомобилей по уровням China 5 и China 6 одинаковы для всех видов топлива. Китайские нормы

устанавливают ограничения на выбросы таких вредных веществ, как оксиды азота, твердые частицы и углеводороды, при этом стандарт China 6 является одним из наиболее жестких в мире и предусматривает, например, снижение выбросов NO_x до 0,46 г/кВт·ч, что в разы ниже предшествующих величин [73].

В Индии система экологического регулирования автомобилей исторически основывалась на внедрении стандартов Bharat Stage (BS) с 2000 по 2020 г., которые являются аналогом европейских норм Евро [63]. Стандарты Bharat Stage были разработаны Центральным советом по контролю за загрязнением окружающей среды (Central Pollution Control Board, CPCB), который осуществляет свою деятельность при Министерстве окружающей среды и изменения климата (Ministry of Environment, Forest and Climate Change, MoEF&CC) (рисунок 1.2).

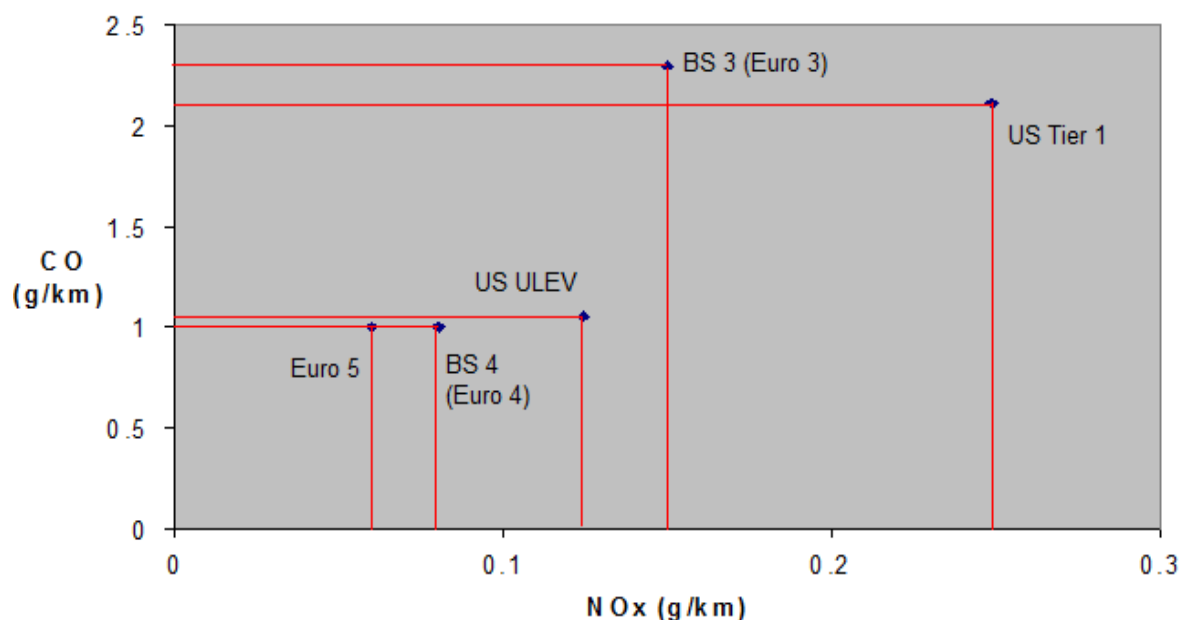


Рисунок 1.2 - Стандарты выбросов Индии в сравнении с Европейскими стандартами по фактору выбросов NO_x и CO [64]

В настоящее время на территории страны действует система с несколькими степенями по степени жесткости: нормативы Bharat Stage 3 (BS-3) – для всей страны, и более строгие стандарты Bharat Stage 4 (BS-4), которые были введены, прежде всего, в условиях крупных городов Индии [64].

Стандарты Bharat Stage развивались параллельно с европейскими нормами, однако их внедрение отличается замедленным темпом из-за экономических факторов, а также технологических ограничений.

Переход на более жесткую ступень Bharat Stage 6 был запланирован на 2020 год, что соответствует стандартам Евро 6. Это говорит о намерении Индии ускорить модернизацию автомобильной промышленности и повысить требования к экологии [60,62].

В государстве Япония стандартизацией и разработкой величин выбросов вредных компонентных выхлопных газов занимается Министерство окружающей среды (MOE). Последняя редакция нормативов японской системы, принятая в 2009 году, получила название «Третий уровень стандартизации» (Stage 3 или 2009 Standards). По своей сути она занимает промежуточное положение между европейскими уровнями стандартов Euro 5 и Tier 4. В основном, эти стандарты регулируют выбросы оксидов азота (NO_x), твердых частиц (PM), углеводородов и монооксидов углерода (CO). Для дизельных двигателей мощностью от 56 до 560 кВт было установлено ограничение на выброс NO_x не выше 0,4 г/(кВт·ч), что составляет существенное снижение по сравнению с предыдущими нормами [58].

Эти нормативы вступили в силу поэтапно начиная с 2014–2015 года для двигателей различной мощности с целью автопроизводителям своевременно адаптировать технические решения. Важной чертой японской нормативной базы является степень учета технологического развития — например, внедрение систем SCR и DPF является обязательным для новых моделей. В Японии существуют специфические стандарты для выхлопных газов транспортных средств специальных категорий, а также для экологически чистых видов транспорта, таких как электромобили и автомобили гибриды. Помимо требований для легковых и грузовых автомобилей, разработаны соответствующие MOT/MOC стандарты для внедорожной техники, строительной техники, электростанций и других источников выбросов, что способствует всеобъемлющему подходу к экологической безопасности.

Во многих государствах Юго-Восточной Азии, таких как Малайзия, Индонезия, Филиппины, Вьетнам и Таиланд, формирование национальных экологических систем основано на заимствовании европейской модели стандарта Евро 2. Этот стандарт представляет собой сравнительно мягкий уровень

ограничения выбросов загрязняющих веществ автомобильным транспортом, значительно уступающий по степени жесткости современным стандартам Евро 4, Евро 5 и Евро 6. Основные причины выбора именно стандарта Евро 2 связаны с особенностями социально-экономического развития рассматриваемых государств, наличием значительных экономических барьеров и технологических ограничений, препятствующих внедрению более прогрессивных подходов к регулированию выбросов [13].

За счет этого такие страны испытывают трудности с переходом к более чистым технологиям, что способствует ухудшению экологической ситуации, особенно в мегаполисах с густонаселенной и интенсивной транспортной деятельностью. Тем не менее, в последние годы в рамках программ по улучшению качества воздуха наблюдается определенная активизация в вопросах регулирования выбросов, а также модернизации существующих стандартов.

Бразилия, являясь одной из крупнейших стран Латинской Америки по объему рынка, приступила к созданию и внедрению собственных стандартов, ограничивающих негативное воздействие автомобильных выхлопов на окружающую среду, ещё в 1988 году. Именно тогда была принята первая государственная программа, целью которой стало установление верхних границ концентрации азотистых оксидов, твёрдых частиц и прочих нежелательных компонентов в выхлопных газах новых автомобилей. Данная инициатива стала отправной точкой для систематического усиления требований и последующей адаптации национальных законов к мировым экологическим стандартам

Учитывая масштаб своего автоиндустриального комплекса, Бразилия проявляет повышенный интерес к освоению технологий, направленных на сокращение уровня вредных выбросов и продвижение экологически дружественных моделей транспортных средств. В течение последних десятилетий принятые в стране нормы непрерывно развивались и уточнялись, стремясь соответствовать актуальным глобальным направлениям и требованиям экологического права.

В целом, развитие нормативных требований к уровню вредных выбросов дизельных двигателей в странах Азии отражает глобальную тенденцию к эколого-ориентированному развитию транспортной отрасли. В рамках этого процесса происходит постепенное усиление требований, внедрение современных технологий очистки и контрольных систем, а также гармонизация стандартов с международными нормами. Такой подход способствует не только снижению экологических рисков, связанных с транспортом, но и стимулирует инновации, развитие отечественных технологий и модернизацию промышленного комплекса.

Перспективы дальнейшего развития связаны с ужесточением требований согласно международным соглашениям, распространением электромобилей и альтернативных видов топлива, а также с совершенствованием системы контроля за соблюдением нормативов. В регионе наблюдается тенденция к объединению усилий по развитию экологических технологий и внедрению стандартов, способных обеспечить баланс между экономическим ростом и экологической безопасностью.

Общий вывод заключается в том, что внедрение и развитие нормативных правил — важнейший инструмент формирования экологически безопасного транспортного сектора, который требует своевременного обновления, технической поддержки и адаптации к новым вызовам. Такой системный подход способствует реализации глобальных целей по снижению уровня загрязнения воздуха, улучшению здоровья населения и обеспечению устойчивого развития регионов Азии.

1.4 Выводы по главе 1

Таким, образом можно выделить следующие факторы, определяющие количество воздуха, необходимое для обеспечения нормативных значений концентраций кислорода и поддержания ПДК загрязняющих веществ при работе машин с ДВС:

Количество воздуха, которое необходимо подавать в горные выработки, где находятся (в стационарном или подвижном состоянии) машины с дизельными двигателями внутреннего сгорания, будет зависеть от следующих факторов:

- конструктивных характеристик дизельного двигателя (ДД) машины;
- мощность ДД ($N_{\text{дв.}}$, л.с.);
- скорость вращения коленчатого вала (n , об/мин.);
- рабочий объем цилиндров ДД ($V_{\text{дв.}}$ м³);
- расход топлива при его максимальной и 50% загрузке; ($q_{\text{топ.}}$, кг/л.с. в час);
- стандарт токсичности ДД, определяющий удельную величину выбросов вредных примесей, j_i , мг/л.с. в секунду);
- тип и эффективность работы нейтрализатора выхлопных газов;
- предельно-допустимых концентрации вредных веществ в воздухе подземных выработок, которые необходимо обеспечить при эксплуатации машин ($C_{\text{пдж.}i}$, мг/м³);
- сечение горных выработок ($S_{\text{выр.}}$, м²);

Необходимое количество воздуха должно определяться по возможности обеспечения содержание кислорода в воздушной среде не ниже 20% и концентраций окиси углерода (оксид углерода) и окислов азота (оксиды азота) в пересчёте на NO₂.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Общие сведения об эксперименте

Объектом исследования являлось дизельное оборудование, оснащённое двигателями внутреннего сгорания и используемое в условиях подземных разработок шахт. Основной задачей исследования было экспериментальное установление требуемого количества воздуха, которое бы обеспечивало снижение концентрации загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах выхлопных газов машин с ДВС, в воздушной среде тупиковых выработок до нормативных значений.

В процессе выполнения экспериментальных исследований была использована методика измерений, которая позволила установить количественный и качественный состав выбросов выхлопных газов машин с ДВС и последующую оценку их влияния на формирование полей концентраций CO и NO_x в рудничной атмосфере при расположении дизельной погрузочно- доставочной машины в забое выработки и при её движении по направлению к устью выработки.

Экспериментальные исследования проводились при различных эксплуатационных режимах работы двигателей внутреннего сгорания, которыми оснащён машинный парк рудника [10,116]. Особое внимание уделялось изучению состава воздушной среды в рабочих зонах (кабины водителя) машин с ДВС, а также оценке эффективности процесса разбавления выхлопных газов при различных количествах свежего воздуха [47,61].

На основе замеров концентраций CO и NO_x в выбросах выхлопных газов для каждой единицы машинного парка рудника и количества выхлопных газов для каждого режима работы двигателя, были рассчитаны значения выбросов принимаемых во внимание загрязняющих веществ.

Результаты выполненных вычислений [31,1] дали возможность установить для каждого типа самоходного дизельного оборудования, включенного в состав автопарка подземного рудника, необходимые удельные нормативы потребления свежего воздуха, подаваемого в горные выработки с целью недопущения превышения установленных предельно допустимых концентрации компонентов выхлопных газов в забоях и местах работы персонала [11].

2.2 Основные положения методики экспериментальных исследований

Определение необходимого расхода воздуха для разбавления отработанных газов, выделяемых двигателями внутреннего сгорания для каждой единицы оборудования парка машин горнодобывающего предприятия, должно основываться на результатах экспериментальных замеров, позволяющих установить качественный и количественный состав выбросов загрязняющих веществ с последующей и последующей оценкой воздействия этих выбросов на пространственное распределение концентраций монооксида углерода и оксидов азота в атмосфере выработок как от стационарно расположенной машины с ДВС, так и в динамическом режиме при движении машины по выработке. Критерием принятия решения о достаточности количества воздуха следует обеспечение нормативных показателей ПДК вблизи рабочего места водителя. При этом, для вычисления общего количества воздуха для горнодобывающего предприятия по фактору выделения вредных веществ от машин с ДВС необходимы измерения интенсивности выделения вредных компонентов для всего машинного парка [26,19,6].

Методология проведения натурного исследования количественных показателей выбросов загрязняющих веществ, присутствующих в составе выхлопных газов, включала последовательные этапы анализа современного транспортного парка рудника, включая определение марки каждой единицы транспорта, продолжительности работы каждой единицы транспортной техники (соответствие экологическому стандарту), классификацию, замер номинальной мощности двигателей, учет суммарного рабочего ресурса двигателей внутреннего сгорания в моточасах отдельно для каждой единицы транспортного средств.

В рамках проведенных экспериментов каждая из отобранных единиц транспортных средств с дизельными двигателями находилась в работе как в режиме холостого хода, так и при максимальных оборотах двигателя.

В процессе испытаний определялись ключевые параметры, характеризующие состояние системы выпуска отработанных газов: конфигурационные особенности выходного патрубка, скорости истечения газа

(при различной степени загрузки агрегата), температурные показатели и содержание основных токсичных элементов в газовой смеси (оксид азота, оксид углерода) [74].

До начала забора тестового материала двигателя находились в постоянных режимах работы не менее шести минут, обеспечивая стабильность исходных условий эксперимента. Отбор проб осуществлялся непосредственно вблизи выхлопного тракта, исключая возможное смешение газа с окружающей воздушной средой выработки.

При осуществлении натурных измерений концентраций CO и NOx в рудничной атмосфере были соблюдены следующие условия:

- протяженность выработки не менее 100 м;
- на выбранном участке должны отсутствовать сопряжения с другими выработками;
- поперечное сечение выработки должно быть постоянным;
- при использовании тупиковой выработки расстояние до забоя должно быть не менее 15 м;
- возможность изменения расхода воздуха в горной выработке.

При проведении измерений в горных выработках использовались приборы согласно методике [18] таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Характеристики приборов, используемых для воздушно-депресссионной съемки [18]

Наименование	Диапазон измерений				
	t, °C	H, %	P, КПа	V, м/с	Концентрация, мг/м ³
Термоанемометр Testo 425	-20...+70	-	-	0 ÷ 20	-
Многокомпонентный газоанализатор ПОЛАР-2	-20 ÷ +800	3 ÷ 97	-	-	CO до 500 мг/м ³ , NOx до 3150 мг/м ³
Анемометр АПР-2	-	-	-	0,15 ÷ 20 ±(0,03+0,02V)	-
Измеритель абсолютного и дифференциального давления МБГО-2	-	-	40-150	-	-

Продолжение Таблицы 2.1

Наименование	Диапазон измерений				
	t, °C	H, %	P, КПа	V, м/с	Концентрация, мг/м ³
Пирометр Center 350	-20 ÷ 500 ±20 °C или 2%	-	-	-	-
Трубки Пито 3 шт.	-	-	-	5÷60	-

Все указанные в таблице 2.1 приборы перед проведением шахтных исследований прошли поверку в сертифицированных лабораториях. На рисунках 2.1-2.3 представлен внешний вид приборов.



Рисунок 2.1 - Многокомпонентный газоанализатор ПОЛАР-2 (фото автора)



Рисунок 2.2 - Термоанемометр Testo 425 (фото автора)



Рисунок 2.3 - Анемометр АПР-2 (фото автора)

Подготовка приборов к полевым замерам была выполнена в соответствии с инструкциями по эксплуатации.

Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 21393-75, ГОСТ 24028-80 и РД 03-433-02 [56]. Методика измерений включала в себя следующую последовательность:

1. Измерение скорости и температуры свежей струи на выходе их вентиляционного става.

2. Расположение машины в тупиковой части выработки неподвижно на стояночном тормозе.

3. Прогрев двигателя ПДМ.

4. Замер температуры и скорости выхлопных газов на выходе из выхлопной трубы, а также её диаметра.

5. Расположение отборщика проб на входящей вентиляционной струе по отношению к выхлопу, лицом к потоку в пределах первого измеряемого сечения (36,6 м от тупика). Штуцер располагался на вытянутых руках перед собой (рисунок 2.4).

6. Фиксация измерений пробоотборным штуцером в каждой из 9 точек в каждом сечении (рисунок 2.5).

7. Критерием окончания измерения показаний в точке являлось условие, когда отклонение текущих показаний прибора от предыдущих результатов измерений величин компонентов загрязняющих веществ, было ниже порогового значения, равного десяти процентам, относительно предыдущих показаний в соответствующем месте замера.

8. Для подтверждения адекватности полученных данных было принято решение дополнительно осуществлять одновременный отбор проб ВГСО в пробоотборные ёмкости.

9. Замер скорости воздуха и температуры в данном сечении.

10. По окончании замеров во всех сечениях действия 1-8 (кроме 2,3) повторялись при изменении сопротивления трубопровода.

Расстояние между первым поперечным сечением и машиной $5 \div 15$ метров, каждое последующее $5 \div 10$ метров (рисунок 2.4).

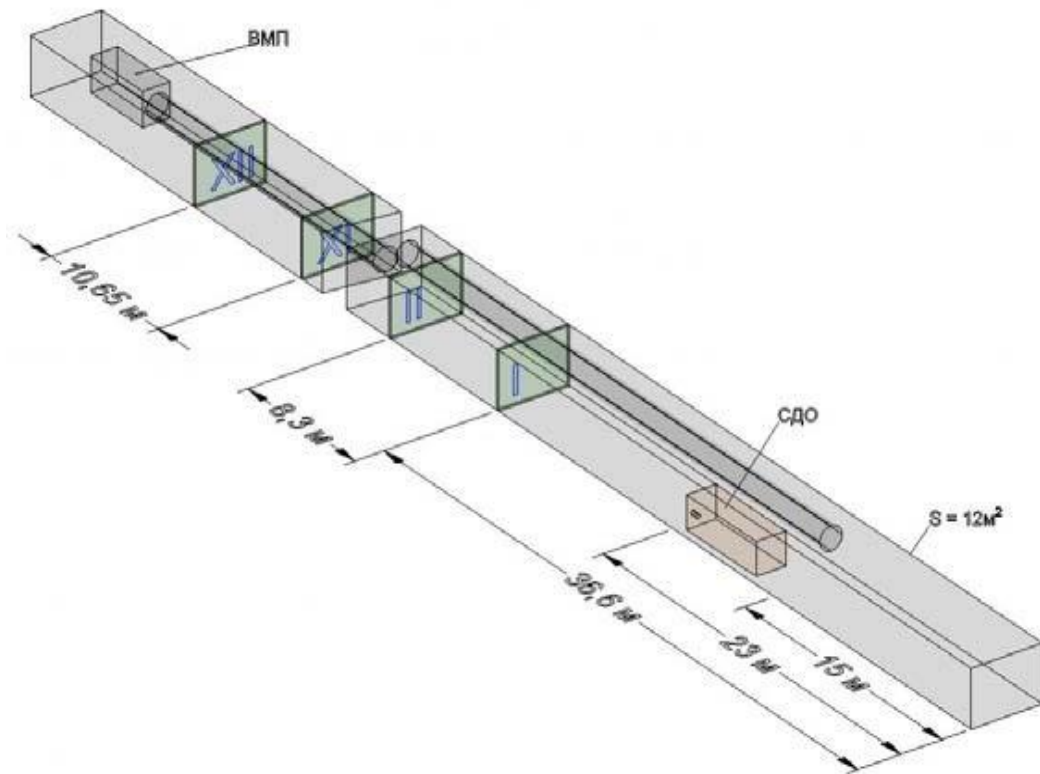


Рисунок 2.4 - Взаимное расположение сечений измерений в горной выработок
(составлено автором)

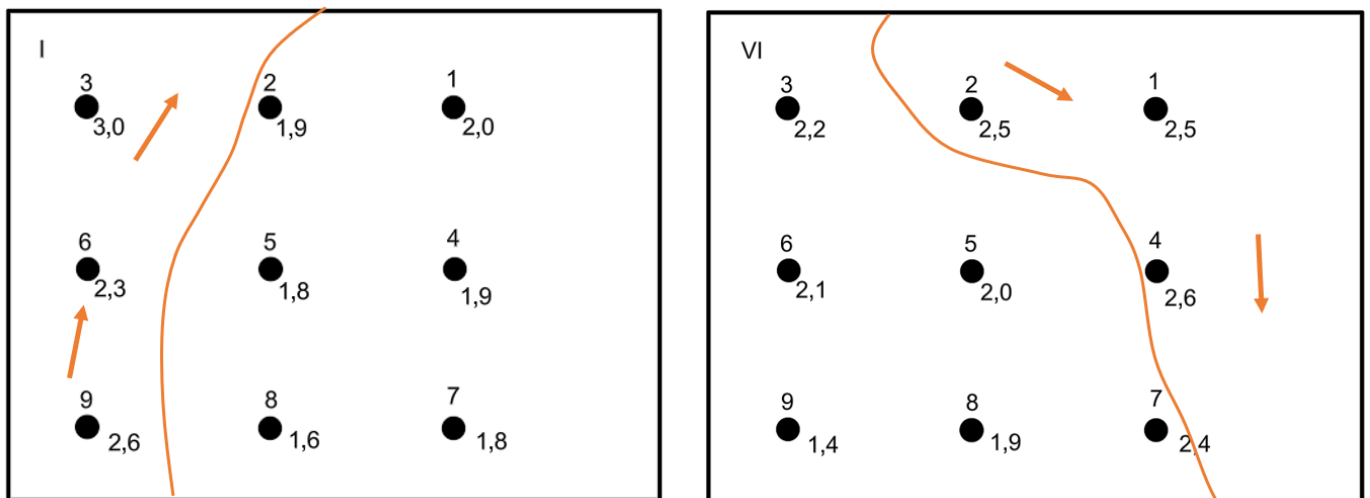


Рисунок 2.5 - Взаимное расположение точек измерений поля концентраций
выхлопных газов в поперечном сечении горной выработки и результаты
измерений при расходе воздуха $4,9 \text{ м}^3/\text{с}$ (составлено автором)

Концентрации монооксида углерода и оксидов азота вблизи кабины машиниста самоходного оборудования измерялась в рабочей зоне (зона дыхания водителя машины). При этом пробоотборной штуцер располагается таким образом, чтобы выдыхаемый работником воздух не оказался в зоне прямого влияния на

показания датчика. Время измерения не менее 10 минут. По завершению измерений в протокол измерений заносились средние показатели концентраций за период измерений. В таблице 2.2 приведены фактические расстояния между измеряемыми поперечными сечениями горной выработки от груди проходческого забоя.

Таблица 2.2 - Расстояния между поперечными сечениями горной выработки (составлено автором)

Место в горной выработке	Расстояния от груди забоя, м	Расстояние от предыдущего сечения
Забой	0	-
Вент. Став	15	15
Выхлоп СДО	23	8
I	36,6	13,6
II	44,9	8,3
III	54,4	9,5
IV	62,9	8,5
V	69,4	6,5
VI	78	8,6
VII	84,2	6,2
VIII	93,6	9,4
IX	104,6	11
X	113,1	8,5
XI	123,3	10,2
XII	133,95	10,65

Измерение геометрических размеров выхлопной трубы осуществлялись непосредственно на месте или путем снятия отпечатка на лист бумаги для последующего более точного определения.

Для оценки влияния расхода свежего воздуха на значения концентраций CO и NO_x в воздушной среде тупиковой выработки его расход обеспечивался равным: 210 м³/мин (2.5 м³/мин/л. с); 130 м³/мин (1.55 м³/мин/л. с). Данное изменение расхода обеспечивалось регулированием сечения всасывающей камеры с помощью металлической заслонки [119, 121, 123].

2.3 Результаты инструментальных замеров концентраций CO и NO_x в воздухе при работе погрузочно-доставочной машины ST-2D

Для проведения натурных исследований была выбрана погрузочно-доставочная машина ST-2D (СДО №1), используемая при проходке горной

выработки, причем продолжительность её эксплуатации после последнего капитального ремонта на момент проведения замеров составила приблизительно девять тысяч моторных часов, что превосходило продолжительность работы других машин с ДВС машинного парка рудника. Более значительная продолжительность эксплуатации погрузочно-доставочной машины ST-2D вследствие ухудшения работоспособности устройства фильтрации выхлопных газов и изменения соотношения между компонентами топливной смеси приводила к более высоким значениям выбросов загрязняющих веществ и негативному воздействию на воздушную среду, что, в свою очередь, определяло необходимость повышения количества воздуха. То есть, для проведения эксперимента был выбран наиболее худший сценарий, который позволил установить необходимое количество воздуха с «определённым» запасом. Погрузочно-доставочной машины ST-2D оснащена четырёхтактным дизелем объёмом шесть целых сто двадцать восемь сотых литра, развивающим максимальную мощность порядка 84 лошадиных сил.

Результаты измерения концентраций монооксида углерода (CO) и оксидов азота (NO_x) в указанных сечениях тупиковой выработки при её нахождении машины в забое под погрузкой при движении к устью выработки при различных расходах воздуха представлены на рисунке 2.5 и в таблицах 2.3 и 2.4.

Их анализ позволил сформулировать закономерности формирования аэрогазодинамического режима в тупиковой выработке при работе машины с ДВС.

Согласно результатам измерений при нахождении машины в забое концентрация монооксида углерода (CO) при удельном расходе воздуха 3,5 м³/мин на л.с. становится условно постоянной в границах предельно допустимой концентрации лишь на удалении 13,6 м (соответствующем поперечному сечению I). В тоже время, концентрации оксидов азота (NO_x) уменьшается до нормативных пределов лишь на отдалении 61,2 м (поперечное сечение VII) от источника выбросов.

При условии подачи удельного количества воздуха, соответствующем величине 2,5 м³/мин на одну л.с., концентрация оксидов азота превышает

установленный предел допустимой концентрации только вначале тупиковой выработки.

Аналогичная ситуация складывается при уменьшении подачи воздуха до 1,55 м³/мин на л.с., превышение установленной ПДК по содержанию NO_x достигает отметки значительно больше в сравнении с другими вариантами.

2.4 Расчёт выбросов загрязняющих веществ и необходимого количества воздуха для обеспечения нормативных значений воздуха для машинного парка рудника

На основе выполненных инструментальных измерений получены данные, характеризующие объёмные концентрации монооксида углерода (CO) и оксидов азота (NO_x), включая их температуры. Измерения производились при работающих самоходных доставочных машинах, которые были оборудованы двигателями внутреннего сгорания, в условиях ограниченного объёма подземной горной выработки.

Основываясь на результатах эксперимента, были построены графики зависимостей, отображающие среднеарифметические значения концентраций каждого компонента в составе выхлопных газов (рисунок 2.6).

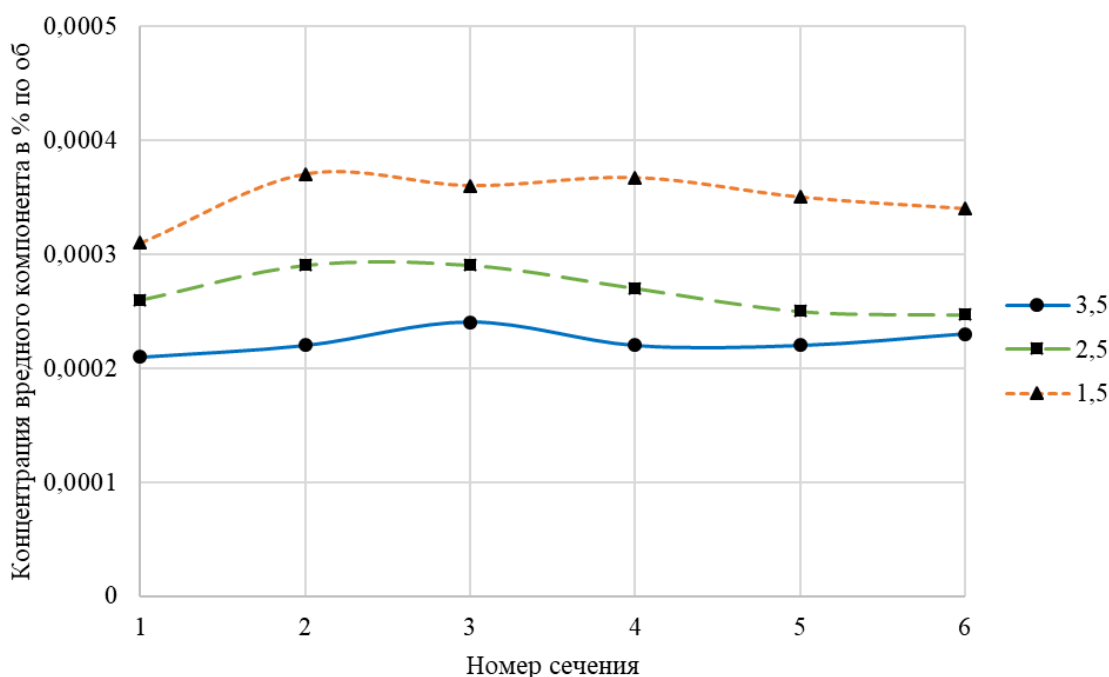


Рисунок 2.6 - Изменение средних значений концентраций в поперечных сечениях при различном удельном расходе свежего воздуха (составлено автором)

Удельная величина интенсивности выбросов CO и NO_x из выхлопной трубы СДО ($J_{уди}$) рассчитывалас по следующей формуле (1):

$$J_{уди} = \frac{10C_iMPvS}{RTN}, \text{ в мг/с на 1 л.с.} \quad (1)$$

где C_i – объёмная концентрация загрязняющего компонента в выхлопных газах, %;

v – скорость выхлопных газов, м/с;

S – поперечное сеченье выхлопного тракта в месте измерения скорости потока, м²;

N – мощность ДВС, л.с.;

M –молярная масса компонента;

P – полное давление выхлопных газов, вычисленное как сумма барометрического давления в выработке и динамического давления. Па;

T – температура газов, К.

Расход воздуха вычислялся по формулам, предполагающим статическое разжижение загрязняющих веществ по формуле (2):

$$Q=J/C_{пдж} \quad (2)$$

Результаты вычислений представлены в таблице 2.3.

Максимальная интенсивность выбросов оксидов азота зарегистрирована для двух вариантов самоходного горнотехнического оборудования (СДО № 1 и СДО № 17). Оба варианта были оснащены одготипными двигателями и отличались большей продолжительностью работы двигателя (моторесурсом) по сравнению с другими исследуемыми моделями. Эксплуатация этих единиц техники потребовала повышения количества свежего воздуха для компенсации более значительных концентраций токсичных компонентов в продуктах сгорания дизельного топлива.

Величины содержания монооксида углерода и оксидов азота в зоне дыхания водителя (внутри кабины) для остальных вариантов автопарка горнотранспортной техники представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.3 - Результаты замеров концентраций загрязняющих веществ, площади поперечного сечения и параметров выбросов, а также рассчитанные минимальные требуемые величины удельного количества воздуха, необходимого для снижения концентраций компонентов выхлопных газов до ПДК (составлено автором)

Номер СДО	Мощность ДВС, л.с.	Объем ДВС, л	Площадь сечения ВГ, м ²	Температура ВГ, °С		Расход ВГ, м ³ /мин		СО,	NO _x ,	Требуемый удельный расход, м ³ /мин /л.с.
				холостой ход	максимальные обороты	холостой ход	максимальные обороты	% по объёму		
СДО № 1	84	6,128	0,0042	122	163	6,38	11,62	0,032	0,0118	3,51
СДО № 2	75	3,6	0,0041	27	34	3,80	19,61	0,021	0,0038	2,93
СДО № 3	88,37	6,5	0,0031	59	89	4,12	23,94	0,02	0,0041	2,15
СДО № 4	217,54	7,7	0,0086	173	196	5,81	20,08	0,03	0,007	2,65
СДО № 5	165	10,5	0,0184	83	102	2,82	11,80	0,018	0,0039	3,06
СДО № 6	232	7,1	0,0099	20	180	3,18	10,29	0,045	0,009	2,35
СДО № 7	150	6,472	0,0065	60	75	2,83	11,68	0,042	0,009	2,94
СДО № 8	220	6,7	0,0065	70	103	4,34	16,87	0,052	0,0089	2,84
СДО № 9	102	4,04	0,0039	165	193	4,25	17,47	0,04	0,0088	2,85
СДО № 10	175	4,8	0,0035	163	183	2,99	17,98	0,055	0,0095	1,77
СДО № 11	163,15	4,8	0,0068	102	115	6,38	9,58	0,043	0,0085	1,97
СДО № 12	78,86	6,5	0,0125	140	200	2,38	5,41	0,038	0,0072	2,93
СДО № 13	176	6,6	0,0066	60	79	4,06	17,78	0,037	0,0064	2,91
СДО № 14	75	3,6	0,0057	45	89	4,11	20,08	0,017	0,003	2,93
СДО № 15	163,15	12,8	0,0056	121	177	9,02	13,71	0,062	0,0092	2,68
СДО № 16	217,54	7,7	0,0086	173	196	5,94	19,68	0,035	0,008	2,96
СДО № 17	103,3	6,5	0,0118	36	46	1,26	4,45	0,033	0,009	3,20

Таблица 2.4 - Результаты измерения концентраций выхлопных газов в кабине водителя при движении транспортного средства (составлено автором)

Номер СДО	Удельный расход, м ³ /мин /л.с. (Q _{уд})	Концентрации компонентов в кабине	
		СО, % по объёму	NO _x , % по объёму
СДО № 1	3,50	0,00005	0,00002
СДО № 2	7,52	0,00020	0,00002
СДО № 3	6,99	0,00015	0,00003
СДО № 4	6,51	0,00014	0,00002
СДО № 5	7,49	0,00022	0,00004
СДО № 6	7,50	0,00012	0,00002
СДО № 7	6,52	0,00019	0,00003
СДО № 8	6,00	0,00020	0,00004
СДО № 9	6,00	0,00019	0,00004
СДО № 10	6,51	0,00020	0,00003
СДО № 11	6,51	0,00005	0,00002
СДО № 12	6,47	0,00004	0,00002
СДО № 13	6,00	0,00012	0,00004
СДО № 14	6,48	0,00009	0,00002
СДО № 15	5,99	0,00015	0,00003
СДО № 16	7,50	0,00017	0,00003
СДО № 17	6,51	0,00007	0,00002

Вычисленные значения удельного расхода воздуха для разбавления выхлопных газов при работе ДВС сравнены с нормативами, используемыми применительно к однотипным двигателям в США (таблица 2.5).

Таблица 2.5 - Сравнение нормативных значений удельного расхода для США с величинами, вычисленными для подземного рудника (составлено автором)

Наименование самоходной техники	Мощность ДВС, л.с.	Объем ДВС, л	Требуемый расход по нормам США м ³ /мин/л.с	Требуемый удельный расход, м ³ /мин /л.с.
СДО № 1	84	6,128	1,7	3,51
СДО № 2	75	3,6	1,05	2,93
СДО № 3	88,37	6,5	1,7	2,15
СДО № 4	217,54	7,7	0,97	2,65
СДО № 5	165	10,5	1,8	3,06
СДО № 6	232	7,1	1,1	2,35
СДО № 7	150	6,472	1,7	2,94
СДО № 8	220	6,7	1,25	2,84
СДО № 9	102	4,04	1,7	2,85
СДО № 10	175	4,8	1,17	1,77
СДО № 11	163,15	4,8	1,13	1,97
СДО № 12	78,86	6,5	2,18	2,93
СДО № 13	176	6,6	1,09	2,91
СДО № 14	75	3,6	1,16	2,93

Продолжение Таблицы 2.5

Наименование самоходной техники	Мощность ДВС, л.с.	Объем ДВС, л	Требуемый расход по нормам США м ³ /мин/л.с	Требуемый удельный расход, м ³ /мин /л.с.
СДО № 15	163,15	12,8	1,63	2,68
СДО № 16	217,54	7,7	0,97	2,96
СДО № 17	103,3	6,5	1,45	3,20

В большинстве случаев американские нормативные величины удельных расходов воздуха, оказываются ниже рекомендованных нами для подземного рудника в 1,5 – 2,5 раза, что связано, во-первых, с тем, что эти нормативы характеризуют новые двигатели, а во-вторых, с менее жесткими ПДК по исследуемым загрязняющим веществам, используемыми в США. То есть можно говорить о том, что данные стандарта США характеризуют нижнюю границу удельных расходов воздуха для исследуемых машин с ДВС. В условиях подземного рудника, как показали наши оценки, для обеспечения безопасности эти значения должны быть выше.

2.5 Выводы по главе 2

Проведённые экспериментальные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Эксплуатация техники с двигателем внутреннего сгорания в условиях подземной добычи полезных ископаемых сопровождается выделением продуктов сгорания топлива, содержащих значительное количество опасных химических соединений, среди которых доминируют оксид углерода и оксидов азота. Для предотвращения превышения установленных нормативных значений концентраций вышеперечисленных загрязняющих воздушную среду веществ осуществляется проветривание рабочих зон посредством подачи необходимого объёма свежего воздуха. Ключевым критерием расчёта требуемого количества воздуха является показатель его удельного расхода Q (м³/мин/л.с.) на единицу установленной мощности двигателя. Значение данного показателя определяется совокупностью различных условий и обстоятельств, важнейшими из которых выступают уровень экологической безопасности оборудования, эффективность

функционирования устройств нейтрализации выхлопных газов и длительность рабочего цикла конкретной единицы техники.

2. Разработанная методика измерений содержания монооксида углерода и окислов азота в продуктах сгорания двигателей внутреннего сгорания и последующий анализ качественного и количественного состава подземной воздушной среды в горных выработках и рабочих зонах предусматривала проведение серий экспериментов по определению необходимого и достаточного объёма подачи свежего воздуха, обеспечивающего соблюдение регламентированных величин состава шахтной воздушной среды.

3. Изменение количества подаваемого расхода воздуха при нагнетательном проветривании тупиковой выработки диапазоне значений от 2,17 м³/с до 4,9 м³/с осуществлялся за счёт ручного изменения аэродинамического сопротивления воздуховода.

ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ РАБОТЕ В НЕЙ МАШИНЫ С ДВС

3.1 Принципы использования математического моделирования аэрогазодинамических процессов в тупиковой горной выработке при работе в ней машины с ДВС

Полученные в результате натурных исследований значения выбросов использованы далее для осуществления математического моделирования аэрогазодинамических процессов при разбавлении выхлопных газов свежим воздухом. Результаты численных расчетов были сопоставлены с результатами натурных исследований полей концентраций загрязняющих веществ (CO и NO_x) в рудничном воздухе.

В настоящее время под значением «модель» понимается или некоторый тип требуемого вида предмета, или прототип некоторого предмета, системы. Математическая модель — это некий образ объекта исследования, комплексной системы или значения показателя в каком-то виде, отличающегося от прототипа их реального. Модель является систематическим комплексом, который существует в объективном соответствии с изучаемым объектом и отображает в себе определённые значимые для исследования его параметры и характеристики, и содержащий в ходе исследования информацию о реальном объекте. Ход и процесс создания и исследования модели принято называть процессом моделирования. Помимо всего прочего, модели описывают закономерности, свойственные реальному объекту, при включении формул и выражений математического характера, и, в связи с этим, именуется математическими. Разбор исходных данных требуется для конкретизации условий нахождения математических моделей. К ним можно отнести имитационные. Они используются в технически развитом уровне развития технологий математической техники и правилам задач по оптимизации. Математической моделью изучаемой системы является определённый комплекс математических уравнений и формул, который характеризует присущие изучаемой системе автономии и правила, находящиеся в

аналогичной зависимости с начальной системой. Комплекс математических уравнений и формул описывает самые важные зависимости исследуемой системы и предоставляющие в ходе исследования требуемые и необходимые для решения назначенной задачи данные. Математическая модель является выраженной математической зависимостью, выходные данные которой дают найти особенности и нужные параметры процесса изучаемой начальной системы. Выходные данные системы математического моделирования определяются вычислением и нахождением решения комплекса математической задачи.

Недостаточное разбавление и несоответствие концентраций вредных газов, находящихся в рудничной атмосфере, приемлемым кондициям, а именно установленным ПДК (Предельно допустимым концентрациям), а также длительное пребывание в зоне загрязнения негативно влияет на здоровье и состояние работников [126]. Повсеместно используемая эксплуатация самоходной техники с ДВС ухудшает контроль воздействия на рабочих субмикронных аэрозолей и отработанных токсичных газов. В связи с этим возникает необходимость в разработке комплексной программы для защиты персонала. Она должна основываться на многоуровневом и комплексном подходе к безопасности [122]. Известно, что на качество разбавления влияют такие факторы как турбулентность вихревого потока, тепло- и массообмен. Их формулировки SST и DES, текущее состояние и направления дальнейшего развития постоянно корректируются и улучшаются [113]. В своей научной статье Е. В. Накаряков и Е. Л. Гришин анализируют влияние производственного цикла эксплуатации ПДМ в очистном, тупиковом забое и камере на эффективность вентиляции [35]. Результатами данной работы является получение показателя экспоненциального характера возрастания концентраций отработанных, токсичных газов. Этот показатель достигает максимальных асимптотических значений к началу третьего цикла работы ПДМ. Также в течение всего процесса работы машины наблюдались непродолжительные, пиковые пределы превышения норм ПДК значений такого газа как СО в пределах сечения. Данные результаты свидетельствуют о требуемом определении максимального времени пребывания ПДМ в забое выработки.

Для контроля аэродинамических процессов, прогнозирования движения воздушных потоков в горных выработках, оценке основных характеристик проветривания, воздухораспределения и разбавления в последнее время всё чаще стали использоваться численные и математические методы моделирования в различных программных комплексах [103]. В численном моделировании резкого, объёмного выброса монооксида углерода СО в атмосферу выработки в результате взрывных работ на дорожном полотне разных стадий рудника были сделаны выводы выявлены пространственно-временные характеристики развития данного газа, границы, образующийся при взрыве вихревой зоны, распределение массовой концентрации газа в поперечном сечении. Также были получены следующие основные результаты. С уменьшением высоты сокращается и время проветривания, требуемое для понижения концентрации СО до ПДК, и повышается к диффузии этого газа. С увеличением длины от отверстия воздуховода и рабочей поверхностью, и объемом воздушного потока, повышается и к рассеивания СО в зоне дорожного покрытия, что может привести к лучшему разбавлению. Два Данных коэффициента пропорционально зависимы между собой. Временной интервал, за время которого концентрация по массе СО повышается до момента прямого контакта при разных условиях деятельности, может составлять примерно от $7 \cdot 10^2$ с до $9 \cdot 10^2$ с. В результате проведения сравнительного анализа, было выявлено, что на показатель концентрации СО, образующегося после взрывных работ дорожного полотна, в значительнейшей степени оказывает влияние длина между началом воздухораспределительного отверстия и рабочей поверхностью. Одновременно с этим объемный фактор проветривания по разбавлению и устранению токсичных и вредных загрязняющих газов в пределах дорожного полотна в режиме принудительного проветривания был лишь второстепенной величиной, тогда как высота влияла достаточно ограниченно. к корреляции также учитывался в работах. Амосов П.В. в своём исследовании в области аэродинамического моделирования тупиковых выработок при беструбном способе проветривания смог создать двухмерные компьютерные модели на основе

программного кода COMSOL, что позволило добиться следующих важных показателей [4]:

- возможность моделирования с изменением параметров и месторасположения компактных вентиляторов в устье выработки.

- моделирование происходит в условиях турбулентного движения воздуха в крайнем приближении к совокупности жидкости несжимаемой и модели турбулентности стандартного формата.

Изменение представления о применении теории свободных турбулентных струй по отношению к вентиляции тупиковых выработок беструбным способом [24].

В статье Sobamowo M.G. «Mathematical models for the prediction of the effects of carbon-monoxide on human health under continuous and periodic exposures».[120] («Математические модели для прогнозирования воздействия монооксида углерода на здоровье человека при непрерывном и периодическом воздействии») автор подчёркивает, что в настоящее время необходимо активно противостоять угрозам общих загрязнения и редуцирующей составляющей окружающей среды. Sobamowo M. G. Предлагает использовать математическое моделирование и математические, компьютерные модели для прогнозирования и создания стратегий по оцениванию, нахождению рисков и угроз. В статье автор освещает созданные математические модели для определения СО (Оксид углерода) и СОНб (карбоксигемоглобин) в человеческой крови, у персонала, который регулярно взаимодействует с источником загрязнения [102].

В исследованиях Jundika C. Kurnia, Agus P. Sasmito, Wai Yap Wong, Arun S. Mujumdar, «Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines» («Прогнозирование и инновационные стратегии контроля кислорода и опасных газов, образующихся в результате выбросов дизельного топлива в подземных шахтах») был предложен и исследован ряд прорывных в научной сфере типов проветривания для управления содержанием O_2 и вредных отработанных выхлопов в подземных горных выработках с целью контроля ПБ, работоспособности и расходов использования

электрической энергии. Движение воздушных масс, распределение O_2 и вредных отработанных выхлопных газов и температурный режим окружающей атмосферы в области осуществления работ анализируются с применением результативного и положительно оцениваемого способа математической модели газодинамического состояния (CFD). По итогам работ было выявлено, что предложенная автором модель вентиляции горных выработок имеет лучшие показатели проветривания по сравнению со стандартным вариантом проветривания. Данное исследование демонстрирует математическую модель разбавления отработанных, вредных, выхлопных газов и рассредоточение температурных потоков и областей в зонах шахтных горных работ. Помимо этого, было установлено воздействие расположения выхлопной трубы автомобилей на разделение воздушных потоков, анализировалось со стороны неопасности подземного персонала, степени производительности труда и участка и экономии электрической энергии. Работы автором позволяют выделить ряд инновационных вариантов для проектирования экономически выгодной и безопасной системы проветривания подземных горных выработок для регулирования подачи O_2 и выбросов разбавления отработанных, вредных, выхлопных газов. В рамках дальнейших исследований, авторы планируют освоить использование инновационной системы проветривания с непостоянным воздушным потоком для проверки содержаний отработанных, вредных газов в подземных сооружениях. Помимо этого, в следующих исследованиях планируется изучение наиболее производительного двигателя внутреннего сгорания с использованием дизельного топлива с целью моделирования распределения содержаний выхлопных газов и твёрдой фазы от легкового, средней тяжести и тяжёлого дизельного транспорта для определённых условий.

3.2 Численное моделирование технологического цикла работы дизельного транспортного средства с ДВС в тупиковой горной выработке

В настоящее время математическое моделирование является важнейшей областью знаний в сфере подземного горного производства. Компьютерные и вычислительные методы позволяют определить и визуализировать, или даже

спрогнозировать процессы, которые представляют наибольший интерес в ходе горных работ.

Существует широкий спектр программных комплексов, позволяющих реализовать указанные варианты анализа данных. Численный метод основывается на методе конечных элементов (МКЭ), который включает в себя разрешающие уравнения МКЭ, а также граничные и начальные условия. Основные принципы МКЭ заключаются в следующем: любые непрерывные величины, такие как перемещение, температура, давление и другие, могут быть аппроксимированы с помощью применения дискретных моделей. Построение подобной модели осуществляется посредством использования набора кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе подобластей — элементах (КЭ). Эти кусочно-непрерывные функции задаются значениями непрерывной исследуемой величины в ограниченном числе точек, называемых узлами. Значение исследуемой переменной в каждом узле модели определяется переменной, которая подлежит нахождению в процессе решения задачи.

Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе функцией, которая определяется с помощью узловых значений этой величины. Непрерывность величины сохраняется вдоль границ элемента; Объекты исследования могут иметь различную форму и физическую природу, будь то твердые тела, жидкости, газы или электромагнитные среды и др. Начальным объектом для МКЭ является какое-либо тело или материальный объект (т.е. объёмная область, заполненная некоторой средой имеющей сплошность. Газ, жидкость, воздух и т.п.). Такой объект при помощи метода МКЭ делится на определённые части (для этого строится сетка на границах). Эти элементы называются конечными элементами [12].

Математическое моделирование включала в себя следующие основные этапы:

1. Расчёт распределения концентраций вредных компонентов выхлопных газов для стационарно стоящей в забое машины в течение определённого времени.

2. Расчёт распределения концентраций вредных компонентов выхлопных газов для последующего движения ПДМ к устью выработки, учитывающий предшествующее распределение п.1

Выполнено моделирование процесса рассеивания выхлопных газов при параметрах соответствующим натурным замерам (расходе воздуха в выработке, соответствующем фактическим замерам, поперечном сечении выработки и др.). Моделирование выполнялось в специализированном программном комплексе ANSYS с использованием решателя CFX [65,68,101].

Вычислительное моделирование включает в себя следующие этапы:

- анализ исходных данных. Задание граничных условий, формирование перечня расчетных случаев. Определение допущений.
- построение трехмерной системной модели расчетной области.
- построение конечно-элементной расчетной сетки на основе блочно-структурированных вычислительных сеток.
- проведение расчетов.
- обработка и анализ результатов моделирования.

Параметры расчета

Для выполнения поставленной задачи средствами вычислительного моделирования использовались следующие исходные данные [28,112]:

- геометрические параметры исследуемого объекта (длина, ширина, высота, площадь сечения);
- параметры системы вентиляции (расход воздуха, температура свежей струи);
- параметры работы ДВС (расход выхлопных газов и концентрация в них вредных веществ).

Объект исследования представляет собой свободный объем горной выработки, в котором рассматривается движение и теплообмен воздушных потоков при различных условиях работы ДВС [8,39].

Рассматриваемый свободный объем ограничен кровлей, почвой и боками горной выработки.

При построении геометрической модели источника выброса учитывались основные геометрические параметры такие как размер и местоположение выхлопного тракта.

В качестве исходных данных использовались результаты натурных измерений для задания входного граничного условия на поступление свежей струи воздуха и концентрации и расхода выхлопных газов.

Принятые допущения [29]

В ходе выполнения моделирования для упрощения расчетов были приняты следующие допущения:

- 1) тепловыделения от СДО определяются только температурой и расходом выхлопных газов;
- 2) теплопоступления в модель от горных пород не учитывались;
- 3) не учитывалось влияние давления в выработке на характеристику работы вентиляторов, поскольку на протяжении всего времени моделирования подача воздуха задавалась с фиксированными расходом и температурой.

Поток газов задавался как многокомпонентный (multicomponent flow). В его состав входили компоненты: воздух, монооксид углерода (CO), монооксид азота (NO) и диоксид азота (NO₂). Соотношение концентраций NO и NO₂ фиксировалось согласно результатам натурных измерений в соотношении 8:1. Значения концентраций оксидов азота оценивалось как сумма объемных концентраций NO и NO₂.

При выборе модели турбулентности учитывались особенности рассматриваемого процесса. Так как срыв потока в рассматриваемой модели ожидается в окрестности выхлопной трубы и самого ШАС, выбрана модель турбулентности Shear Stress Transport (SST) [108,109,117]. Такая модель турбулентности позволяет учитывать процесс разделения потока при неблагоприятных градиентах давления [87,110].

SST модель основана на линейной комбинации $k-\omega$ модели Вилкокса (формулы 3, 4) в приповерхностных областях и $k-\epsilon$ модели вдали от поверхностей [127,105,95].

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho C_\mu k \omega, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega^2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta_3 \omega^2, \quad (4)$$

Турбулентная вязкость определяется равенством (формула 5):

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}, \text{ мг/с.} \quad (5)$$

Расчет проводился в стационарном режиме (Steady state), при этом время прохождения воздушной струи через модель задавалось исходя из средней скорости потока струи и длины выработки [78].

Для решателя были установлены следующие настройки для критерия сходимости: тип невязки - среднеквадратическая невязка (RMS Convergence criteria) задавался равным 10^{-6} .

Построение вычислительной сетки [9,45,54]

Задача построения расчетной сетки состоит в нахождении преобразования, которое переводит узлы сетки из физической области в вычислительную. Процесс построения конечно-элементной сетки может осуществляться двумя методами:

1) автоматическое построение сетки с применением стандартных настроек программы, активируемых перед началом расчёта. Предварительный визуальный контроль результата возможен посредством опции предварительного просмотра (Preview), что позволяет убедиться в адекватности структуры сетки условиям решаемой задачи.

2) ручная настройка параметров генерации сетки, осуществляемая пользователем вручную. Пользователь индивидуально выбирает топологию и ключевые параметры сети, исходя из особенностей решаемой задачи и поставленных целей.

Основная задача построения расчётной сетки состоит в определении координат узлов сетки из пространства в вычислительную форму.

Данная модель должно удовлетворять следующим требованиям:

- должно обеспечивать однозначность соответствия точек физического и вычислительного пространств.

- густота распределения узлов сетки должна увеличиваться в регионах, где существует наличие больших градиентных изменений целевых функций.

- формы границ сетки должны обладать гладкой структурой, необходимой для поддержания непрерывности частных производных искомым функций.

- конфигурация сетки должна стремиться к максимальной близости к ортогональной структуре, что подразумевает угол пересечения соседних границ элементов, близкий к прямому углу.

- соотношение длин сторон отдельных ячеек сетки не должно сильно отклоняться от единицы, обеспечивая однородность свойств элементарных областей элементов сетки.

В случае упорядочивания множества узловых точек расчётной сетки, последняя классифицируется как регулярная или структурированная. Использование структурированных сеток, в отличие от неструктурированных аналогов, обычно обеспечивает сокращение временных затрат на выполнение расчетов и уменьшение требуемого объема оперативной памяти вычислительной системы. Однако создание криволинейных сеток в общем случае представляет собой трудоемкую процедуру, требующую значительных ресурсных вложений по сравнению с процессом конструирования неупорядоченных сеток. При принятии решения о выборе метода построения сеток рекомендуется учитывать ряд факторов:

1. Структурированные сетки обеспечивают более высокую точность аппроксимации по сравнению с неструктурированными сеточными моделями.

2. Решение задач, содержащих сильные скачки плотности (волны), эффективнее реализовано на структурированных сетках по сравнению с неструктурированным подходом.

3. Алгоритмы, основанные на структурированных сетках, отличаются простотой ввиду отсутствия необходимости учета дополнительной информации о связях между соседними элементами (ячейки, рёбра, грани, ориентация, длина и др.), обязательной при обработке неструктурированных сеток.

4. Формирование структурированных сеток вокруг тел со сложной формой сопряжено с большими временными затратами и рисками появления искажённых ячеек, негативно влияющих на точность моделирования.

5. Ключевым достоинством неструктурированного подхода является его адаптивность, позволяющая создавать точные сетки, оптимально отражающие границы сложных геометрических областей, особенно в трёхмерных моделях, с минимизацией вычислительных усилий.

6. Настройка сетки под конкретные условия задачи существенно легче реализуемой в неструктурированном подходе по сравнению со стандартными схемами.

Элементы сетки должны получаться из базисных с помощью взаимно-однозначного невырожденного преобразования. Характеристиками деформации сеточного элемента служат отношения длин ребер элемента, углы между соприкасающимися ребрами и т. д. При построении расчетных сеток необходимо учитывать перечисленные выше характеристики. Следует помнить, что наилучшей для расчета можно считать такую сетку, которая позволит достигнуть максимальной эффективности при вычислении искомых физических величин в заданной геометрии.

Нужно отметить, что существует несколько способов контроля за плотностью сетки. При построении сеточной модели необходимо искать оптимальную дискретность сетки, учитывать при этом, задействованные ресурсы вычислительной системы (память, время и т.д.) и точность вычислений. Сетка с большим количеством узлов позволяет находить более точное решение, но увеличивает расчетное время и объем памяти. В идеале решение не должно зависеть от плотности сетки. Измельчение сетки не компенсирует допущения физической модели и ошибки входных данных.

Формируемые элементы сеточной модели должны однозначно создаваться эталонными элементами посредством регулярного преобразования. Параметры искажений элементов сетки включают коэффициенты пропорциональности длины ребер, угол между прилежащими рёбрами и прочие аналогичные показатели. При

создании конечно-элементных сеток необходимо руководствоваться критериями, поскольку оптимальным считается такое распределение узлов сетки, которое обеспечивает максимальную эффективность вычислений исследуемых физических величин в заданной области.

Следует подчеркнуть, что существуют разнообразные подходы к контролю над качеством сетки. В процессе проектирования сеточной модели важно соблюдать баланс между размером сетки и доступными ресурсами вычислительной системы (оперативная память, временные затраты и прочее), учитывая одновременно требуемую точность результатов.

Увеличение числа узлов улучшает качество и снижает погрешность решения, однако влечет рост временного ресурса и повышенные требования к объему доступной памяти. Идеальным решением является достижение ситуации, при которой искомое решение не чувствительно к изменению шага сетки. Необходимо понимать, что уплотнение сетки не способно компенсировать некорректность самой физической модели или ошибку вводных данных, граничных условий.

Настройки окна *Span Angle Center* (центр диапазона углов) регулируют размеры элементов на ребрах с учетом кривизны последних. Сетка будет генерироваться на областях с разной кривизной до тех пор, пока отдельные элементы не уложатся в соответствующий диапазон. Возможны следующие варианты:

В некоторых продуктах конечно-элементную сетку можно изменять двумя способами:

1. Задавать расширенные опции изменения плотности сетки (*Use Advanced Size Function*) в окне настроек.

2. Изменять сетку глобально по всему объему через изменение.

Параметры окна регулировки угла центрального диапазона (*Span Angle Center*) определяют размеры элементов сетки на искривлённых рёбрах, адаптируя их к изменениям кривизны поверхности таким образом, чтобы соблюдались установленные угловые ограничения. Предусмотрены три возможных варианта выбора сетки:

- Coarse (грубая сетка) — в диапазоне углов от 91° до 60°;
- Medium (средняя сетка) — в диапазоне углов от 75° до 245°;
- Fine (тонкая сетка) — в диапазоне углов от 36° до 12°.

В ряде программных пакетов имеется возможность модификации конечно-элементной сетки двумя основными способами:

1. Задание усовершенствованного функционала для вариаций плотности сетки (Use Advanced Size Function) в диалоговом окне настроек.

2. Изменение сетки по всему объекту путем редактирования следующих параметров: размер элементов (Element Size) задает среднюю длину ребра каждого элемента. Используется фильтр выбора сторон элементов и выбирается репрезентативное ребро элемента (например, по жесткости). Для изменения размера элемента по умолчанию нужно в строку Element Size ввести желаемое значение размера элемента.

Параметр «Размер элемента» (Element Size) задает среднюю длину ребра сеточного элемента. Реализован механизм отбора стороны элемента с использованием фильтра, позволяющего выбрать репрезентативный элемент (например, по показателю жесткости). Для переопределения значения размера элемента, задаваемого по умолчанию, необходимо вручную указать требуемое значение в строке ввода соответствующего параметра.

Параметр «Подобие и кривизна» (Proximity and Curvature) предназначен для автоматического уменьшения размеров элементов сетки в зонах повышенной кривизны рёбер. Данный параметр настраивается в диапазоне от минус ста до плюс ста процентов. Если стандартная настройка размера элемента (Element Size) установлена в автоматическом режиме (Default), параметр Proximity and Curvature выполняет аналогичную функцию, как коэффициент плотности сетки (Relevance) в стандартной версии настроек сетки.

Функция кривизны (Proximity) задействуется для вытягиваемых тел или при активации специальной опции.

Проверка формы (Shape Checking) задает контроль формы элементов. Для линейного анализа используется стандартный способ (Standard Mechanical), для

нелинейного и гидрогазодинамического анализа задаются более жесткие требования к форме элементов (Aggressive Mechanical) Процедура «Контроль формы элементов» (Shape Checking) предназначена для подтверждения правильности геометрических составляющих элементов сетки. При выполнении линейного анализа применяется стандартный подход (Standard Mechanical), тогда как для нелинейных и гидродинамических расчётов устанавливаются ужесточённые критерии оценки формы элементов (Aggressive Mechanical).

На начальном этапе моделирования для всех объектов исследования проводилось построение тетраэдрической структурированной сетки с дополнительным измельчением в области выхлопной трубы.

Размер ячеек 0,2 м с дополнительным уменьшением ячеек в области выхлопной трубы до 0,02 м;

Общее количество ячеек вычислительной сетки составило примерно 4,3 млн;

Моделирование рабочих характеристик расхода и температурных параметров подачи газовых потоков в подземные горные выработки выполняется посредством задания начальных условий на границах расчетной зоны и выходного сечения трубы, обеспечивающей выброс отработанных газов в атмосферу выработки.

Для входной границы системы устанавливается среднее значение скорости воздушного потока и его температуры. Что касается граничных условий выхлопной трубы, то здесь определяются показатели скорости выбрасываемого газа, концентрации оксида углерода (CO), оксидов азота (NO и NO₂) в составе отходящих газов, а также их температурные характеристики, полученные в результате экспериментальных данных [15, 100, 98].

Для выходной границы рассматриваемой модели применяется условие нулевого избыточного давления, что обеспечивает формирование свободного потока газа, необходимого для соблюдения баланса массы.

На поверхностях горных выработок, подверженных воздействию воздушных потоков, устанавливаются граничные условия, учитывающие влияние

шероховатости стенок горной выработки, характеризующихся величиной шероховатости порядка 0,05 м.

Параметры расчетной модели:

- скорость потока у стенки равна скорости стенки;
- входящий поток свежей струи в модель задан как объёмный расход согласно результатам натурных измерений;
- концентрация компонентов в выхлопных газах задана согласно результатам натурных измерений;
- плотность воздуха определялась как для идеального газа;
- среднее атмосферное давление задавалось согласно результатам натурных измерений.

Проверка адекватности математической модели.

Для оценки адекватности построенной компьютерной модели необходимо произвести валидацию компьютерной математической модели. Также необходимо определить, насколько построенная модель чувствительна к небольшому изменению входных условий.

Первоначально необходимо сопоставить степень соответствия построенной модели реальному объекту. Сравнительные характеристики представлены в таблице 3.1 с учётом отклонений модельных данных от реальных.

Таблица 3.1 - Сравнительные характеристики отклонений модельных данных от реальных (составлено автором)

Параметр	Значение в эксперименте	Значение в модели
Площадь поперечного сечения горной выработки	12	12
Шероховатость стенок горной выработки	0,01-0,08	0,05
Температура воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода	15	15
Температура воздуха в устье выработки	17	17
Удельный расход свежего воздуха, поступающего в модель на л.с. мощности ДВС	3,5	3,5

Процесс проверки модели включал в себя сопоставление результатов моделирования с известными реальными данными.

В рамках данного исследования измеренные значения концентраций оксидов азота в 9 точках сечения сравнивались с аналогичными полученными значениями модели (рисунок 3.1).

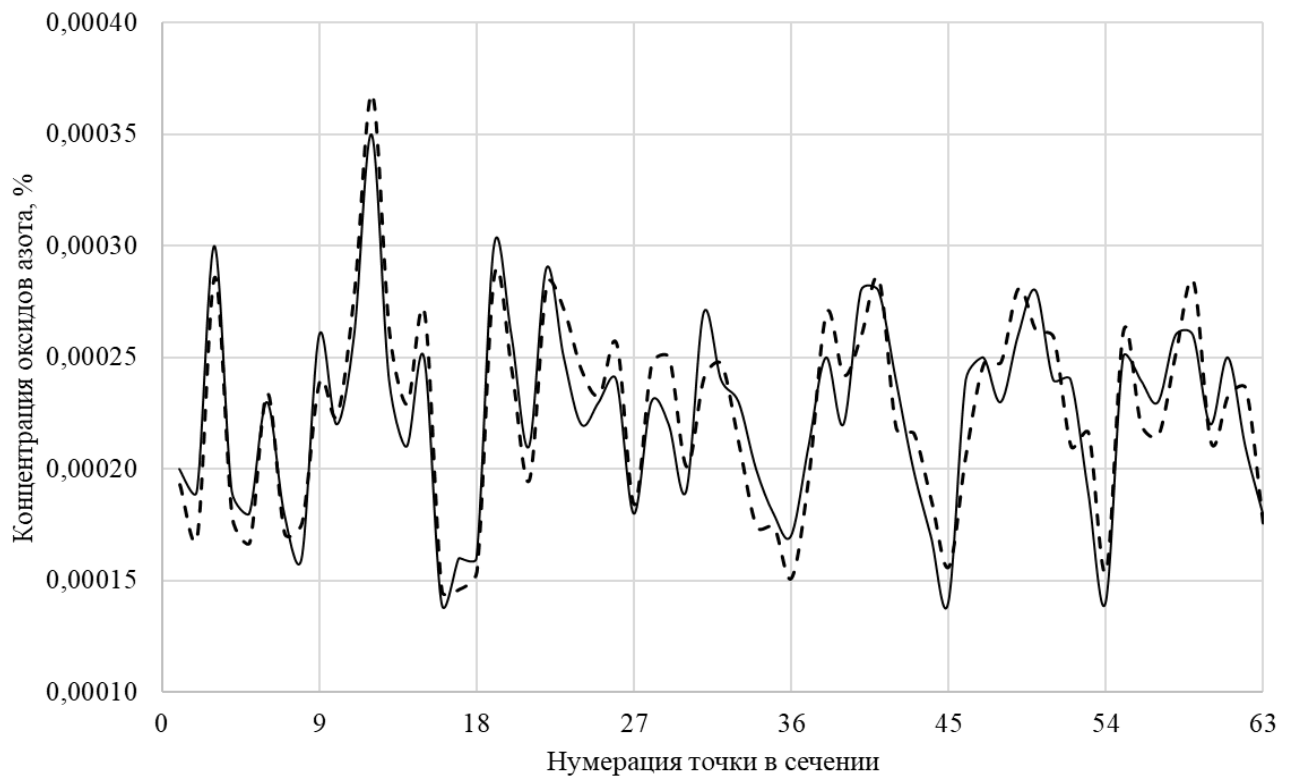


Рисунок 3.1 - Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования по точкам (составлено автором)

Каждые 0-9 точек на рисунке соответствуют одному сечению, в котором производились измерения. Расстояния и другие параметры самих сечений приводились ранее в работе.

Стоит отметить, что относительная погрешность рассчитанной величины концентрации оксида азота от измеренной являлась одним из критериев для оценки валидации модели (рисунок 3.2). Максимальные значения погрешности в точках были равнялись не более 12% процентов, что принималось как удовлетворительный показатель, так как дальнейшие исследования предполагали фиксирования результатов моделирования не в конкретных точках сечения, а в определённых объёмных зонах поперечного сечения. В них рассматривались максимальные и средние значения. К тому же, очевидно, что идеальной сходимости между точечными значениями построенной математической компьютерной модели и измеренными экспериментальными данными является

достаточно затруднительным и почти невозможным процессом, погрешности в 12% по конкретным точкам и в 5-7% по усреднённым значениям были приняты за удовлетворительные результаты.

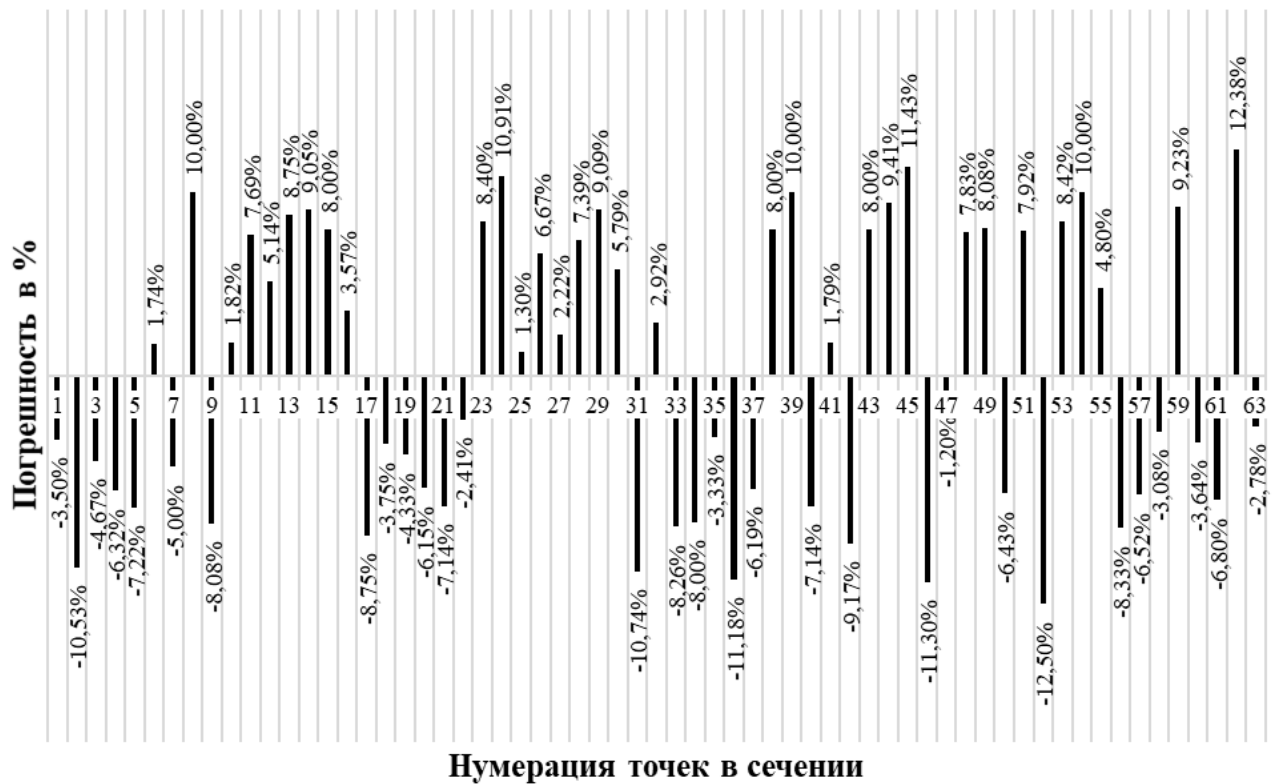


Рисунок 3.2 - Погрешность модели по точкам (составлено автором)

В связи с этим, дополнительную проверку адекватности прошли средние значения модели по каждому сечению (рисунок 3.3).

Средние отклонения значений модели от экспериментально вычисленных показывают максимальные значения в 5%. Ранее данный показатель принимался как удовлетворительный, в связи с чем, было принято решение перейти к следующему этапу моделтирования.

Дальнейшее исследование подразумевает собой постоянное изменение вводных данных для анализа процесса: скорости газов, их концентрации, площади поперечного сечения двигателя, динамического движения модели транспортного средства и т.д.

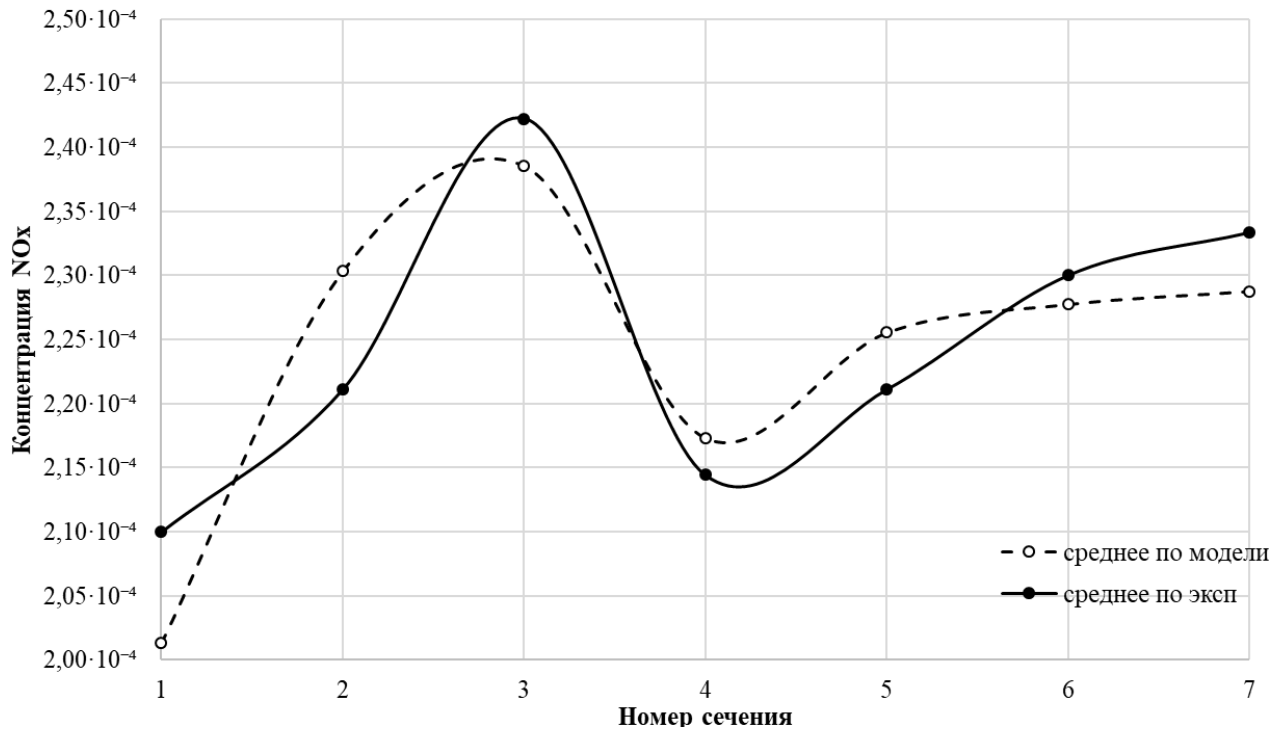


Рисунок 3.3 - Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования по средним (по плоскостям) значениям (составлено автором)

3.3 Анализ результатов математического моделирования исходной модели

Исходная модель в данном случае — это модель горной выработки, по образцу которой была построена компьютерная модель. Все последующие модели — это в той или иной степени модификации исходной модели.

В результате проведенных расчетов, получено распределение концентрации выхлопных газов, температуры, скорости и давления по длине горной выработки (рисунок 3.4-3.7).

По результатам моделирования видно, что концентрации, превышающие ПДК, скапливаются в ближайшем углу и стенке к выхлопной трубе. Поначалу под трубопроводом и в области за ним наблюдаются сравнительно невысокие показатели вредных компонентов [114].

Сравнительные результаты моделирования и экспериментальных замеров представлены в таблице 3.2.

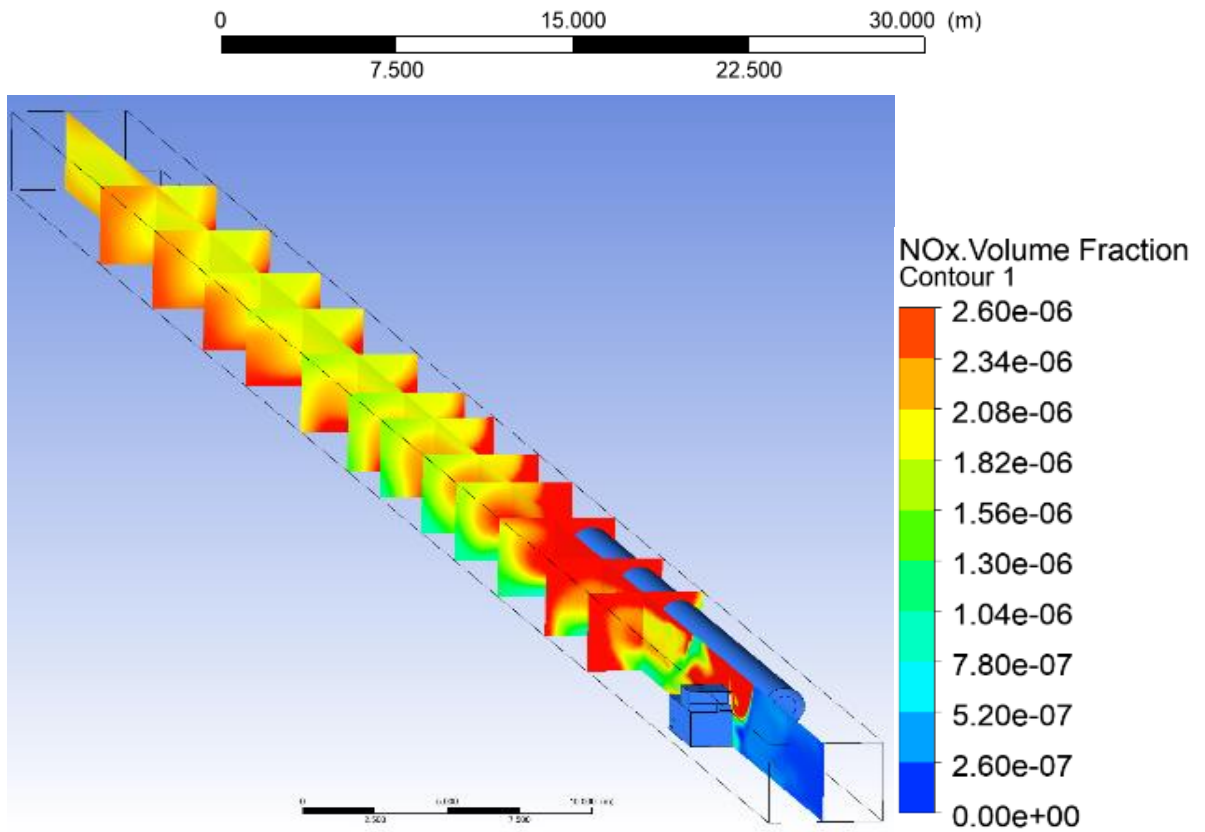


Рисунок 3.4 - Результаты расчетов полей концентраций для оксидов азота NO_x
(составлено автором)

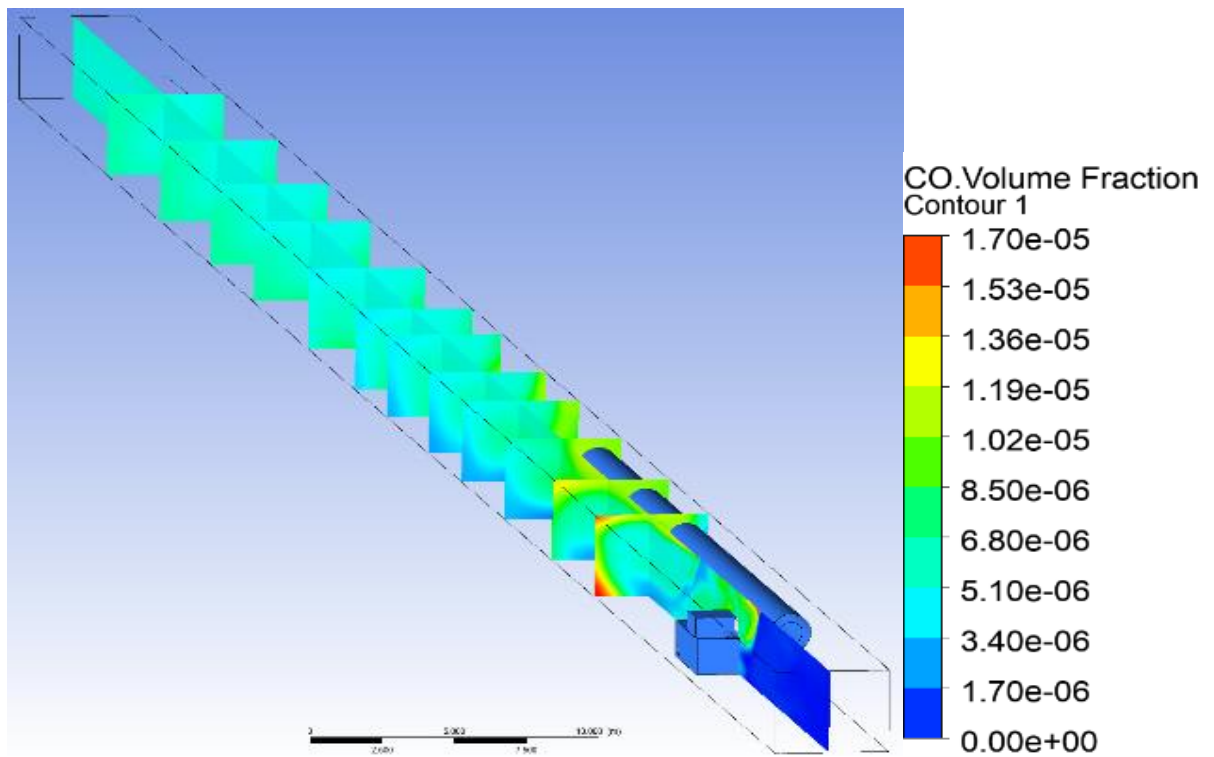


Рисунок 3.5 - Результаты расчетов полей концентраций для монооксида углерода
(CO) (составлено автором)

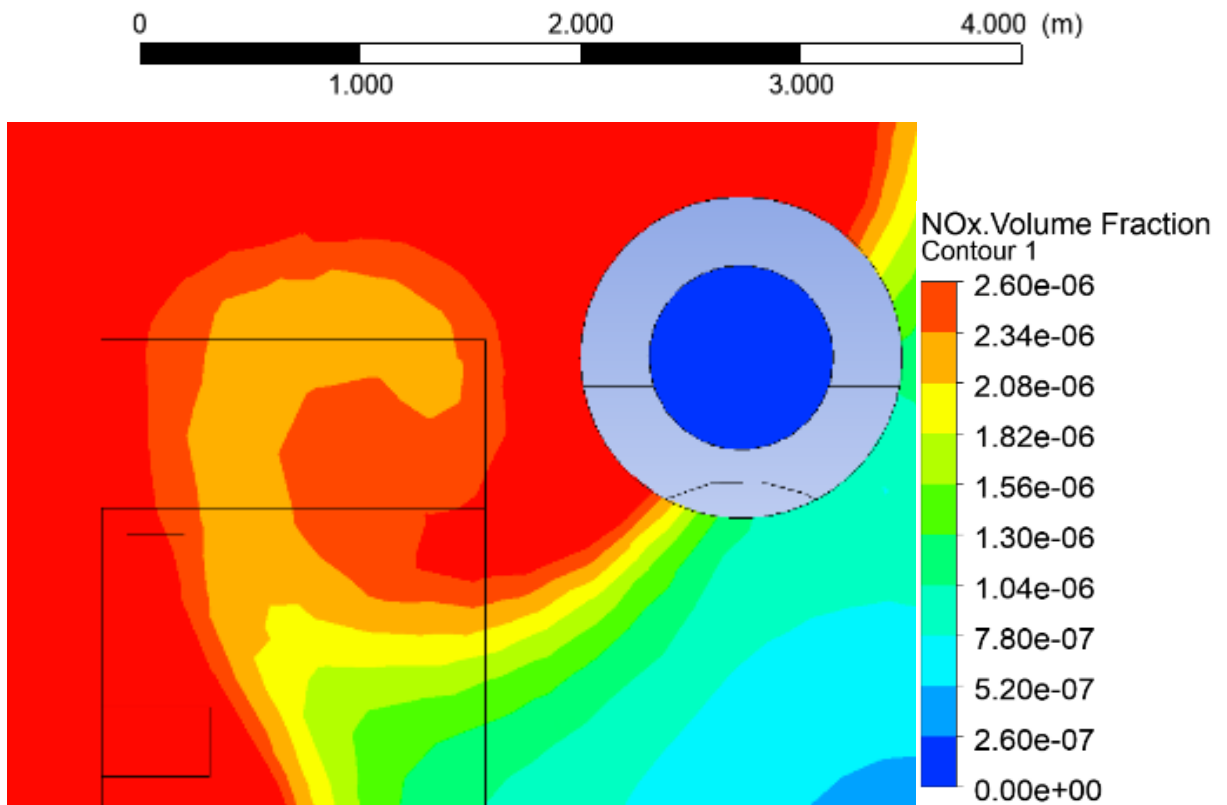


Рисунок 3.6 Распределение концентраций для NOx в сечении №1 в пределах горной выработки (составлено автором)

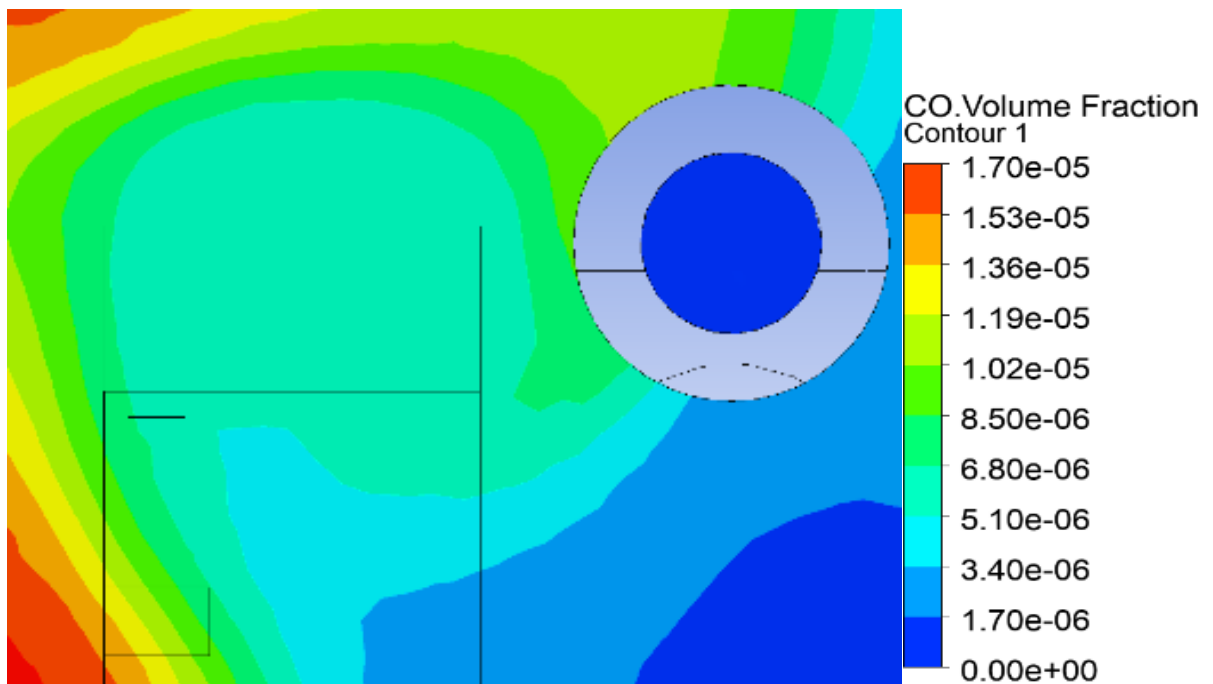


Рисунок 3.7 - Распределение концентраций для CO в сечении №1 в пределах горной выработки (составлено автором)

Таблица 3.2 - Сравнительные результаты моделирования и экспериментальных замеров (составлено автором)

№ сечения	№ точки в сечении	Среднее NOx по эксперименту в %	Среднее NOx по модели в %	NOx по модели в %	NOx по эксперименту в %
Сечение I	1	2,10E-04	2,02E-04	1,93E-04	2,00E-04
	2			1,70E-04	1,90E-04
	3			2,86E-04	3,00E-04
	4			1,78E-04	1,90E-04
	5			1,67E-04	1,80E-04
	6			2,34E-04	2,30E-04
	7			1,71E-04	1,80E-04
	8			1,76E-04	1,60E-04
	9			2,39E-04	2,60E-04
Сечение II	1	2,21E-04	2,31E-04	2,24E-04	2,20E-04
	2			2,80E-04	2,60E-04
	3			3,68E-04	3,50E-04
	4			2,61E-04	2,40E-04
	5			2,29E-04	2,10E-04
	6			2,70E-04	2,50E-04
	7			1,45E-04	1,40E-04
	8			1,46E-04	1,60E-04
	9			1,54E-04	1,60E-04
Сечение III	1	2,42E-04	2,44E-04	2,87E-04	3,00E-04
	2			2,44E-04	2,60E-04
	3			1,95E-04	2,10E-04
	4			2,83E-04	2,90E-04
	5			2,71E-04	2,50E-04
	6			2,44E-04	2,20E-04
	7			2,33E-04	2,30E-04
	8			2,56E-04	2,40E-04
	9			1,84E-04	1,80E-04
Сечение IV	1	2,14E-04	2,14E-04	2,47E-04	2,30E-04
	2			2,40E-04	2,20E-04
	3			2,01E-04	1,90E-04
	4			2,41E-04	2,70E-04
	5			2,47E-04	2,40E-04
	6	2,14E-04	2,14E-04	2,11E-04	2,30E-04
	7			1,84E-04	2,00E-04
	8			1,74E-04	1,80E-04
	9			1,51E-04	1,70E-04

Продолжение Таблицы 3.2

№ сечения	№ точки в сечении	Среднее NOx по эксперименту в %	Среднее NOx по модели в %	NOx по модели в %	NOx по эксперименту в %
Сечение V	1	2,21E-04	2,26E-04	1,97E-04	2,10E-04
	2			2,70E-04	2,50E-04
	3			2,42E-04	2,20E-04
	4			2,60E-04	2,80E-04
	5			2,85E-04	2,80E-04
	6			2,18E-04	2,40E-04
	7			2,16E-04	2,00E-04
	8			1,86E-04	1,70E-04
	9			1,56E-04	1,40E-04
Сечение VI	1	2,30E-04	2,31E-04	2,13E-04	2,40E-04
	2			2,47E-04	2,50E-04
	3			2,48E-04	2,30E-04
	4			2,81E-04	2,60E-04
	5			2,62E-04	2,80E-04
	6			2,59E-04	2,40E-04
	7			2,10E-04	2,40E-04
	8			2,06E-04	1,90E-04
	9			1,54E-04	1,40E-04
Сечение VII	1	2,33E-04	2,32E-04	2,62E-04	2,50E-04
	2			2,20E-04	2,40E-04
	3			2,15E-04	2,30E-04
	4			2,52E-04	2,60E-04
	5			2,84E-04	2,60E-04
	6			2,12E-04	2,20E-04
	7			2,33E-04	2,50E-04
	8			2,36E-04	2,10E-04
	9			1,75E-04	1,80E-04

Динамика функционирования сложных систем традиционно предполагает исследование начальных условий функционирования процессов, определяемых условиями неустановившегося режима, известного как нестационарная постановка. Данный этап характеризуется наличием существенных изменений основных параметров состояния системы во времени, обусловленных начальными возмущениями либо факторами внешней среды [85,23]. Нестационарность подразумевает отсутствие устойчивого равновесия между внутренними компонентами системы и окружающей средой, что ведет к непрерывному изменению физических и энергетических показателей в пространстве и времени.

Причинами возникновения нестационарного характера функционирования могут служить различные факторы, включая случайные флуктуации, внешние воздействия и внутренние нестабильные процессы.

Процессы воздухо и газораспределения носят нестационарный характер. Такие фиксируемые в исследовании параметры как температура воздуха, скорость воздуха и концентрации вредных для здоровья человека продуктов неполного сгорания топлива в дизельных двигателях внутреннего сгорания зависят от времени, по крайней мере на начальном этапе моделирования [96].

Нестационарные случайные процессы характеризуются изменением вероятностных значений во времени и имеют следующее общее распределение (рисунок 3.8).

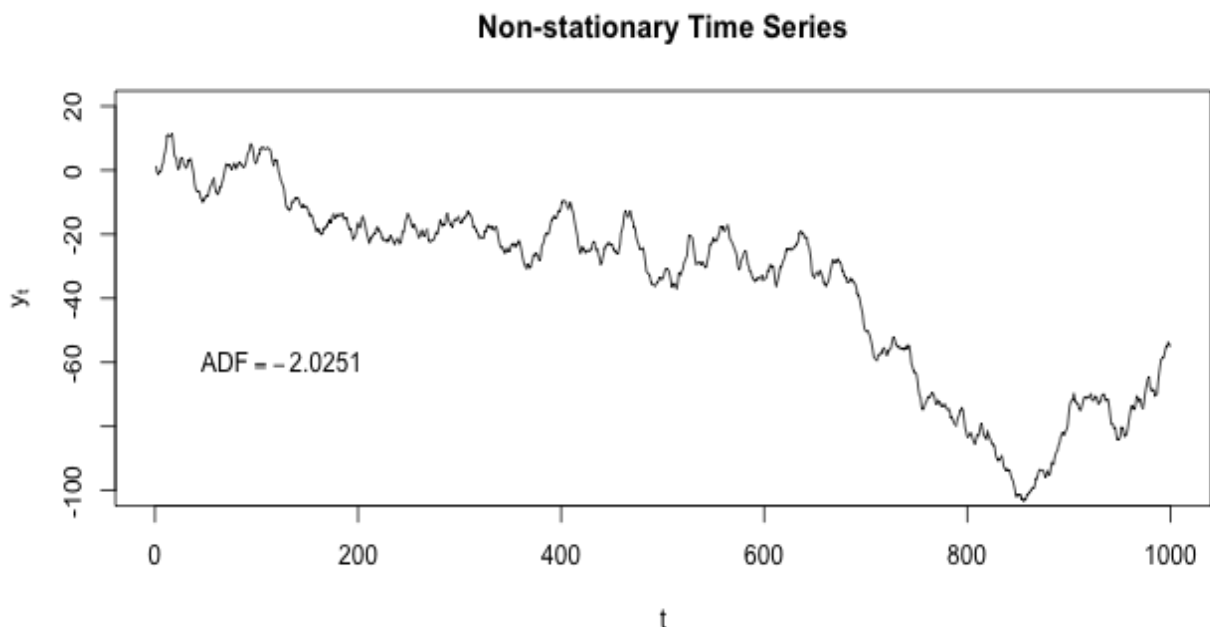


Рисунок 3.8 - Характеристика нестационарного процесса [59]

Однако, дальнейшее развитие системы зачастую приводит к стабилизации отдельных её параметров, уменьшению амплитуд колебаний и достижению определенного уровня постоянства внутренних состояний. Такое состояние обозначают термином «стационарный режим», при котором характерные показатели остаются практически неизменными в течение длительного периода времени. Переход от нестационарного типа функционирования к стационарному осуществляется путем адаптации системы к внешним условиям и внутренней

оптимизации процессов, приводящей к минимизации влияния начальных возмущений и повышению устойчивости всей системы.

Процесс перехода от нестационарного к стационарному состоянию системы можно рассматривать как процесс самоорганизации, в ходе которого отдельные элементы приобретают устойчивые связи друг с другом, образуя упорядоченное функционирование системы. Важнейшими признаками перехода являются установление равновесия между энергией, поступающей извне и энергией расходуемой системой, уменьшение амплитуды колебаний вокруг средних значений параметров и повышение предсказуемости поведения системы в долгосрочной перспективе.

Как правило, динамическая система всегда начинается с нестационарной постановки. Однако, при дальнейшей неизменности системы и вводных в неё нестационарный характер может быть изменён, и система приобретёт стационарный тип (рисунок 3.9).

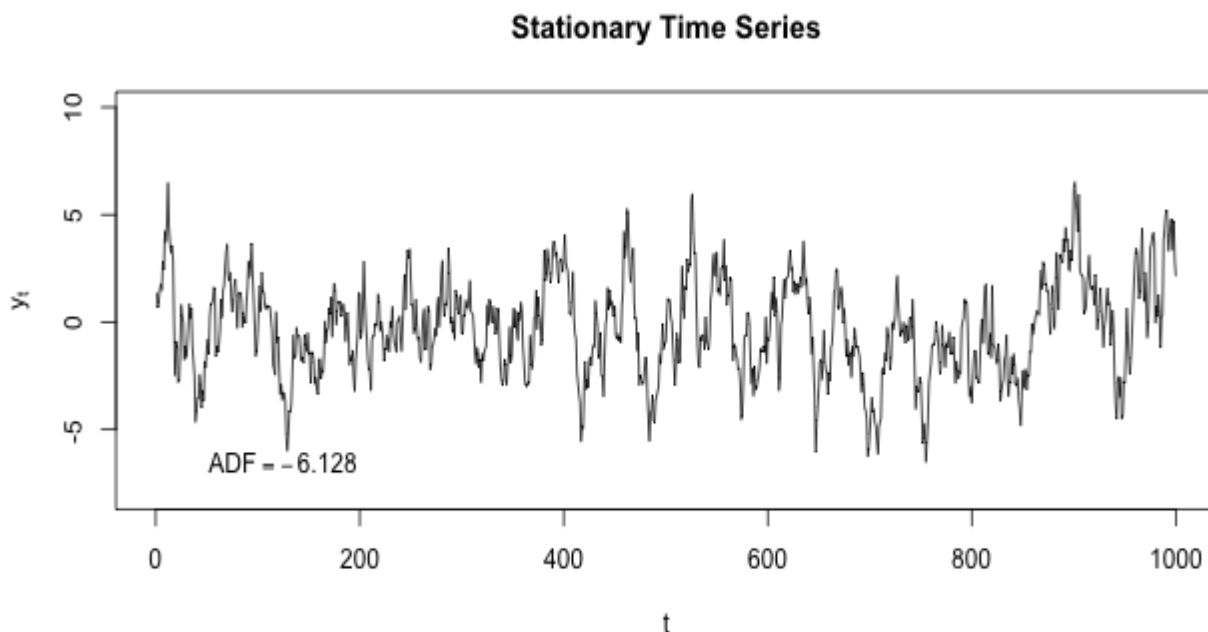


Рисунок 3.9 - Характеристика стационарного процесса [59]

Важным условием такого перехода является неизменность (или низкое «постоянное» отклонение) значений исследуемых параметров от предыдущих с течением определённого времени.

В исследовании начало расчётов было привязано к нестационарной постановке с устанавливаемой инициализацией начальных данных системы. Переход к стационарному режиму оценивался по данным 9 сечений, расположенным по длине модели. Низкие значения отклонений ($\leq 5\%$) от предыдущих в течение некоторого времени являлись основанием для завершения расчётов.

Для вышеперечисленных целей из-за возникновения дополнительных турбулентных течений и распределений концентраций по причине изменения между моделями скорости выхлопных газов, поступающих в модель, проверка перехода от одного режима в другой оценивалась для двух различных моделей. Первой соответствовала нормальная нагрузка на двигатель транспортного средства, а второй – максимальная.

Результаты «сходимости» нестационарного режима к стационарному по 9 сечениям и величинам концентрации при средней нагрузке представлены на рисунке 3.10.

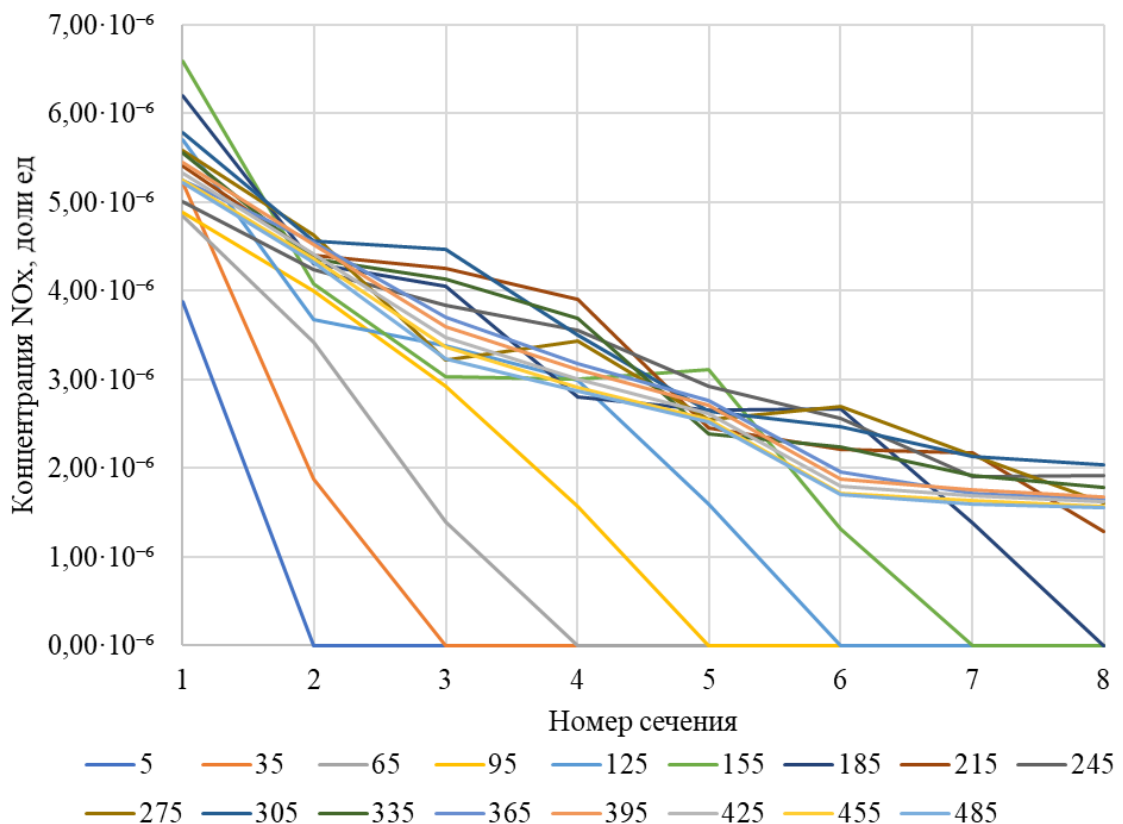


Рисунок. 3.10 - Время, за которое процесс приобретает стационарный характер при условии средней нагрузки на ДВС (составлено автором)

Из рисунка 3.10 следует, что поток воздуха, наполненный выхлопными газами, достигает последнего сечения только через 245 секунд после начала. Корректировка процесса начинается с момента, когда воздух достигает отметки устья модели, то есть фактически проходит всю её длину.

Для оценки перехода нестационарного режима в стационарный был выбран метод неизменности показателей максимальных значений концентраций в сечениях от предшествующих (не более 5% «е») (рисунок 3.11).

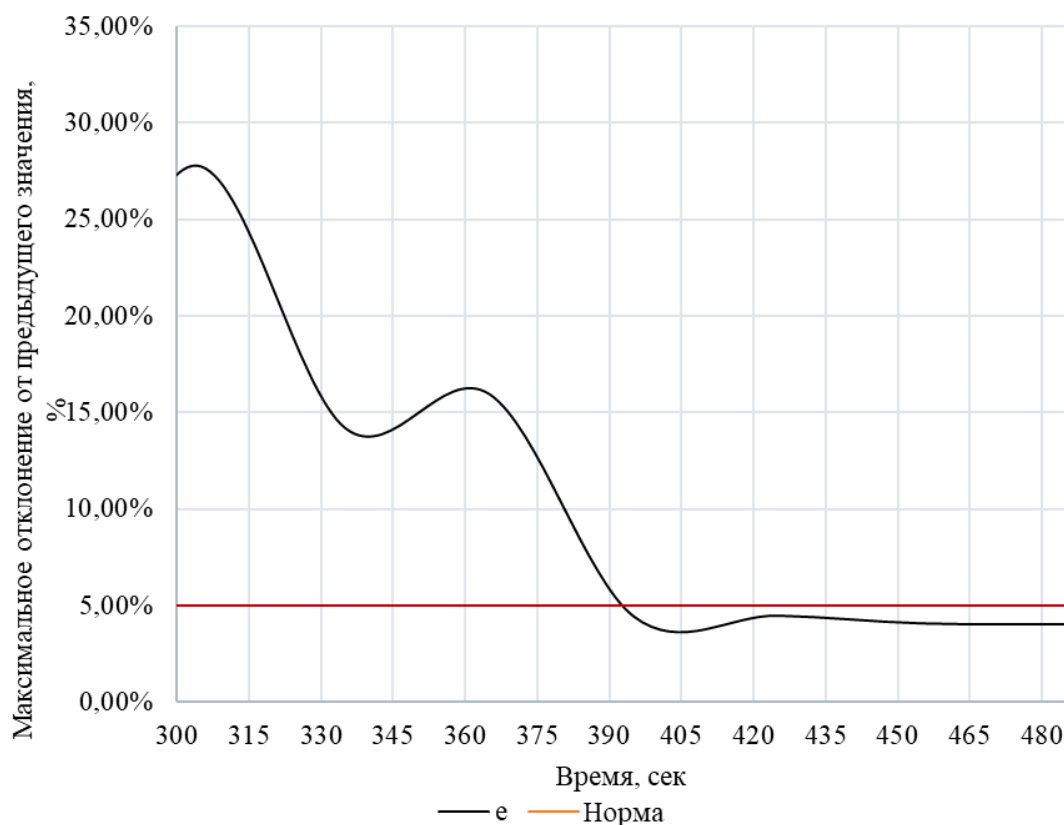


Рисунок 3.11 - Значения максимальных отклонений с течением времени при нормальной нагрузке на ДВС (составлено автором)

Определяющим показателем, используемым для оценки величины отклонений, выступает максимальное или нормированное значение («норма»), которое устанавливается равным 5%. Данное значение принято, исходя из требований стандартов, регламентирующих пределы допустимых погрешностей измерений и ошибок расчета в рассматриваемом диапазоне параметров.

Данные показывают динамику изменений максимальных отклонений в зависимости от времени функционирования системы. В начальный период времени

наблюдалась значительная нестабильность показателя отклонений, связанная с приспособляемостью системы к новым условиям эксплуатации и влиянию внешних факторов.

Результаты демонстрируют неизменность значений максимальных отклонений по прошествии 420 секунд после начала, что свидетельствует о переходе системы в стационарный режим. В последующих временных интервала изменения значения максимальных отклонений не превышают данную величину. В работе принимается точка 485 секунд при нормальной нагрузке на ДВС – точкой начала стационарного процесса.

Для второй модели – повышенных нагрузках на двигатель следует также решить аналогичную задачу по определению точки-времени перехода от нестационарной системы к стационарной (рисунок 3.12).

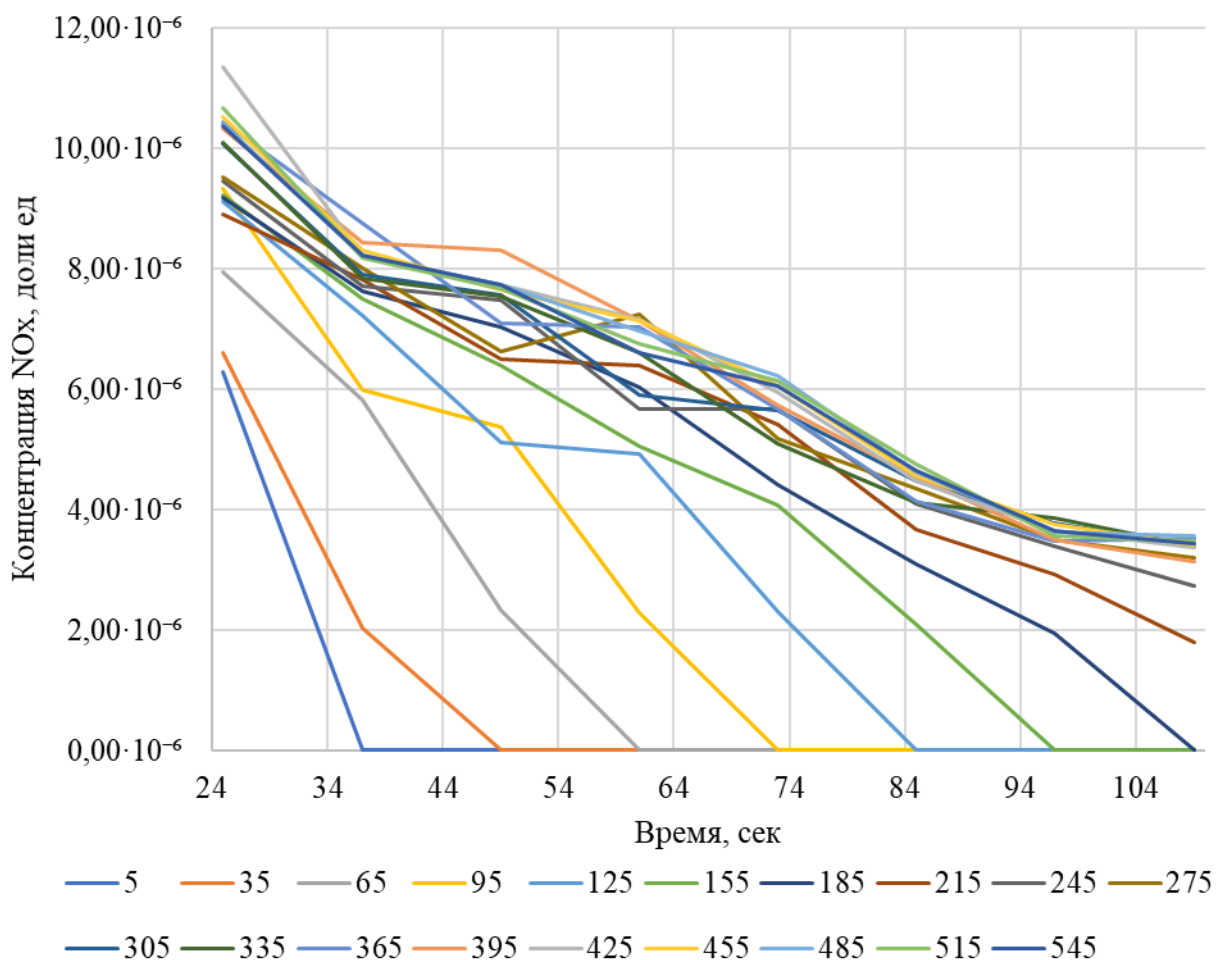


Рисунок 3.12 - Время, за которое процесс приобретает стационарный характер при условии максимальной нагрузки на ДВС (составлено автором)

В отличие от модели с нормальной нагрузкой на двигатель из-за повышения скорости, а значит и возникновения в системе дополнительных турбулентных процессов и вихрей формирование некоторого баланса системы требует большего времени. Происходит увеличение верхней границы временного диапазона до 545 секунд.

Распределение максимальных отклонений «е» представлено на рисунке 3.13.

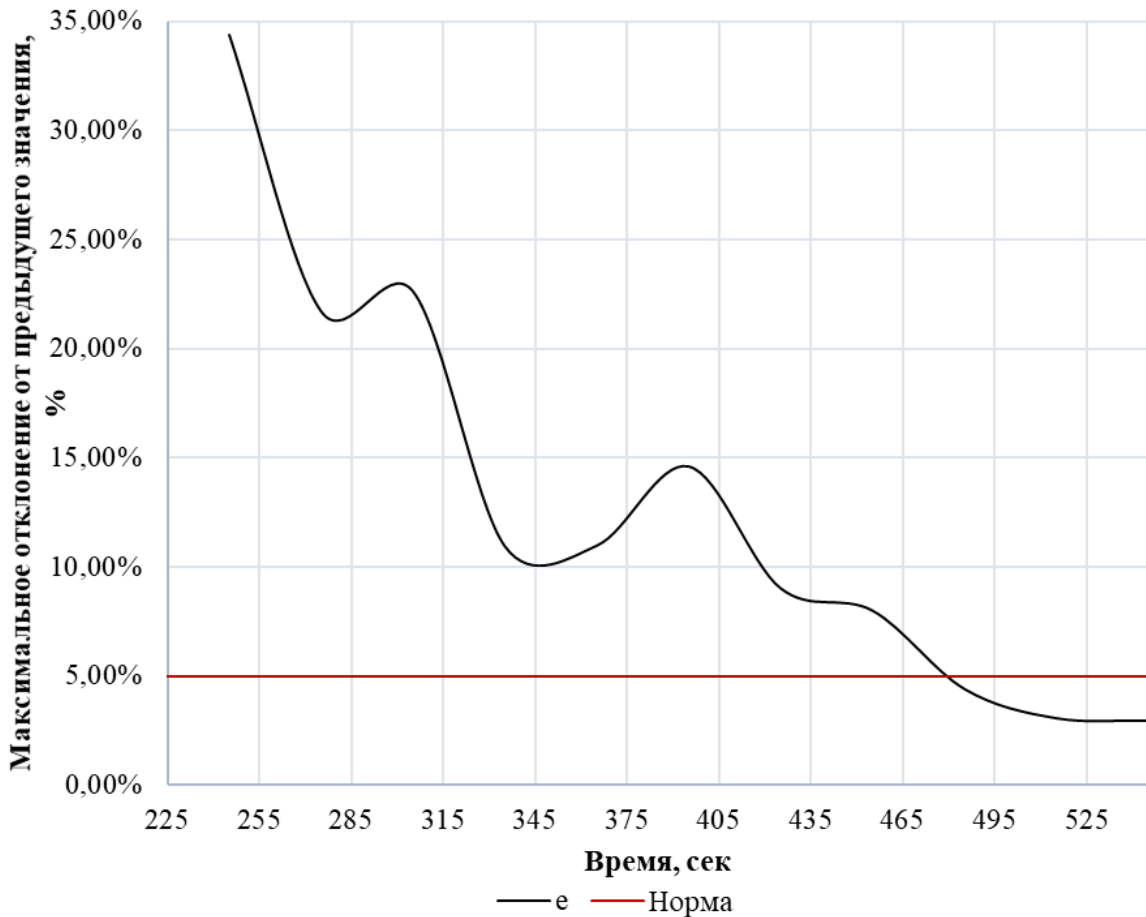


Рисунок 3.13 - Распределение максимальных отклонений «е» в течение времени (составлено автором)

Через 505 секунд после начала для условий максимальной нагрузки на двигатель система приобретает стационарный характер (отклонения не превышают 5% на протяжении нескольких последующих временных отрезков. Данная точка-время является начальными условиями для стационарного расчёта.

Первая модель описывает работу системы при условии нормального уровня нагрузки на двигатель внутреннего сгорания (ДВС), тогда как вторая учитывает воздействие максимальной нагрузки в граничных условиях модели.

Анализируя полученные результаты, установлено, что первая модель демонстрирует сравнительно быстрое достижение установившихся параметров. Спустя 480 секунд после запуска системы, ее внутренняя структура стабилизируется, отклонения основных параметров затухают, и формируется устойчивый стационарный режим.

Вторая модель, напротив, проявляет заметно большую продолжительность времени стабилизации внутренней системы, необходимого для завершения переходного этапа. Процесс установления стационарного режима занимает около 545 секунд, что почти на 13% больше, чем в первом варианте.

Одним из главных факторов, замедляющих формирование стационарного состояния, является повышенный уровень энтропии системы, вызванный высокими скоростями системы и теплообменными процессами.

3.4 Оценка влияния скорости движения транспортного средства на эффективность разбавления выхлопных газов

Определение необходимого количества воздуха для любых подземных объектов является обеспечение нормативных термодинамических и физико-химических параметров воздушной среды. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности не регламентируют потребное количество воздуха, необходимое для проветривания выработок, в которых эксплуатируются технические средства с ДВС. Однако, в вышеупомянутом ФНиПе регламентируется ПДК выхлопных газов ($C_{\text{пдк}}$), до которых необходимо разбавить концентрации вредных выхлопных газов.

Зависимости относительно текущей концентрации C при попутном направлении движения транспортного средства с воздушным потоком ($-Q$) выражаются формулой (6) [5]:

$$C = q / (v_t \cdot S - Q), \quad (6)$$

где C – концентрация вредного компонента мг/м³;

q – расход выбросов вредных веществ, мг/с;

v_t – скорость движения транспортного средства, м/с;

Q – расход воздуха, м³/мин на л.с.

Расход воздуха можно выразить формулой (7)

$$Q = v_B \cdot S, \quad (7)$$

где v_B – скорость движения воздуха м/м³;

S – площадь поперечного сечения горной выработки, м².

Проанализировав формулу, можно сделать вывод о том, что при уменьшении скорости движения транспортного средства v_T до значений скорости воздуха в горной выработке v_B ($v_T \rightarrow v_B$) концентрация вредных выхлопных газов дизельной техники с ДВС стремится к бесконечности $C \rightarrow \infty$ или же $C \rightarrow C_{max}$.

При уменьшении в горной выработке скорости транспортного средства, двигающегося однонаправленно со скоростью воздуха, до значений скорости этого самого воздуха, концентрация вредных компонентов вблизи машины стремится к максимальным значениям. В то же время на величину максимальных концентраций оказывает влияние, также, и время движения машины в горной выработке.

Важно учесть, что максимальная концентрация зависит не только от времени движения машины в превышающей ПДК области t , но и от самого объёма этой области $V_{ог}$. То есть максимальная концентрация вредного компонента зависит от следующих факторов по формуле (8):

$$C_{max} = q \cdot V_{ог} \cdot S \cdot t \quad (8)$$

Математическая форма записи представленных условий имеет вид формулы (9):

$$\frac{\partial c}{\partial e} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{q}{S} \cdot V_{и} \cdot \left[\eta \left(t - \frac{y}{v} \right) - \eta \left(t - \frac{e}{v_{и}} - \frac{V_{и}}{v_T} \right) \right] \quad (9)$$

где $\eta(t)$ – единичная функция Хевисайда

Решение уравнений с граничным условием выражается формулами (10) и (11)

$$C(0, t) = C_0 \quad (10)$$

$$C(y, 0) = 0 \quad (11)$$

осуществляется с помощью преобразования Лапласа. Зависимость относительно концентрации $C(y, t)$ при движении единичного транспортного средства имеют вид формул (12) и (13)

$$C(y, t) = C_0 \eta \left(t - \frac{y}{v} \right) - \frac{q_{\text{н}} t}{sV_{\text{н}} \left[\left(\eta - \frac{y}{v} \right) - \eta \left(t - \frac{e}{v_{\text{н}}} - \frac{V_{\text{н}}}{v_{\text{т}}} \right) \right]} + \frac{q_{\text{н}} t}{sV_{\text{н}} \left(1 - \frac{v}{v_{\text{т}}} \right) \left[\left(\eta - \frac{y}{v} \right) - \eta \left(t - \frac{e}{v_{\text{н}}} - \frac{V_{\text{н}}}{v_{\text{т}}} \right) \right]} \quad (12)$$

$$C = q / (S \cdot (v_{\text{т}} - v_{\text{в}})), \quad (13)$$

Следующий ряд исследований был направлен на изучение влияния вышеперечисленных характеристик на эффективность разбавления выхлопных газов в тупиковой подземной горной выработке.

При эксплуатации дизельных транспортных средств с ДВС, в частности погрузочно- доставочных машин, важно брать во внимание цикл работы машины. Основные элементы цикла в пределах забойной части выработки составляют:

- погрузка рудной массы в забойной части выработки;
- доставка к устью тупиковой выработки;
- выгрузка в рудоспуск (отсутствие машины в забое);
- возвращение в забой с целью повторения всего цикла работ.

На протяжении всего цикла транспортное средство выделяет в атмосферу горной выработки вредные для здоровья человек компоненты выхлопных газов. Важно, чтобы превышения предельно допустимых концентраций этих вредных (не взрывоопасных) компонентов не происходило в областях рабочих зон. Там, где возможно наличие человека.

В исследовании одним из таких рабочих мест являлась кабина машиниста транспортного средства. Показания по концентрациям считывались при помощи объёмной сферы с радиусом в один метр и с центром в геометрическом центре кабины (рисунок 3.14).

В работе рассматривалось четыре сравнительных сценария, отличавшихся между собой по нагрузке на двигатель и по скорости движения транспортного средства. При увеличении нагрузки в модели повышалась скорость компонентов выхлопных газов и их концентрации (таблица 3.3).

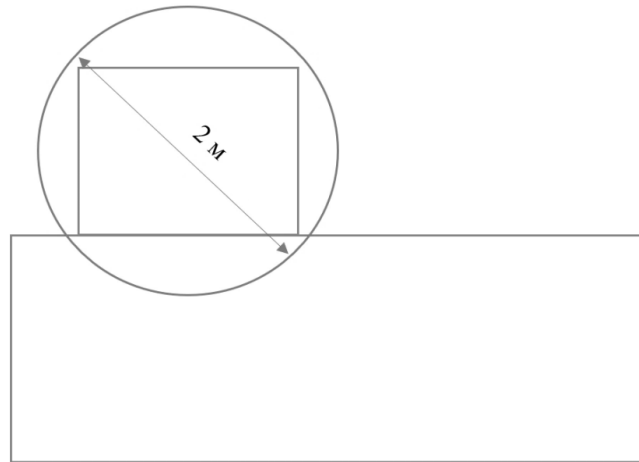


Рисунок 3.14 - Эскиз исследуемой области кабины машиниста
(составлено автором)

Таблица 3.3 - Описание моделируемых сценариев (составлено автором)

Сценарий	Название
I	Средняя нагрузка на двигатель и низкая скорость движения
II	Средняя нагрузка на двигатель и высокая скорость движения
III	Максимальная нагрузка на двигатель и низкая скорость движения
IV	Максимальная нагрузка на двигатель и высокая скорость движения

Принятые варианты позволят выявить не только зависимости величин распределения и концентраций, связанных с нагрузкой на двигатель, но и определить степень влияния на них скорости движения машины.

Первым этапом было определение концентраций вредных компонентов в области кабины при движении машины от тупика к устью, то есть процесс движения гружёного транспортного средства до места выгрузки рудной массы (рисунок 3.15).

Время движения по исследуемому участку при высоких скоростях составляет 33 секунды, при низких 123 секунды. Результаты моделирования четырёх равных точек пути (0 м пути – начальное положение, $\frac{1}{4}$ пути пройдено (1), $\frac{1}{2}$ пути пройдено (2), $\frac{3}{4}$ пути пройдено (3), 1 полный путь пройден (4)) при условии нормальной нагрузки с низкими и высокими скоростями представлены на рисунке 3.15 ниже.

Распределение величин максимальных концентраций NOx по длине тупиковой горной выработки будет также зависеть от скорости движения машины

в этой выработке. Распределение концентраций в зависимости от скорости машины 3 км/ч и 11 км/ч представлены на графике (рисунок 3.16).

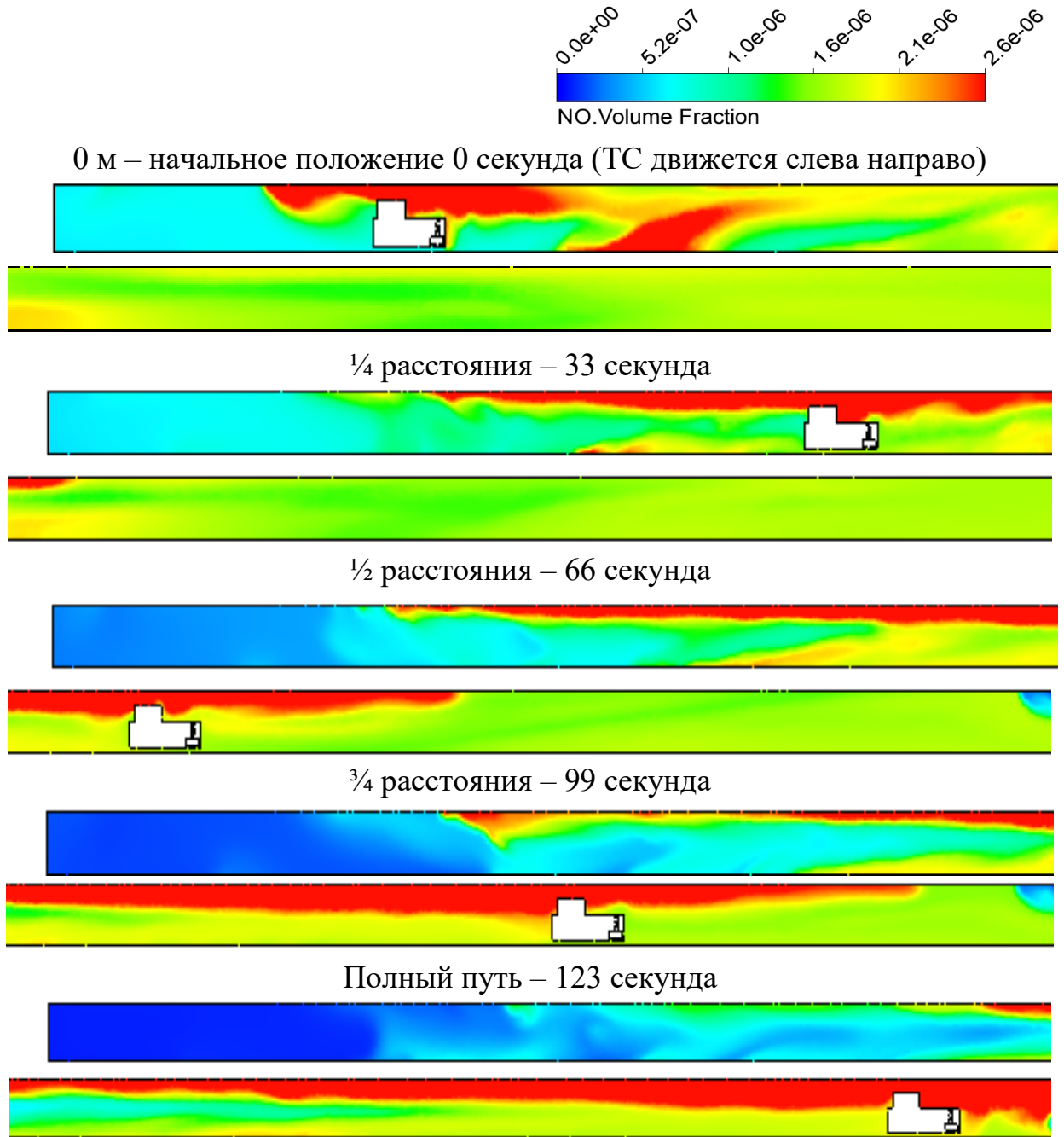


Рисунок 3.15 - Сравнение по распределению концентраций при разных скоростях движения машины при условии нормальной нагрузки в плоскости продольного сечения тупиковой горной выработки (составлено автором)

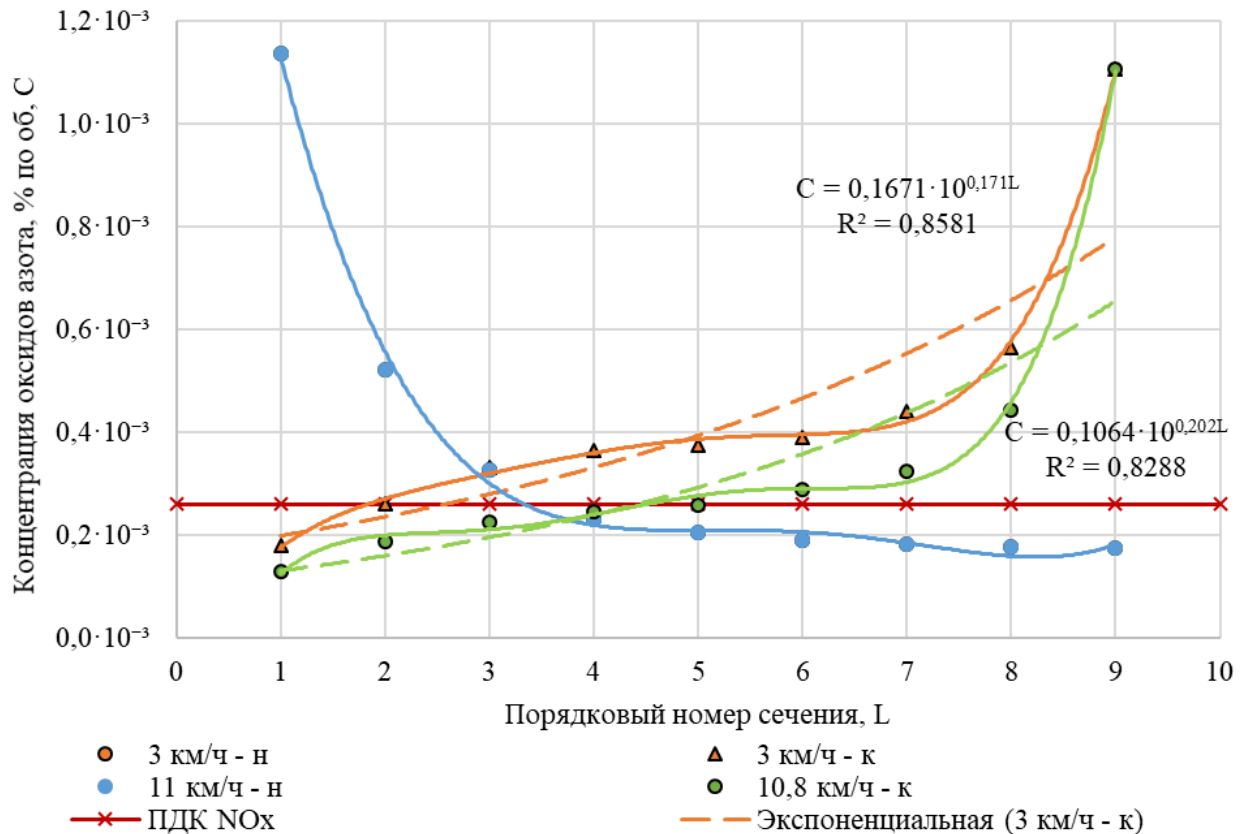


Рисунок 3.16 - Сравнение распределений концентраций по длине выработки для моментов начала движения машины (н) и точки достижения машиной устья выработки (к) при различных скоростях движения (составлено автором)

Точки 0 и 9 соответствуют первому и последнему порядковому номеру сечения, в котором фиксируется результат (начало движения и точка устья соответственно). «н» и «к» - распределения при начальном положении машины (в забое) и конечном (в области устья).

Проанализировав график зависимостей концентраций в горной выработке от скорости движения транспортного средства, можно отметить чёткую закономерность влияния скорости перемещения транспортного средства на распределение и величину загрязнений.

Исходя из результатов рисунка можно сделать вывод о том, что низкой скорости движения 3 км/ч соответствуют более высокие концентрации оксидов азота чем в случае движения с высокой скоростью 11 км/ч. «Графики 3 км/ч – Н» и «11 км/ч – Н» полностью совпадают, так как для обеих моделей движения были приняты одинаковые начальные условия.

Тогда как «3 км/ч – К» и «11 км/ч – К» значительно различаются между собой. Рост концентраций ближе к устью свидетельствует о малом времени после проезда машиной данного сечения. В сечениях же 1-3 выхлопные газы уже остывают и в достаточной степени разбавляются по средствам постоянно поступающего в модель в сечении 0 воздуха по вентиляционному трубопроводу.

После удаления из исследуемой области модели машины, двигающейся со скоростью 3 км/ч, ПДК вредных компонентов выхлопных газов в области тупиковой горной выработки остаются на сравнительно высоких показателях.

Помимо величин концентраций компонентов выхлопных газов по длине выработки важно учитывать их значения вблизи кабины машиниста транспортного дизельного средства с ДВС.

Следующим этапом являлось изучение процесса проветривания после выезда дизельной машины за пределы исследуемой области.

Известно, что с увеличением времени проветривания концентрации вредных компонентов в выработке уменьшаются за счёт остывания, перемешивания, выноса и постоянной подачи в выработку свежего воздуха. Принято считать, что время проветривания вычисляется из отношения пути движения воздуха к его скорости.

Ниже приведён график изменения максимальных значений концентраций оксидов азота в течение четырёх минут после удаления из горной выработки транспортного средства, двигающегося со скоростью 3 км/ч при нормальной нагрузке на двигатель. Каждому отрезку времени на графике соответствует обозначение, например, t_0 – начальный момент времени (момент, когда машина покинула тупиковую горную выработку), t_{30} – момент времени 30 секунд после выезда машины, t_{60} – минута и т.д. (рисунок 3.17).

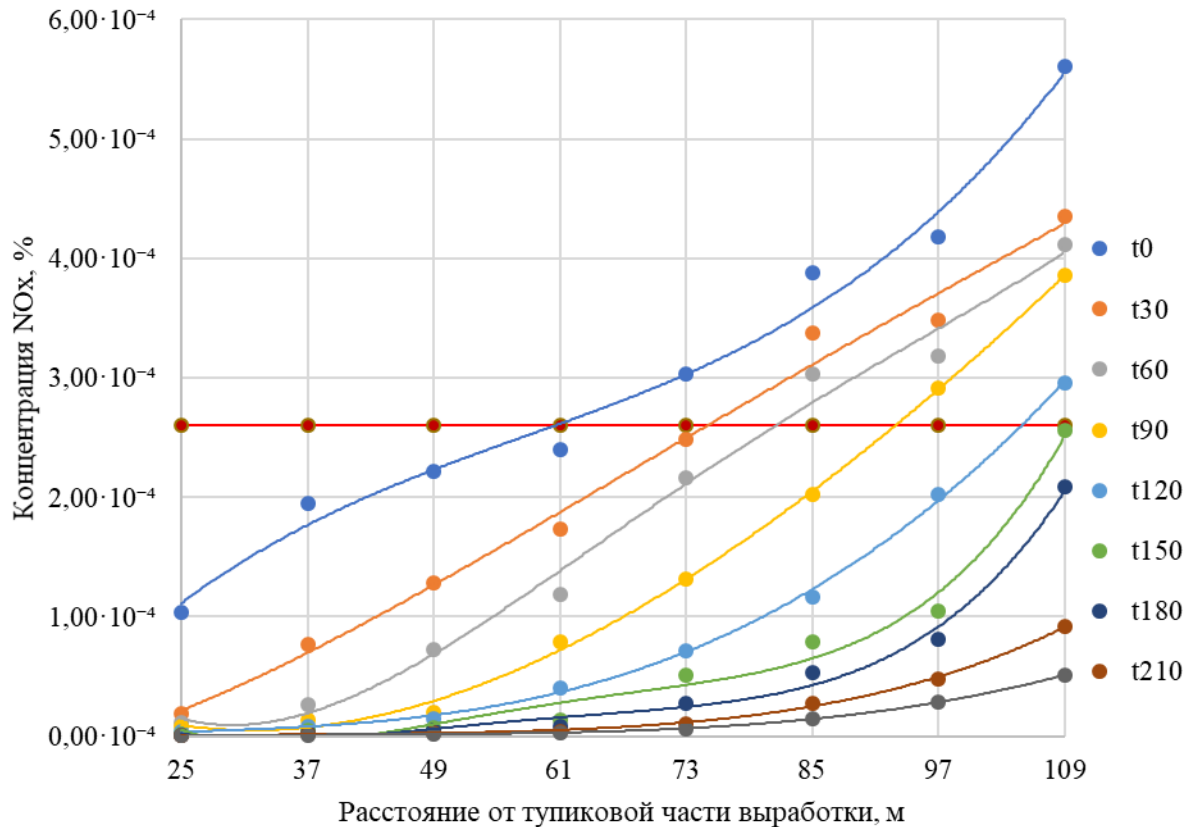


Рисунок 3.17 - Распределение максимальных концентраций NOx по длине выработки в зависимости от продолжительности проветривания после удаления из неё машины, двигающейся со скоростью 3 км/ч и при средней нагрузке на ДВС (составлено автором)

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что наиболее активное разбавление и понижение значений концентраций происходит в непосредственной близости от тупика, то есть в месте поступления воздуха через трубопровод. Также, видно, что наиболее высокие значения концентраций оксидов азота скапливается в области устья выработки, но значения имеют тенденцию к понижению с течением времени.

В период времени 0-150 секунд (t0-t150) на сопряжении тупиковой горной выработки значения концентраций оксидов азота по-прежнему превышают 0,00026 % по объёму. Однако, начиная с 150 секунды (t150, t240) в устье и на всей исследуемой области значения NOx не превышают норм ПДК (NOx).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в данных горных и технических условиях для проветривания тупиковой горной выработки после работы в ней машины с ДВС при средней нагрузке на двигатель и двигающейся со

скоростью 3 км/ч достаточно выдержать время в 150 секунд, которого хватит, чтобы величины вредных компонентов выхлопных газов в тупиковой горной выработке не превышали свои предельно допустимые концентрации.

Величины средних концентрации оксидов азота при движении машины навстречу потоку воздуха с минимальной скоростью 3 км/ч после 150 секунд проветривания имеют следующее распределение (рисунок 3.18).

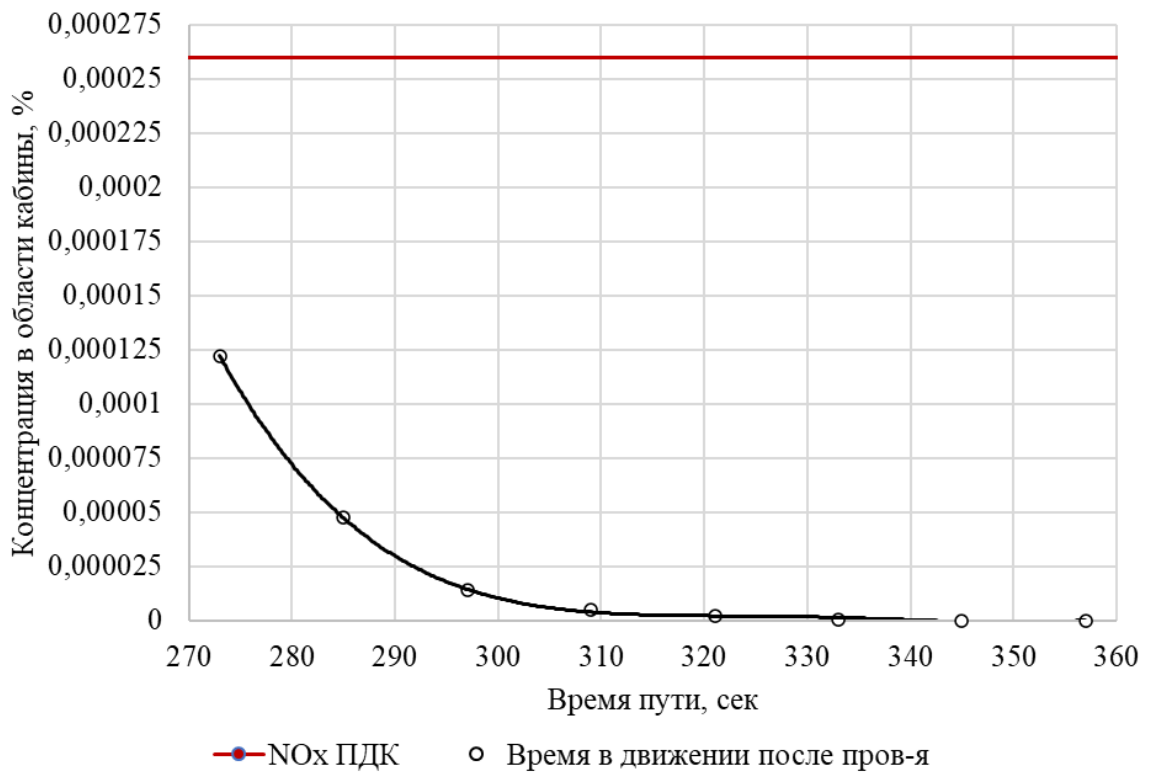


Рисунок 3.18 - Средние значения NO_x в области кабины в течение времени движения машины обратно к забою со скоростью 3 км/ч после проветривания в 150 секунд при нормальной нагрузке на ДВС (составлено автором)

Ясно видно, что времени в 150 секунд оказывается достаточно для эффективного снижения концентраций оксидов азота (NO_x), обеспечивая её поддержание в рамках установленных санитарных норм — предельно допустимой концентрации (ПДК).

Максимальное содержание вредных концентраций фиксируется именно в тот промежуток момент, когда транспортное средство въезжает в рабочую зону горной выработки. Это связано с выбросом значительных объёмов выхлопных газов в результате интенсивной работы двигателей при движении техники в подземной

горной выработке. По мере продвижения транспорта ближе к тупиковой части выработки концентрация постепенно вредного компонента выхлопных газов снижается.

Кроме того, дополнительно была проведена оценка изменения концентрации оксидов азота, обусловленной работой двигателя при максимальной нагрузке, а также эффект проветривания рабочей зоны продолжительностью 210 секунд (рисунок 3.19).



Рисунок 3.19 - Средние значения NOx в области кабины в течение времени движения машины обратно к забою со скоростью 3 км/ч после проветривания в 210 секунд при максимальной нагрузке на ДВС (составлено автором)

Как видно из рисунков, концентрации NOx вблизи кабины при движении транспортного средства обратно при максимальной нагрузке значительно ниже, чем при нормальной. Такие значения можно объяснить более длительным проветриванием тупиковой горной выработки и в том числе устья. Во втором случае проветривание осуществлялось на 60 секунд дольше по сравнению с первым вариантом, что позволило понизить концентрации у устья, даже после движения машины на максимальных оборотах до значительно более низких значений.

Встречный воздушный поток при движении от устья к тупику не позволяет выхлопным газам транспорта попасть в область кабины. При въезде машины в

выработку после проветривания на объём области кабины оказывают влияния только остаточные концентрации оксидов азота, которые образовались после предыдущего проезда машины по выработке и как следствие эффективность их разбавления за время отсутствия машины.

3.5 Численное моделирование влияния различных параметров на эффективность проветривания тупиковой горной выработки, в которой эксплуатируется дизельное транспортное средство с ДВС

В настоящем разделе изучалось влияние на эффективность проветривания тупиковой горной выработки таких параметров как изменение поперечного сечения горной выработки; изменение нагрузки на двигатель; изменение объёма воздуха, подаваемого для проветривания.

Нужно отметить, что машина находится в тупиковой горной выработке в стационарном, неподвижном положении и распределение компонентов при изменении вышеперечисленных параметров оценивалось именно в таких условиях.

Влияние размеров поперечного сечения горной выработки на эффективность разбавления выхлопных газов дизельного оборудования

С целью изучения влияния величины поперечного сечения горной выработки на эффективность проветривания, принимая во внимание ранее полученные экспериментальные данные, проведены теоретические исследования, основанные на математическом компьютерном моделировании полей концентраций монооксида углерода (СО) и оксидов азота (NO_x), формирующихся в воздушном пространстве горной выработки.

Первым исследуемым параметром, влияющим на распределение компонентов выхлопных газов дизельного оборудования с ДВС, являлась площадь поперечного сечения горной выработки.

При увеличении площади поперечного сечения в процессе построения сетки увеличивается количество узлов и элементов. Зависимость этих двух параметров представлена графически на рисунке 3.20.

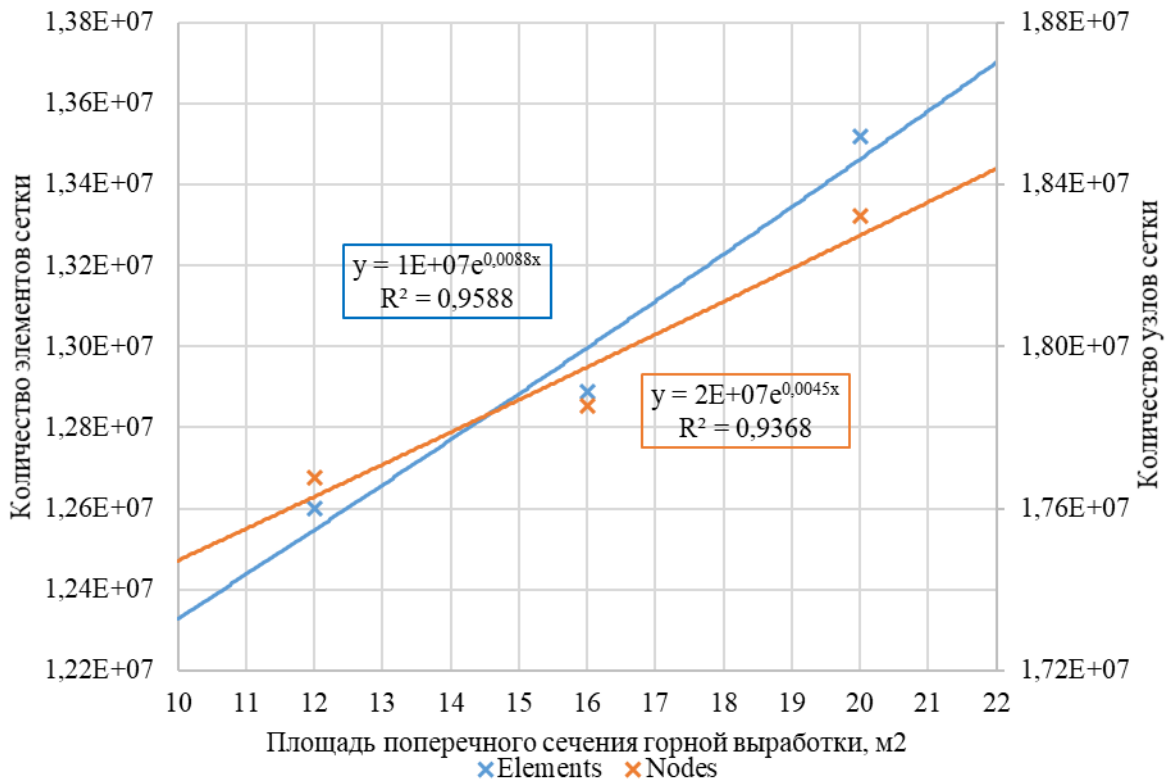


Рисунок 3.20 - Зависимость общего количества ячеек сетки от площади поперечного сечения моделируемого сценария (составлено автором)

Для оценки влияния текущего параметра в моделировании рассматривались поперечные сечения размерами 9, 12, 16, 20 м². Количество подаваемого воздуха, а также нагрузка на двигатель транспортного средства и местоположение выхлопной трубы не менялись.

В моделировании в качестве анализа результатов учитывалась не вся поперечная площадь горной выработки, а только её часть – зона дыхания, которая по сути являлась областью, в пределах которой пребывает рабочий персонал, а также характеристика трубопровода [51]. В процессе моделирования в качестве основной области анализа использовалась не полная площадь поперечного сечения горной выработки, а лишь её ограниченный участок – зона дыхания. Последняя представляла собой область, которая соответствовала области дыхания горнорабочих.

Результаты распределений оксидов азота и оксида углерода в поперечных сечениях № I при различных поперечных площадях горной выработки можно наблюдать на рисунке 3.21.

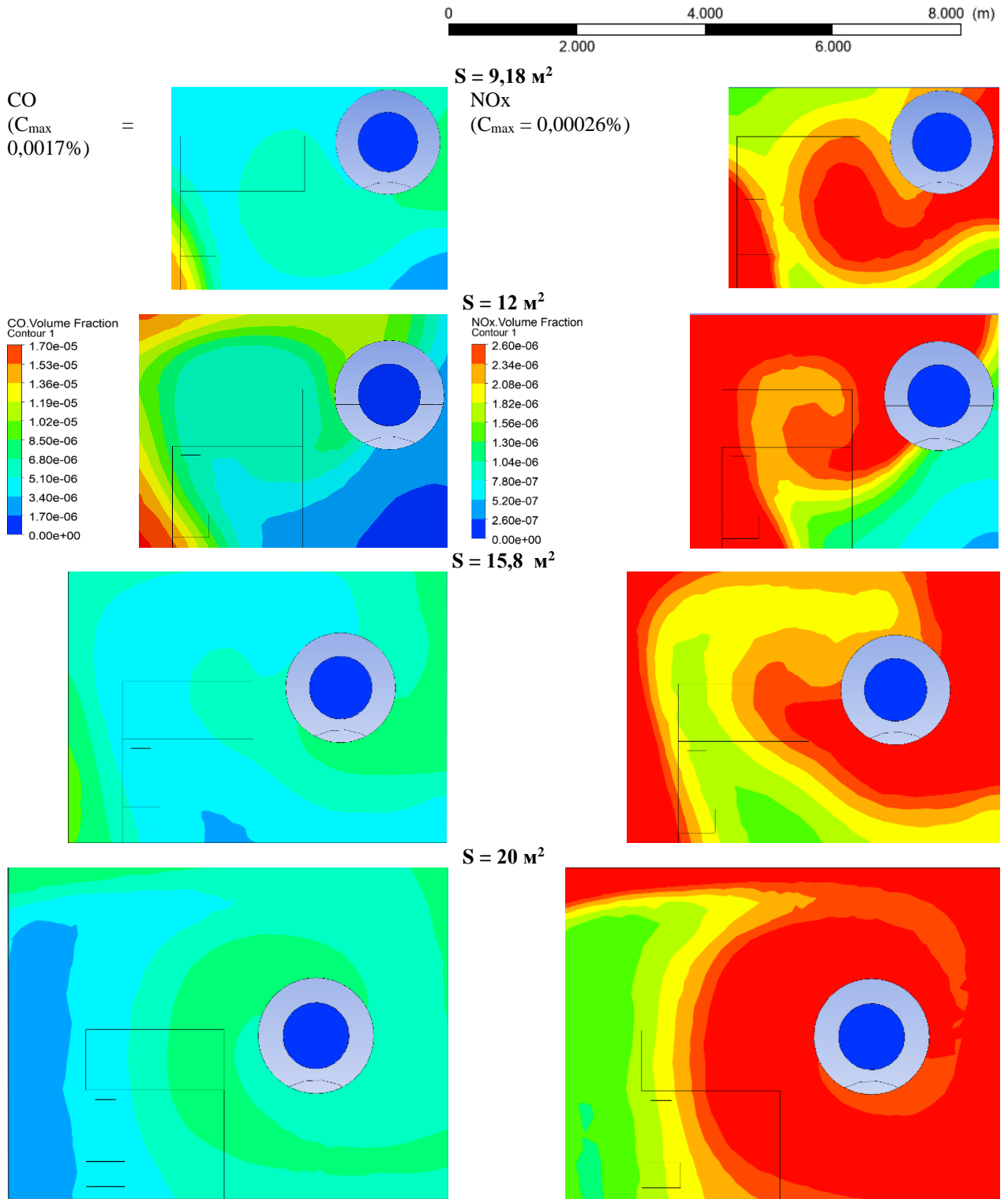


Рисунок 3.21 - Распределение концентраций CO и NOx в сечении № 1 при различной площади поперечного сечения горной выработки (составлено автором)

В объёме горной выработки это распределение примет вид (рисунок 3.22-3.23).

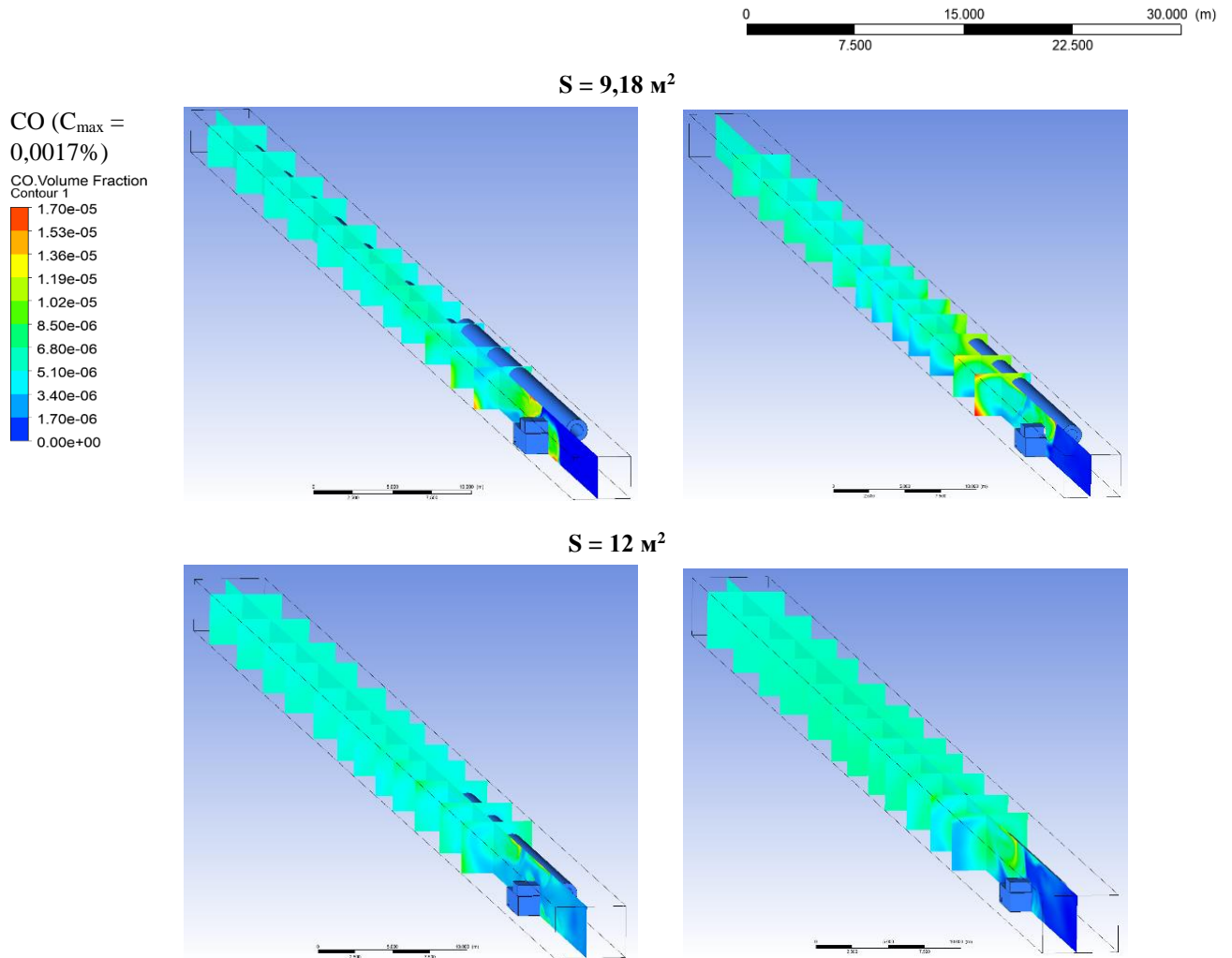


Рисунок 3.22 - Распределение концентраций CO и NOx в объёме модели при площади поперечного сечения горной выработки $9,18 \text{ m}^2$ и 12 m^2 (составлено автором)

Исходя из представленных рисунков и результатов математического моделирования различных величин поперечных сечений горных выработок можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение площади поперечного сечения горной выработки приводит к снижению скорости движения воздушного потока, следствием чего является уменьшение коэффициента турбулентной диффузии.

2. Уменьшение площади поперечного сечения вызывает повышение коэффициента турбулентной диффузии вследствие возрастания интенсивности турбулентных вихрей и ускорения воздушных потоков в ограниченном пространстве.

3. Повышение площади поперечного сечения горной выработки сопровождается увеличением концентраций вредных компонентов выхлопных газов в выбранных поперечных сечениях. Тенденция постепенного роста концентраций обусловлена охлаждением выхлопных газов, снижением скорости воздушных потоков и накоплением высоконцентрационных полей вредных веществ в зоне дыхания.

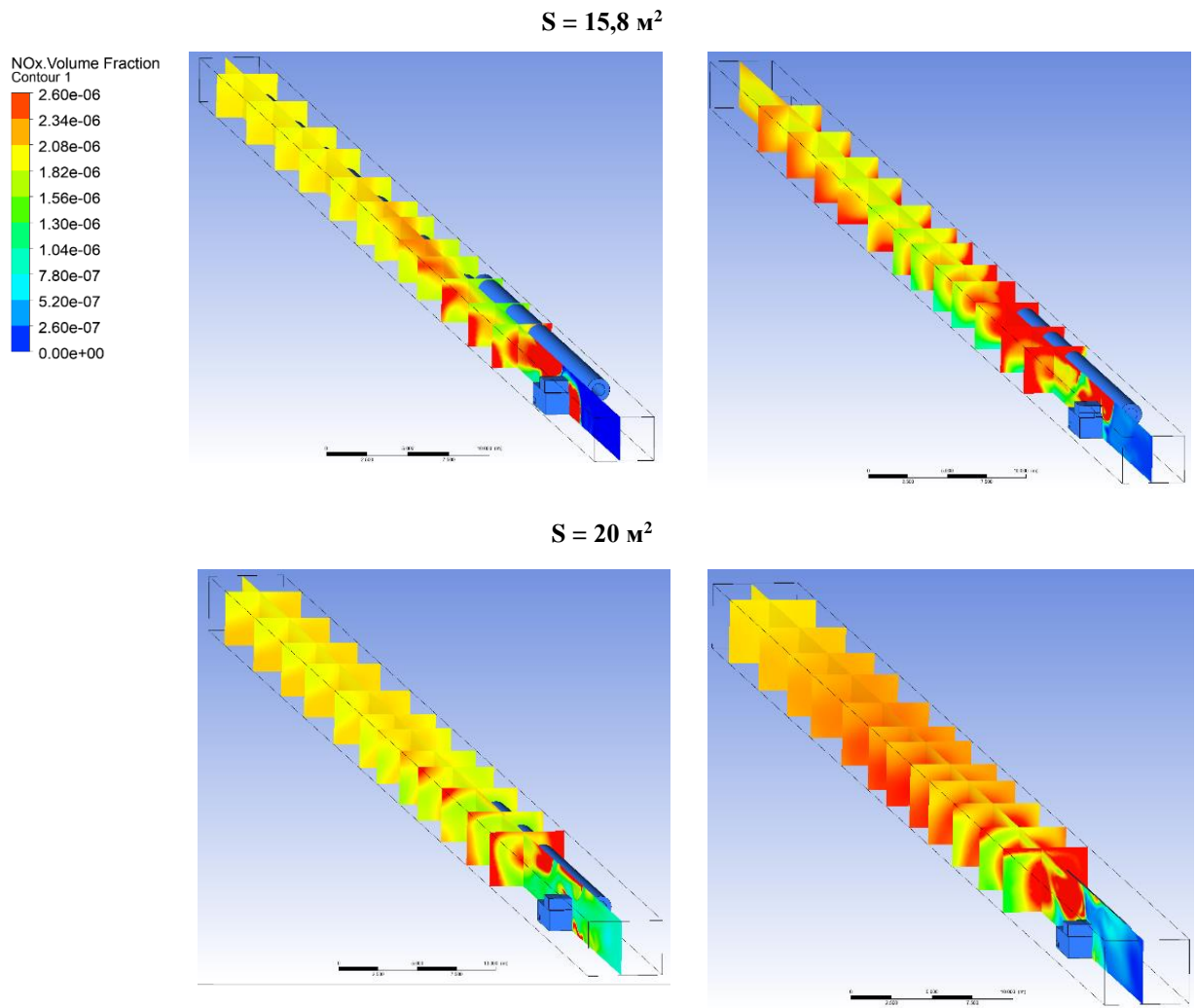


Рисунок 3.23 - Распределение концентраций CO и NOx в объёме модели при площади поперечного сечения горной выработки $15,8 \text{ м}^2$ и 20 м^2 (составлено автором)

3.6 Вывод по главе 3

Использование математического компьютерного моделирования для анализа состояния и состава атмосферы подземных горных выработок и влияющих на неё изменяющихся во времени и пространстве параметров, открывает новые области в

понимании и прогнозе распределения вредных и опасных для здоровья веществ в рабочей зоне.

В исследованиях оценивались величины концентраций оксидов азота и оксида углерода, выделяющихся при работе в подземной горной выработке машины с дизельным двигателем внутреннего сгорания. В моделировании учитывались изменяющиеся технические параметры эксплуатирующей техники, геометрические размеры подземной горной выработки, величина подаваемого воздуха, а также учитывалось движение машины по выработке при различных скоростях. Все вышеперечисленные факторы были взаимосвязаны со временем работы машины в тупиковой части и последующим её движением от забоя и к устью выработки.

ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ В ОБЛАСТИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ОТ ВЫБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ

4.1 Применение метода анализа размерности и безразмерных величин

Метод размерности представляет собой один из способов анализа физических процессов, позволяющий определить количество и структуру безразмерных отношений, состоящих из основных величин, оказывающих влияние на исследуемый объект. Его суть заключается в соотнесении единиц измерения рассматриваемых величин между собой с целью выявления основных зависимостей и критериев подобия, характеризующих исследуемый физический процесс.

Процесс формирования безразмерных комплексов основывается на основных закономерностях теории подобия, с дополнительной терминологией, рекомендованной Государственным стандартом обеспечения единства измерений.

Основная суть метода анализа размерности состоит в преобразовании исходных, выбранных первоначально, величин в определённые соотношения, единицы измерения в которых отсутствуют. Такой подход позволяет уменьшить влияние определенных условий проведения эксперимента и выявить фундаментальные закономерности, характерные для всей области физического процесса или явления. Метод анализа размерной имеет следующую чёткую последовательность:

1.Выбор переменных. Определяются основные физические величины, описывающие физический процесс.

2.Составление безразмерных комплексов. Определяются отношения между выбранными величинами таким образом, чтобы убрать их единицы измерения.

3.Анализ зависимости. Определяются зависимости между полученными комплексами.

Методы размерности тесно связаны с методами подобия, также используемыми в анализе научных исследований и инженерии. Подобие означает

наличие пропорциональности между различными факторами или параметрами процессов и модели.

При проведении экспериментов для установления связей между безразмерными параметрами используют методы статистического анализа и численного моделирования. Важно отметить, что выбор контрольных величин и соответствующих выбранных критериев существенно влияет на точность результатов. Экспериментальное исследование предполагает сбор первичных данных, представляющих начальные значения требуемых параметров, входящих в состав критериев подобия.

Одним из важнейших принципов, лежащих в основе анализа размерности, является требование размерностной однородности всех членов любого математического выражения. Согласно этому принципу, любое равенство, которое описывает зависимость между физическими величинами, должно удовлетворять условию размерностной эквивалентности. Иначе говоря, левая сторона уравнения обязана иметь такую же размерность, как и правая сторона того же самого уравнения. Аналогично, сумма или разность двух или более величин возможна лишь в том случае, если каждая из них обладает одинаковой размерностью.

Принцип обобщения, заложенный в основу метода подобия, направлен на установление функциональных соотношений между наблюдаемыми величинами в условиях отсутствия точной математической формулировки изучаемого явления. Основная цель инженерного расчета — получение значений интересующих параметров, однако конкретные способы вычислений зависят от выбора мер, используемых для описания величин. Здесь проявляется ключевое отличие между размерными и безразмерными величинами.

Размерные величины представляют собой количественные показатели, непосредственно зависящие от выбранной системы единиц измерения. Такие величины включают метр, секунду, килограмм и прочие стандартные меры, используемые повсеместно вне зависимости от особенностей конкретного явления. Напротив, безразмерные параметры характеризуются отсутствием привязанности к какому-либо фиксированному масштабу и формируются относительно

характерных размеров или интенсивностей самого исследуемого процесса. Безразмерные коэффициенты позволяют уйти от абсолютных значений и сфокусироваться исключительно на относительных характеристиках, облегчающих сравнение различных объектов и ситуаций.

4.2 Статическое положение транспортного средства

В настоящее время для определения разжижения вредных компонентов выхлопных газов стационарно стоящей машины используют формулу (14):

$$C = I/v_B S_{ГВ} , \quad (14)$$

где I – интенсивность выбросов, мг/м³

v_B – скорость воздуха, м/с

$S_{ГВ}$ – площадь поперечного сечения горной выработки, м²

Данная формула не определяет конкретное место по значению концентрации вредного вещества, а также такие параметры, как:

- отставание вентиляционного става от забойной части выработки;
- относительное расположение машины вентиляционного става;
- геометрии самой машины;
- месторасположения выхлопной трубы;
- температуру и скорость выхлопных газов;
- турбулентную составляющую.

В работе были сопоставлены результаты математического моделирования, учитывающего все вышеперечисленные факторы с данными уравнения. В каждом из вариантов был найден коэффициент, в совокупности учитывающий данные факторы. Рабочим местом для оценки соответствия значениям ПДК была принята кабина машиниста.

Обработка экспериментальных данных проводилась с применением безразмерных переменных, форма которых была установлена согласно положениям теории размерностей.

В качестве фундаментальных параметров, используемых при выведении безразмерных величин, являлись: Q_B – расход воздуха на выходе из трубопровода,

L_k – расстояние от выхлопной трубы до воздуховода, S_B – поперечная площадь горной выработки, $d_{тр}$ – диаметр выхлопной трубы, v_r – скорость выхлопных газов; C_i – концентрация вредного компонента на выхлопе.

Допуская, что между концентрацией вредного компонента в области рабочей зоны машиниста дизельного транспортного оборудования и установленным перечнем переменных, существенных для рассматриваемого процесса, существует функциональная зависимость формулы (15), имеем:

$$C = \varphi (v, d, Q, L, S, C_i) \quad (15)$$

Параметры указанной функции характеризуются следующими единицами измерения:

$$[v] = \text{м/с}$$

$$[d] = \text{м}$$

$$[Q] = \text{м}^3/\text{с}$$

$$[L] = \text{м}$$

$$[S] = \text{м}^2$$

$$[C_i] = \text{кг/м}^3$$

Размерностями основных физических величин для условий изучаемого процесса являются: масса М, длина L, время Т

Выберем в качестве величин, имеющих независимую размерность C_i d v и проверим правильность выбора. Для этого выразим размерности C_i d v через размерности основных физических величин.

$$[C_i] = \text{M}^1 \text{L}^{-3} \text{T}^0$$

$$[d] = \text{M}^0 \text{L}^1 \text{T}^0$$

$$[v] = \text{M}^0 \text{L}^1 \text{T}^{-1}$$

Вычислим определитель, составленный из показателей степеней этой системы уравнений.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0$$

Неравенство определителя, отличающееся от нуля, подтверждает корректность выбора величин с независимой размерностью.

Предположим, что функциональная связь между величинами с зависимой и независимой размерностями имеет вид степенной функции следующего вида формул (16-18):

$$Q = C_i^{x1} d^{y1} v^{z1} \quad (16)$$

$$L = C_i^{x2} d^{y2} v^{z2} \quad (17)$$

$$S = C_i^{x3} d^{y3} v^{z3} \quad (18)$$

Запишем в левой и правой частях системы уравнений (16-18) единицы измерения входящих величин:

$$M^3 \cdot C^{-1} = K\Gamma^{x1} \cdot M^{-3y1} \cdot M^{x2} \cdot M^{x3} \cdot C^{z3}$$

$$M^1 = K\Gamma^{x1} \cdot M^{-3y1} \cdot M^{x2} \cdot M^{x3} \cdot C^{z3}$$

$$M^1 \cdot C^{-1} = K\Gamma^{x1} \cdot M^{-3y1} \cdot M^{x2} \cdot M^{x3} \cdot C^{z3}$$

По составленной системе уравнений в соответствии с приведёнными выше показателям находим степени переменных.

Затем выражая отношение C/C_i по формулам (19) и (20) определяем безразмерные группы величин:

$$Z_1 = \frac{v \cdot d_{\text{тр}}^2}{Q_B}; Z_2 = \frac{d_{\text{тр}}}{L_K}; Z_3 = \frac{d_{\text{тр}}^2}{S_B} \quad (19)$$

$$C = A(Z_1)^{R_1} \cdot (Z_2)^{R_2} \cdot (Z_3)^{R_3} \quad (20)$$

В процессе оптимизации индексы степеней x и y подбирались таким образом, чтобы минимизировать отклонение от опытных данных и достичь максимального значения коэффициента корреляции.

Итогом стало установление оптимального набора параметров, при котором достигнут максимальный коэффициент корреляции, равный 0,95.

График зависимости концентрации в области кабины к концентрации выделяемого вредного компонента $C \setminus C_i$ от безразмерного параметра $Y = (Z_1)^{R_1} \cdot (Z_2)^{R_2} \cdot (Z_3)^{R_3}$ представлен на рисунке 4.1.

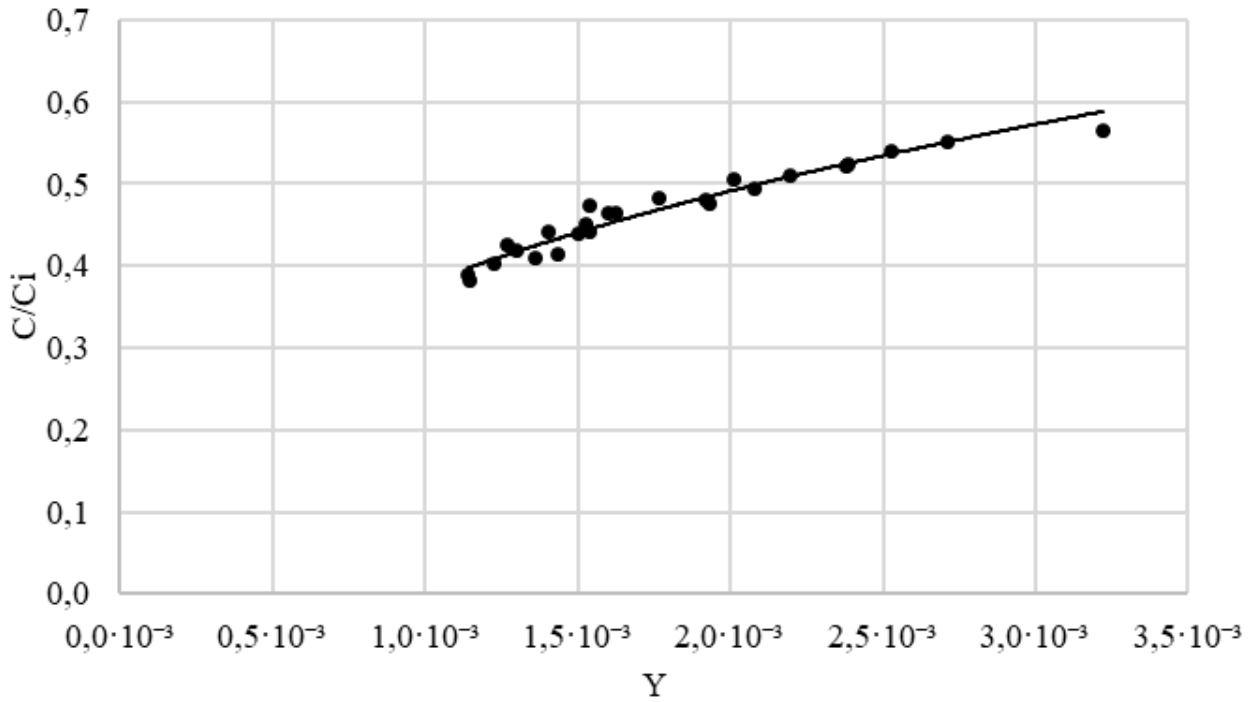


Рисунок 4.1 - График зависимости концентрации в области кабины к концентрации выделяемого вредного компонента C/C_i от безразмерного параметра Y (составлено автором)

Функция F , фигурирующая в рассматриваемом уравнении, представлена степенной зависимостью следующей формулы (21):

$$F = A (Y)^n \quad (21)$$

n и A соответственно равны 0,3781 и 0,031

Таким образом, окончательно выражение, характеризующее отношение концентрации вредного компонента в кабине к его исходной концентрации C/C_i как функция безразмерных параметров Z_1 , Z_2 и Z_3 , принимает следующую форму (22):

$$\frac{C}{C_i} = 0,031 \left(\frac{v_r \cdot d_{\text{ТР}}^2}{Q_B} \right)^{0,36} \cdot \left(\frac{d_{\text{ТР}}}{L_K} \right)^{0,13} \cdot \left(\frac{d_{\text{ТР}}^2}{S_B} \right)^{0,02} \quad (22)$$

4.3 Динамическое движение транспортного средства

При прогнозировании распределения концентраций вредных компонентов в процессе цикла работы погрузо-доставочной машины с дизельным двигателем внутреннего сгорания в условиях подземных тупиковых горных выработок важно учитывать динамику всего происходящего в течение некоторого времени газораспределения.

С динамическим движением транспортного средства, в отличие от стационарной постановки, возникают дополнительные факторы, влияющие на газовый баланс. Движущаяся машина создаёт дополнительное возмущение воздушной среды, источник выброса постоянно меняет своё местоположение во времени, уже выброшенные в атмосферу вредные вещества меняют своё распределение. Всё это обуславливает важность контроля и прогноза за состоянием воздуха в пределах рабочей зоны машиниста.

После уборки горной массы транспортное средство начинает своё движение задним ходом к устью выработки. На момент движения в воздухе уже присутствует определённое распределение загрязняющих веществ, оставшееся с процесса стационарной погрузки и черпания. Это распределение меняется в каждый момент времени. Тем не менее, машина начинает движение по такому воздуху, дополнительно выделяя в атмосферу загрязняющие вещества.

Также, учитывалось различное количество выделяемых концентраций вредных компонентов выхлопных газов на этапах низкой нагрузки на двигатель, погрузки рудной массы, движения гружёной и порожней погрузо доставочной машины при изменении количества выделяемых начальных продуктов неполного сгорания, скорости выхлопных газов и температуры.

Аналогично анализу при статическом расположении в горной выработке машины с ДВС была произведена обработка экспериментальных данных безразмерными переменными на основании теории размерностей.

В качестве основных параметров для условий динамического движения транспортного средства по формулам (23) и (24) были $t_{\text{стац}}$ – нахождения машины в стационарном режиме, $t_{\text{дин}}$ – время проделывания машиной высококонцентрированного участка выработки, $v_{\text{в}}$ – скорость воздуха в горной выработке; $v_{\text{м}}$ – скорость движения машины.

$$Z_1 = \frac{t_{\text{ст}}}{t_{\text{дин}}}; Z_2 = \frac{v_{\text{в}}}{v_{\text{м}}} \quad (23)$$

$$C = A(Z_1)^{R_1} \cdot (Z_2)^{R_2} \quad (24)$$

В результате было установлено, что максимальное значение коэффициента корреляции, равно 0,95.

График зависимости концентрации в области кабины при движении машины к концентрации при статическом положении компонента $C_{\text{дин}} \setminus C_{\text{ст}}$ от безразмерного параметра $Y = (Z_1)^{R_1} \cdot (Z_2)^{R_2}$ представлен на рисунке 4.2.

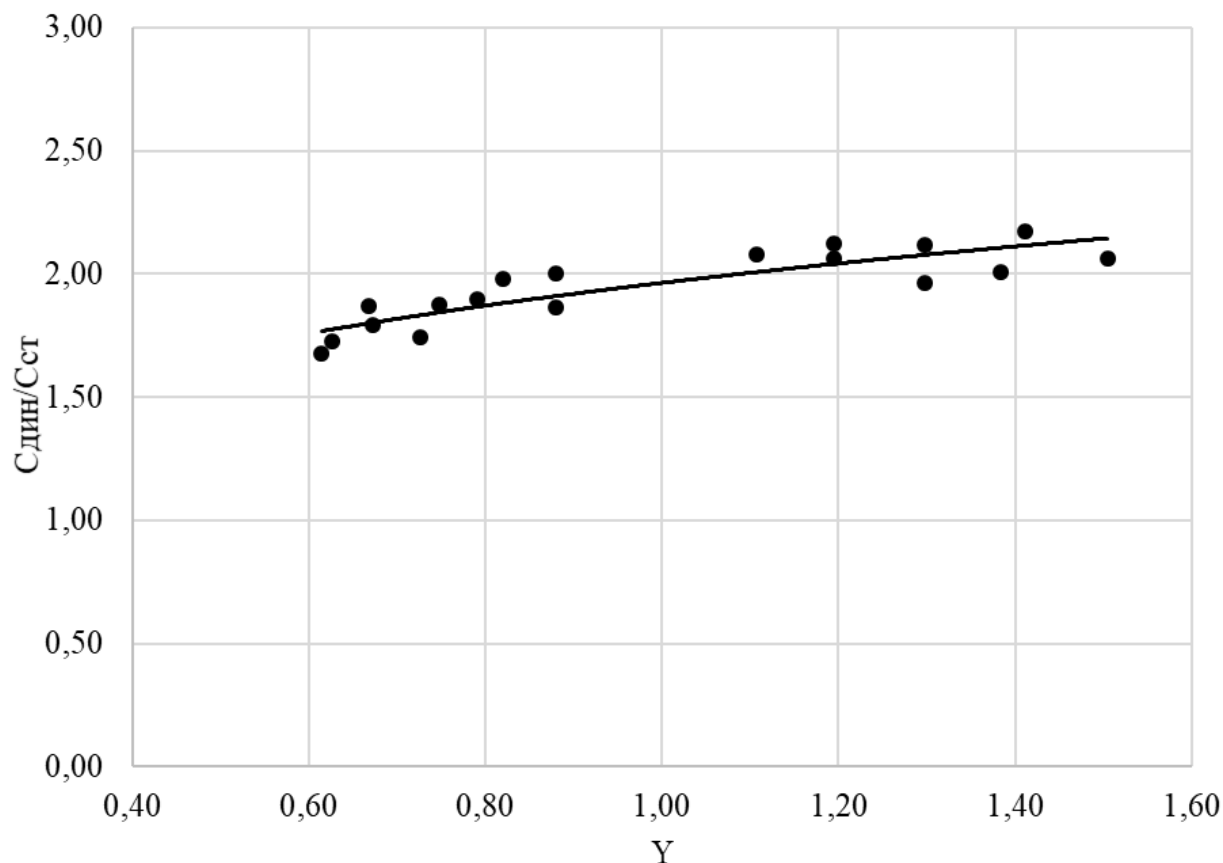


Рисунок 4.2 - График зависимости концентрации в области кабины к концентрации выделяемого вредного компонента $C_{\text{дин}} \setminus C_{\text{ст}}$ от безразмерного параметра Y (составлено автором)

Функция F в формуле аппроксимирована степенной зависимостью, которая имеет вид формулы (25):

$$F = A (Y)^n \quad (25)$$

где n и A соответственно равны 0,227 и 1,36

Окончательно зависимость концентрации в области кабины при движении машины к концентрации при статическом положении $C_{\text{дин}} \setminus C_{\text{ст}}$ относительно безразмерных параметров Z_1 , и Z_2 имеет вид:

$$\frac{C_{\text{дин}}}{C_{\text{ст}}} = 1,36 \cdot \left(\frac{t_{\text{ст}}}{t_{\text{дин}}}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{v_{\text{в}}}{v_{\text{м}}}\right)^{0,08} \quad (26)$$

После объединения зависимостей (22) и (26) может быть вычислен расход воздуха $Q_{\text{в}}$, при котором выполняется условие равенства $C_{\text{дин}}$ нормативному значению предельно-допустимой концентрации $C_{\text{ПДК}}$ для NO_x согласно формулам (27) и (28).

$$Q_{\text{в}} = \left(\frac{K}{C_{\text{ПДК}}}\right)^{3,5}, \quad (27)$$

$$\text{где } K = \frac{0,042 \left(\frac{t_{\text{ст}}}{t_{\text{дин}}}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{d_{\text{гр}}}{L_{\text{к}}}\right)^{0,13} \cdot \left(\frac{d_{\text{гр}}^2}{S_{\text{в}}}\right)^{0,13} \cdot C_i \cdot (v_{\text{г}} d_{\text{гр}}^2)^{0,36}}{(S_{\text{в}} v_{\text{м}})^{0,08}} \quad (28)$$

Расчёты, выполненные по уравнению (27), были сопоставлены с вычислениями, основанными на использовании методики для определения расхода воздуха, основанной на статическом разжижении выбросов выхлопных газов при работе машин с ДВС.

Величины необходимого расхода оказались ниже в среднем на 14%, чем вычисленные по традиционным зависимостям, которые получены при условии «статического разжижения) загрязнённого воздуха.

4.4 Выводы по главе 4

1. На основе исходных данных, полученных при осуществлении натурных замеров, выполнено математическое моделирование распределения концентраций CO и NO_x по длине тупиковой выработки при нахождении машины с ДВС в забое выработки и при её движении к устью

2. Разработанная компьютерная модель позволила спрогнозировать изменение в величинах концентраций вредных компонентов выхлопных газов в области рабочей зоны машиниста самоходного дизельного оборудования.

3. Математической обработки результатов численных расчётов с помощью безразмерных чисел подобия, полученных на основе теории размерностей, позволила установить эмпирические зависимости, определяющие распределение концентраций загрязняющих компонент по длине тупиковой выработки в зависимости от её горнотехнических параметров, объёма выброса загрязняющих

веществ, расхода подаваемого воздуха и соотношения скоростей воздуха и транспортного средства.

4. На основе математического преобразования полученных эмпирических зависимостей выведены формулы для вычисления необходимого количества воздуха, обеспечивающего нормативные концентрации CO и NO_x на рабочем месте водителя при движении машины от забоя к устью тупиковой выработки.

5. Выполненные расчёты по полученным формулам для условий рассматриваемой тупиковой выработки показали, что возможность сокращения необходимого расхода на 14 % по сравнению со значениями, полученными по общепринятым зависимостям, основанным на принципе «статического разжижения».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе даны ряд решений актуальных задач, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации транспортных дизельных средств с двигателями внутреннего сгорания в подземных тупиковых горных выработках по газовому фактору. На основе экспериментальных данных, полученных в результате производственной стажировки, и теоретических исследований выполнено математическое компьютерное моделирование аэрогазодинамических процессов в воздушной среде тупиковых подземных горных выработок.

Выполненные автором исследования позволяют сделать следующие выводы и дать рекомендации:

1. Необходимое количество воздуха для проветривания сооружаемых горных выработок при использовании горных машин и механизмов с двигателями внутреннего сгорания, должно определяться возможностью обеспечения нормативных концентраций основных загрязняющих компонентов CO и NO_x у кабины водителя на основе комплексных исследований, включающих натурные измерения параметров выбросов выхлопных газов, в том числе скорость их истечения, выходные концентрации, температуру газозвдушного потока, а также последующее математическое моделирование аэрогазодинамических процессов, учитывающее последовательность выполнения технологических операций по погрузке разрыхлённого полезного ископаемого и его последующей транспортировке на поверхность, реальных геометрических параметров выработок и размеров транспортного средства, относительного расположения кабины машиниста и воздуховода для подачи воздуха.

2. Для осуществления натурных исследований в условиях сооружаемой выработки предложена оригинальная методика определения количества воздуха для достижения по длине выработки нормативной концентрации вредных компонентов выброса выхлопных газов при нахождении горнотранспортной машины в проходческом забое.

3. Обоснованы аэрогазодинамические модели и осуществлен численный эксперимент, на основании которого установлены распределения концентраций CO и NO_x в каждом поперечном сечении по длине выработки как для условия стационарного расположения машины с ДВС в забое, так и в случае её движения по направлению к устью выработки после фиксированного времени нахождения в забое.

4. На основании сопоставления данных натуральных наблюдений и результатов численного эксперимента подтверждена возможность использования математической модели для анализа аэрогазодинамических процессов, протекающих в условиях реальных выработок.

5. На основании теории размерностей получены безразмерные комплексы и симплексы, с помощью которых осуществлена статистическая обработка данных численных экспериментов с получением корреляционных зависимостей относительной концентрации загрязняющих компонентов как при стационарном расположении машины с ДВС в забое, так и в случае её движения по направлению к устью выработки.

6. Предложен алгоритм вычисления необходимого для обеспечения у кабины водителя нормативных концентраций, загрязняющих компонентов, расхода воздуха при движении машины с ДВС по направлению к устью выработки.

7. На основе математического преобразования полученных эмпирических зависимостей выведены формулы для вычисления необходимого количества воздуха, обеспечивающего нормативные концентрации CO и NO_x на рабочем месте водителя при движении машины от забоя к устью тупиковой выработки.

8. Дальнейшие исследования предполагают совершенствования существующих зависимостей, уточнения коэффициентов, определение новых зависимостей от других параметров, а также универсализацию разработанного подхода для условий иных горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурахманова, Э. Г. Влияние выхлопных газов на организм человека / Э. Г. Абдурахманова // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – № 1-1(4). – С. 53-57. – EDN VLCRDP.
2. Александрова, А. Ю. Распределение пыли общераспространенных полезных ископаемых в атмосфере Байкальской природной территории / А. Ю. Александрова // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – Т. 6, № 3(23). – С. 309-318. – DOI 10.21285/2500-1582-2021-3-309-318. – EDN VVSXZR.
3. Альферович, В. В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. В 2 ч. Ч. 1. Анализ состава отработавших газов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» дневной и заочной форм обучения / В. В. Альферович. – Минск: БНТУ, 2016. – 54 с.
4. Амосов, П. В. Результаты численного моделирования аэродинамики тупиковых выработок при беструбном способе проветривания // математические методы в технике и технологиях - мтт. – 2020. – т. 2. – с. 114-117
5. **Белехов, П. А.** Математическое моделирование разбавления выхлопных газов при работе ДВС в подземных горных выработках / **П. А. Белехов** // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – Т. 1. – С. 388-391. – EDN HSVMRI.
6. **Белехов, П. А.** Применение математического моделирования для оценки влияния параметров проветривания на эффективность разбавления дизельных газов / **П. А. Белехов** // Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XX Всероссийской конференции-конкурса студентов выпускного курса и аспирантов, Санкт-Петербург, 02–06 декабря 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2025. – Т. 1. – С. 225-226. – EDN FLSEAL.

7. **Белехов, П.А.** Определение параметров гидродимпульсного воздействия на неразгруженный угольный пласт для увеличения его газовой проницаемости на этапе заблаговременной дегазации / **П.А. Белехов**, А.С. Серегин // Метан угольных пластов: Тезисы докладов XI научно-практической конференции ООО "Газпром добыча Кузнецк", Кемерово, 25 сентября 2024 года. – Кемерово: ООО "Газпром добыча Кузнецк", 2024. – С. 29-30. – EDN TXSHXQ.

8. Биматов, В. И. Математическое моделирование обтекания тел на основе программного модуля ANSYS CFX / В. И. Биматов, В. В. Фарапонов, Н. В. Савкина // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6-3. – С. 8-10. – EDN RZRBTP.

9. Бродов, Ю. М. Особенности верификации CFD-модели осевого компрессора. Часть 2. Анализ интегральных параметров /, О. В. Комаров, В. А. Седунин [и др.] // Компрессорная техника и пневматика. – 2018. – № 4. – С. 19-23. – EDN JGRLWJ.

10. Влияние параметров тупикового забоя, погрузочно-доставочного оборудования и системы вентиляции на качество вдыхаемого воздуха работающих под землёй / А. С. Серегин, Д. А. Иконников, **П. А. Белехов** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 406-420. – EDN UJQJSW.

11. Влияние расположения вентиляционного трубопровода на эффективность проветривания тупиковой горной выработки при эксплуатации машин с двигателями внутреннего сгорания / А. С. Серегин, К. Д. Ахтямов, И. Р. Фазылов, **П. А. Белехов** // Горный журнал. – 2025. – № 5. – С. 66-72. – DOI: 10.17580/gzh.2025.05.09. – EDN UYYMQV.

12. Гаврилова, А. И. Метод конечных элементов : Практикум / А. И. Гаврилова, С. В. Скориков, П. В. Рожков ; Рецензенты: доктор технических наук, профессор, проректор по НИ и ИД Северо-Кавказского государственного технического университета Слюсарев Г. В., кандидат архитектуры, доцент, заведующий кафедрой строительства Северо-Кавказского гуманитарно-технического института Максименко А. Т.. – Ставрополь: Северо-Кавказский государственный технический университет, 2012. – 65 с. – EDN STMQUJ.

13. Гендлер, С. Г. Экспериментальное определение количества воздуха, необходимого для проветривания рудника по фактору разбавления выбросов загрязняющих веществ от машин с двигателями внутреннего сгорания / С. Г. Гендлер, А. С. Серёгин, И. Р. Фазылов, **П.А. Белехов** // Горная промышленность. – 2025. – № 6. – С. 173-180. – DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-173-180. – EDN ACLOCI.

14. Гендлер, С.Г. Методика определения параметров системы подогрева воздуха в железнодорожных тоннелях, расположенных в суровых климатических условиях / С.Г. Гендлер, С.В. Синявина // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 215-222. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.215

15. Гендлер, С.Г. Исследование влияния эксплуатационно-конструкционных характеристик дизельной техники на загазованность подземных горных выработок / С. Г. Гендлер, А. С. Серёгин, **П.А. Белехов** // Горная промышленность. – 2025. – № 4. – с. 170–177. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-170-177

16. Голик, В. И. К проблеме минимизации объемов мобильной пыли при разработке карьеров / В. И. Голик, З. А. Гашимова, М. Ю. Лискова, Ч. Б. Конгар-Сюрюн // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 11. – С. 28-33. – DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33. – EDN JOPRZV.

17. Голик, В. И. Минимизация запыленности атмосферы при добыче угля открытым способом / В. И. Голик // Уголь. – 2025. – № 3(1191). – С. 126-131. – DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-126-131. – EDN CUUBWP.

18. ГОСТ 21393 75. Автомобили грузовые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы контроля при оценке технического состояния. —Введ. 1977 01 01. —Издательство стандартов, 1976. — 12 с.

19. Гришин, Е. Л. Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляции в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания / Е. Л. Гришин, А. В. Зайцев, Е. Г. Кузьминых // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 280-290. – DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.8. – EDN OGBKME.

20. Давыдов, С. Я. Пылеобразование и использование пыли горных пород на промышленных объектах / С. Я. Давыдов, Н. Г. Валиев, Н. М. Суслов [и др.] // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 3(43). – С. 87-90. – DOI: 10.21440/2307-2091-2016-3-87-90. – EDN WWNYNP.

21. Далбаева, Е. П. Обоснование эффективных мер борьбы с пылью на карьерах криолитозоны / Е. П. Далбаева // Записки Горного института. – 2014. – Т. 207. – С. 110-111. – EDN SGODRB.

22. Звягинцева, А. В. Моделирование неорганизованных выбросов пыли и газов в атмосферу при взрывных работах на карьерах горно-обогатительных комбинатов / А. В. Звягинцева, С. А. Сазонова, В. В. Кульнева // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 17-25. – DOI: 10.12737/article_5db1e3e5f283f0.11268387. – EDN SENWHX.

23. Зубарева, К. С. Влияние выхлопных газов на организм человека / К. С. Зубарева, С. А. Шатохина // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых- 2018 : сборник научных статей 7-й Международной молодежной научной конференции : в 4 т., Курск, 13–14 ноября 2018 года. Том 4. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2018. – С. 34-36. – EDN YTQQRF.

24. Казаков, Б. П. О возможности проветривания тупиковых выработок беструбным способом / Б. П. Казаков, А. В. Шалимов, О. С. Паршаков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 195-199. – EDN SMMGZL.

25. Казанцева, У. Д. Морфологические характеристики, размер и Масса пыли PM_{0,1} около угольных карьеров / У. Д. Казанцева, О. С. Яковенко, М. К. Лешукова [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 2. – С. 90-95. – DOI: 10.17513/use.38003. – EDN XZFHNO.

26. Каледина, Н. О. Моделирование пульсирующего проветривания горных выработок / Н. О. Каледина, С. С. Кобылкин, А. С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S7. – С. 449-453. – EDN ONBXFX.

27. Каримов, А. М. Обоснование способов подавления респираторной фракции пыли при производстве массовых взрывов на гранитных карьерах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каримов Артур Маратович. – Санкт-Петербург, 2024. – 139 с. – EDN МОККХН.

28. Кобылкин, А. С. Исследование распределения вредных газов в горных выработках с использованием компьютерного моделирования / А. С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 10. – С. 202-207. – EDN SXWUER.

29. Кобылкин, С. С. Моделирование влияния ветра и температуры воздуха на распределение токсичных газов и дыма при пожаре на метромосту / С. С. Кобылкин, Н. О. Каледина, А. С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 11. – С. 147-162. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_147. – EDN LJCPVY.

30. Ковшов, С. В. Оценка выбросов пыли при транспортировании горной массы на месторождениях, разрабатываемых открытым способом / С. В. Ковшов, А. В. Пасынков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 2. – С. 78-87. – EDN LVSUPO.

31. Козырев, С. А. Численное моделирование процесса проветривания одиночной тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения / С. А. Козырев, П. В. Амосов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2017. – № 14. – С. 291-294

32. Козырева, Е.Н., Шинкевич М.В. Особенности газогемеханических процессов на выемочном участке шахты//вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, 2010, номер 2, с. 28-35

33. Колесов, Е. В. Разработка методики расчета количества воздуха, требуемого для проветривания тупиковых проходческих выработок после взрывных работ // Горное эхо. – 2019. – Т. 76. – № 3. – С. 80-84. DOI: 10.7242/echo.2019.3.22

34. Кондрашева, Н. К., Еремеева А. М., Нелькенбаум К. С. Разработка отечественной технологии получения высококачественного экологически чистого

дизельного топлива // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. - 2018. - Т. 61. - №. 9-10-62-68. DOI: 10.6060/ivkkt.20186109-10.5651

35. Копин, С. В., Зырянов И. В. Проветривание тупиковых выработок большой длины на примере рудника «Юбилейный» АК «АЛРОСА» (ПАО) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1. – С. 34–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_34.

36. Коршунов, Г.И., Еремеева А.М., Дребенштедт К. Обоснование применения растительной добавки к дизельному топливу в качестве способа защиты подземного персонала угольных шахт от воздействия вредных выбросов дизель-гидравлических локомотивов // Записки Горного института. 2021. (247). С. 39-47. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.5

37. Крутских, Н. В. Анализ зоны воздействия горнодобывающих предприятий с использованием геоинформационных технологий / Н. В. Крутских // География и природные ресурсы. – 2021. – Т. 42, № 1. – С. 141-148. – DOI: 10.15372/GIPR20210116. – EDN UAHNZA.

38. Кузьминых, Е. Г. Разработка модели распределения продуктов выхлопных газов в сквозных выработках / Е. Г. Кузьминых, Л. Ю. Левин, С. В. Мальцев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 512-528. – EDN WCQFAA.

39. Кулик, А. И. Особенности моделирования аэрогазодинамики очистного забоя угольной шахты / А. Н. Тимченко, В. Н. Костеренко, С. С. Кобылкин // Уголь. – 2023. – № 3(1165). – С. 75-78. – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-75-78. – EDN ENJNVX.

40. Лиханов, В.А., Лопатин О.П. Исследование токсичности биодизельного двигателя, работающего на спирте//Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки, 2019, Том 25 Номер 1, с.92-100

41. Лиханов, В.А., Лопатин О.П. Применение природного газа в дизеле с турбонаддувом//Транспорт на альтернативном топливе, 2016, Номер 4(52), с.35-43

42. Магомет, Р. Д. Повышение эффективности предварительной дегазации угольных пластов / Р. Д. Магомет, А. С. Серегин // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 92-95. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.18

43. Маслов, И. П. Вопросы обеспечения энергетической эффективности и безопасности ведения горных работ за счет усовершенствования систем управления вентиляторами местного проветривания угольных шахт / И. П. Маслов, И. Ю. Семькина // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 1-2. – С. 105-110.

44. Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). 1999-01-01 - Институт горного дела им. А.А. Скочинского

45. Митрофанова, Ю. А. Оценка влияния учёта сопряжённого теплообмена между частями камеры сгорания и реагирующим потоком на результаты моделирования эмиссии оксидов азота / Ю. А. Митрофанова, Р. А. Загитов, П. В. Трусов // Труды МАИ. – 2023. – № 132. – EDN GDEOXS.

46. Накаряков, Е. В., Гришин Е. Л. Анализ влияния производственного цикла работы погрузочно-доставочной машины в очистной тупиковой камере на эффективность проветривания // Горное эхо. – 2020. – № 3(80). – с. 120-123. DOI: 10.7242/echo.2020.3.23

47. Новиков, А.В., Паневников К.В., Писарев И.В., Правила безопасности в угольных шахтах//Горная промышленность, 2019, Номер 2(144), с.42-46

48. Панфилов, И. А. Профилактика загрязнения воздушной среды при открытой разработке рудных месторождений / И. А. Панфилов, О. А. Антамошкин, Н. В. Федорова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 11-1. – С. 252-264. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_252. – EDN WIDALA.

49. Папичев, В. И. Оценка опасности воздействия выбросов пыли карьерными источниками на почвенный покров / В. И. Папичев, А. Н. Прошляков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 2. – С. 315-327. – EDN YJKLPF.

50. Патент № 2479721 Российская Федерация, МПК E21C 41/32. способ рекультивации карьеров с использованием промышленных отходов: № 2011142936/03: заявл. 24.10.2011: опубл. 20.04.2013 / Е. А. Пендюрин, И. В. Старостина, С. П. Дрожжин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – EDN ZGQVVR.

51. Патент на изобретение № 2851560 Российская Федерация, МПК E21F 1/08 (2006.01), F24F 7/04 (2006.01). Система проветривания протяженных тупиковых выработок. Заявка № 2025111943: заявл. 27.02.2025: опубл. 25.11.2025 / С.Г. Гендлер, Д.А. Иконников, А.С. Серегин, **П.А. Белехов**, М.А. Подрезова; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 11 с.: ил.

52. Пелегов, Д. В. Государственная поддержка электрического транспорта в Китае: причины, меры и перспективы / Д. В. Пелегов, Г. А. Еременко // Экономика региона. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 921-934. – DOI: 10.17059/ekon.reg.2020-3-19. – EDN THTPMG.

53. Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» Зарегистрировано в Минюсте России 21.12.2020 № 61651

54. Прокофьев, В. А. Динамика размывов дна вблизи гидротехнических сооружений: 3d численная модель и её тестирование на референтных экспериментальных данных / В. А. Прокофьев // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2019. – Т. 293. – С. 45-72. – EDN GGGTXU.

55. Радионова, Е. А. Влияние интенсивной угледобычи на качество жизни населения / Е. А. Радионова, Ю. С. Якунина // Уголь. – 2025. – № 2(1190). – С. 130-135. – DOI: 10.18796/0041-5790-2025-2-130-135.. – EDN CTZGRS.

56. РД 03-433-02. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. — Утверждён Постановлением Госгортехнадзора России от 12.07.2002 № 30. — М.: Госгортехнадзор России, 2002

57. Росляков, А. С., Исаков В. А. Проветривание призабойной зоны тупиковой горной выработки двумя последовательными свободными струями // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2011. – № 5. – С. 57-62

58. Савон, Д.Ю. Современные подходы к системе промышленной безопасности на угольных предприятиях// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2018, Номер 11, с.227-235

59. Саженкова, Т.В. Методы анализа временных рядов [Текст]: учебно-методическое пособие / И.В. Пономарёв, С.П. Пронь. – Барнаул: Издво Алт. ун-та. – 2020. – 60 с

60. Семин, М.А., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // записки горного института. 2020 г.

61. Серёгин, А. С. К вопросу организации защиты систем аэрогазового контроля шахты от ложных срабатываний при работе дизельного технологического оборудования / А.С. Серёгин, Д. А. Иконников, **П. А. Белехов** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 27. – С. 77-81. – DOI: 10.26160/2658-3305-2024-27-77-81. – EDN KMPYBZ.

62. Скопинцева, О.В., Баловцев С.В., Коликов К.С. Управление аэрологическими рисками при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт//горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2020, номер 6, с. 85-94

63. Смирняков, В.В., Фьен Н.М. Обоснование методики аэрологической оценки метаноопасности при проведении подготовительных выработок на шахтах Вьетнама // Записки Горного института. 2018. (230). С. 197. DOI: 10.25515/pmi.2018.2.197

64. Соколов, Э. М. Углекислый газ в угольных шахтах / Э. М. Соколов, Н. М. Качурин. - м.: недра, 1987. - 141 с.

65. Султангильдин, Д. Г. Исследование кавитационных процессов и численное моделирование гидродинамики в вихревом теплогенераторе активного типа в пакете ANSYS CFX / Д. Г. Султангильдин // Проблемы науки. – 2017. – № 10(23). – С. 40-46. – EDN YMCRGL.

66. Требования к построению, содержанию и изложению расчетных методик определения выбросов вредных веществ в атмосферу: Письмо ГГО им. А.Н. Воейкова. - Л., 1986.

67. Трипати, Д. П. Оценка загрязнения воздуха микроэлементами и частицами взвешенной пыли на высокомеханизированном угольном карьере / Д. П. Трипати, Т. Р. Даш // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 4. – С. 188-200. – DOI: 10.15372/FTPRPI20180421. – EDN XZBLVB.

68. Усманова, Р. Р. Численное моделирование многофазных течений в Ansys CFX / Р. Р. Усманова, В. Г. Тихненко, А. И. Имамзаде // Естественные и технические науки. – 2022. – № 12(175). – С. 436-437. – EDN ZRTMDA.

69. Хазинс, В. М. Трехмерное моделирование распространения облака взвешенной пыли за пределами горнорудного карьера при массовых взрывах / В. М. Хазинс, В. В. Шувалов, С. П. Соловьев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – № 4. – С. 29-41. – DOI: 10.15372/FTPRPI20240402. – EDN HFYLYXQ.

70. Хасанова, Р. Ф. Оценка эколого-геохимического состояния почв и запыленности атмосферного воздуха в селитебной зоне центра горнорудной промышленности / И. Н. Семенова, Ю. С. Рафикова [и др.] // Самарский научный вестник. – 2018. – Т. 7, № 4(25). – С. 138-144. – DOI: 10.24411/2309-4370-2018-14124. – EDN YPPGGL.

71. Хаустов, В. В. Об экологической стороне процессов разработки полиметаллического месторождения Тырнауз. Часть 1. Пылевывбросы / В. В. Хаустов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 2(19). – С. 52-62. – EDN WMUUCX.

72. Чеботарёв, А.Г. Загрязнение рудничной атмосферы выхлопными газами самоходного оборудования и мероприятия по ее нормализации / А.Г. Чеботарёв, И.Ю. Гибадулина, Н.С. Горячев // «Горная Промышленность» №2 (144) / 2019 DOI: 10.30686/1609-9192-2019-2-144-74-76

73. Чеботарёв, А.Г., Гибадулина И.Ю., Горячев Н.С. Гигиеническая оценка физико-химических свойств рудничного аэрозоля. Профессиональная патология горнорабочих, обслуживающих самоходное дизельное оборудование. Горная промышленность. 2020;(2):130-135. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-130-135

74. Чеботарев, А. Г. Профессиональные риски, патология органов дыхания горнорабочих, обслуживающих самоходные машины с дизельным приводом / А. Г. Чеботарев, И. Ю. Гибадулина // Горная промышленность. – 2016. – № 2(126). – С. 75. – EDN WGEXTZ.

75. Шилкова, О. С. Способы снижения негативного влияние отработавших газов автотранспортных средств при разработке месторождений полезных ископаемых / О. С. Шилкова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 7. – С. 167-169.

76. Янченко, Г. А. Минеральный состав и плотность частиц пыли, оседающей после массовых взрывов за пределами карьеров Михайловского и Стойленского ГОКов / Г. А. Янченко, О. Г. Карпов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 9. – С. 56-57. – EDN MUXECD.

77. Aharonyan, G. A. The optimal length of the sealing material as the main index of regulating the massive explosion activities / G. A. Aharonyan, A. G. Aharonyan // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, Material science, Mining Engineering. – 2020. – No. 2. – P. 92-105. – EDN UXZHVZ.

78. Alahmadi, Y. H. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator / Y. H. Alahmadi, A. F. Nowakowski // Chemical Engineering Science. – 2016. – Vol. 147. – P. 150-165. – DOI: 10.1016/j.ces.2016.03.023. – EDN WPCDMP.

79. Anisimov, A., Chernyshkov I. The linearization method to calculate the equilibrium composition of combustion products of diesel engine// Omsk State Transport

University, 35 Prospekt Marksa, Omsk, 644046, Russian Federation, 2023 pp. 477-483
DOI: 10.1007/978-3-031-11051-1_47

80. Authority: 30 U.S.C. 957, 961.30. CFR part 36 - approval requirements for permissible mobile diesel-powered transportation equipment//Title 30 – Mineral lands and mining, Schedule 31, 26 FR 645, jan. 24 1961, <https://www.ecfr.gov/current/title-30/chapter-I/subchapter-B/part-36#part-36>

81. Benbrahim-tallaa I. Et al. Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes // the lancet oncology, 2012, vol. 13, no. 7, pp. 663-664.
DOI: 10.1016/s1470-2045(12)70280-2

82. Bestel, D., Bayliff, S., Marchese, A., Windom, B., Xu, H. Multi-dimensional modeling of the cfr engine for the investigation of si natural gas combustion and controlled end-gas autoignition// ASME 2020 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, 2021, № V001T06A012, 168260, DOI: 10.1115/ICEF2020-2992

83. Bickert, S., Kampker A., Greger D. Developments of CO₂-emissions and costs for small electric and combustion engine vehicles in Germany //Transportation Research Part D: Transport and Environment. - 2015. - T. 36. - C. 138-151. DOI: 10.1016/j.trd.2015.02.004

84. Bugarski a. D. Et al. Diesel aerosols and gases in underground mines; guide to exposure assessment and control. Pittsburgh: pa, 2011, 159 p.

85. Caprino, L, Togna GI. Potential health effects of gasoline and its constituents: a review of current literature (1990–1997) on toxicological data. Environ Health Perspect 1998; 106:115–25. DOI: 10.1289/ehp.98106115

86. Chang, p. Et al. Minimizing dpm pollution in an underground mine by optimizing auxiliary ventilation systems using cfd //tunnelling and underground space technology. – 2019. – т. 87. – с. 112-121. DOI: 10.1016/j.tust.2019.02.014

87. Chedevergne, F. The k– ω Shear Stress Transport Model with $\omega=0$ at the Wall / F. Chedevergne // AIAA Journal. – 2025. – Vol. 63, No. 11. – P. 5021-5024. – DOI 10.2514/1.j066004. – EDN CRPXBO.

88. Corsini, A. Marchegiani A., Rispoli F., Sciulli F., Venturini P. (2015). Vegetable Oils as Fuels in Diesel Engine. Engine Performance and Emissions. Energy Procedia, 81, 942-949. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.151

89. De Robbio, R., Cameretti, M.C., Tuccillo, R. Ignition and combustion modeling in a dual fuel diesel engine// Propulsion and Power Research, 2020, Том 9(2), с.116-131, DOI: 10.1016/j.jprr.2020.02.001

90. Diesel Net (2012). Emissions Standards: United States. США, [Официальный сайт]. URL: <https://www.dieselnets.com//standards/us/nonroad.php> (дата обращения: 12.02.2021).

91. Eremeeva, A. M., Kondrasheva N. K., Korshunov G. I. Method to reduce harmful emissions when diesel locomotives operate in coal mines //Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. - CRC Press, 2019. - С. 10-15. DOI: 10.1201/9781003014577

92. Georgiou, C., Azimov, U. Analysis and multi-parametric optimisation of the performance and exhaust gas emissions of a heavy-duty diesel engine operating on miller cycle// Energies, 2020, Том 13(14) с.3724 DOI: 10.3390/en13143724

93. Halim, A. Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines- are we using the correct values? 16th north american mine ventilation symposium. - golden, colorado. 2017, pp. 1-7. DOI: 10.1007/s42461-021-00483-y

94. Haney, R.A., 2012. Ventilation requirements for modern diesel engines, in proceedings of 14th us // Nort American mine ventilation symposium, salt lake city, Utah, USA, (eds: f. Calizaya and m.nelson), pp. 249-256

95. Hurther, D. Turbulent transport in the outer region of rough-wall open-channel flows: the contribution of large coherent shear stress structures (LC3S) / D. Hurther, U. Lemmin, E. A. Terray // Journal of Fluid Mechanics. – 2007. – Vol. 574. – P. 465-493. – DOI: 10.1017/S0022112006004216. – EDN HWFWVR.

96. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019", Krasnoyarsk, 04–06 April 2019 year. Vol. 537. – London: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – EDN EFMLCY.

97. Jundika, C. Kurnia, Agus P. Sasmito, Wai yap Wong, Arun S. Mujumdar, prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines // science of the total environment, vol. 481, 2014, pp. 317-334. DOI: 10.1080/15459624.2014.960577

98. Kalghatgi, GT. Developments in internal combustion engines and implications for combustion science and future transport fuels. Proc Combust Inst 2015;35:101–15. DOI: 10.1016/j.proci.2014.10.002

99. Kazakov, B. P., Levin L. Y., Shalimov A. V., Zaitsev A. V. Development of energy-saving technologies providing comfortable microclimate conditions for mining. Journal of Mining Institute. 2017, no. 223, pp. 116. DOI: 10.18454/pmi.2017.1.116

100. Ko, J, Si W, Jin D, Myung C-L, Park S. Effect of active regeneration on time-resolved characteristics of gaseous emissions and size-resolved particle emissions from lightduty diesel engine. J Aerosol Sci 2016;91:62–77. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2015.09.007

101. Konstantinov, S. Y. Numerical cavitation model for simulation of mass flow stabilization effect in ANSYS CFX / S. Y. Konstantinov, D. V. Tselishev, V. A. Tselishev // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9, No. 4. – P. 21-31. – DOI: 10.5539/mas.v9n4p21. – EDN UEJUID.

102. Kurnia, J. C., Sasmito A. P., Wong W. Y., Mujumdar A. S. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines. Science of the Total Environment. 2014, vol. 481, pp. 317—334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.058.

103. Lao, C.T., Akroyd, J., Eaves, N., Bhave, A., Kraft, M. Investigation of the impact of the configuration of exhaust after-treatment system for diesel engines// Applied Energy, 2020, Tom 267, №114844, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114844

104. Likhanov, V.A., Anfilatov, A.A. Mathematical model of the formation and burning of smoke-black particles in a motor cylinder during operation on an EFE// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Tom 862(3), №032050, DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032050

105. Mahmoudi, M. The Story of Wall Shear Stress in Coronary Artery Atherosclerosis: Biochemical Transport and Mechanotransduction /, A. Farghadan, D. R. McConnell [et al.] // Journal of Biomechanical Engineering. – 2021. – Vol. 143, No. 4. – DOI: 10.1115/1.4049026. – EDN YVYGEW.

106. Man, X. J., Cheung C. S., Ning Z. Effect of diesel engine operating conditions on the particulate size, nanostructure and oxidation properties when using wasting cooking oil biodiesel //Energy Procedia. - 2015. - T. 66. - C. 37- 40. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.020

107. Markiewicz, M., Muślewski, Ł., Pająk, M. Impact of biocomponent additive to diesel oil on values of selected functional parameters of transport means// Polish Journal of Environmental Studies, 2020, Tom 29(5), c3475-3483 DOI: 10.15244/pjoes/115985

108. Menter, F. 1993. Zonal Two Equation k-w Turbulence Models for Aerodynamic Flows. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference. DOI: 10.2514/6.1993-2906

109. Menter, F. 2003. Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer.

110. Menter, F. R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective / F. R. Menter // International Journal of Computational Fluid Dynamics. – 2009. – Vol. 23, No. 4. – P. 305-316. – DOI: 10.1080/10618560902773387. – EDN NAHTRN.

111. Noll, J. D., Patts L., Grau R. The effects of ventilation controls and environmental cabs on diesel particulate matter concentrations in some limestone mines // Proceedings of the 12th US/North American Mine Ventilation Symposium, 2008, pp. 9-11.

112. Papukchiev, A. Experimental Validation of ANSYS CFX for Transient Flows With Heat Transfer in a Tubular Heat Exchanger / A. Papukchiev // Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. – 2020. – Vol. 6, No. 2. – DOI: 10.1115/1.4045074. – EDN YNBOEV.

113. Prasad, R., Bella V. R. A review on diesel soot emission, its effect and control //Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis. – 2010. – T. 5. – №. 2. – C. 69. DOI: 10.9767/bcrec.5.2.794.69-86

114. Prasad, R., Bella V. R. A review on diesel soot emission, its effect and control //Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis. – 2010. – T. 5. – №. 2. – C. 69. DOI: 10.9767/bcrec.5.2.794.69-86

115. R. Huang, x. Shen, b. Wang, and x. Liao, migration characteristics of co under forced ventilation after excavation roadway blasting: a case study in a plateau mine. Journal of cleaner production. 2020, vol.267. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122094

116. Romanyuk, V., Likhanov V.A., Lopatin O.P. Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas// Publishing House "O- Kratkoe", 2018, Выпуск 3, с.27-32, DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-027-032

117. Stefanski, D.L., Glasby R.S., Erwin J.T., et al. 2018. A Modified k- ω Turbulence Model for Finite-Element CFD. 2018 Fluid Dynamics Conference. DOI: 10.2514/6.2018-4041

118. Stinnette, J.D., De Souza E. Establishing total airflow requirements for underground met-al/nonmetal mines with tier diesel equipment. 23rd World Mining Congress. Montreal. – 2013. – 14 p.

119. Taheri-Garavand, A., Heidari-Maleni, A., Mesri-Gundoshmian, T., Samuel, O.D. Application of artificial neural networks for the prediction of performance and exhaust emissions in ic engine using biodiesel-diesel blends containing quantum dot based on carbon doped// Energy Conversion and Management: X, 2022, Том 16, №100304, DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100304

120. Trenor, B., Cardona, K., Saiz, J., Rajamani, S., Belardinelli, L., & Giles, W. R. (2013). Carbon monoxide effects on human ventricle action potential assessed by mathematical simulations. Frontiers in physiology, 4, 282. DOI: 10.3389/fphys.2013.00282

121. Verschueren, R. et al. Experimental study of NO_x reduction on a medium speed heavy duty diesel engine by the application of EGR (exhaust gas recirculation) and Miller timing //Energy. - 2014. - T. 76. - C. 614-621. DOI: 10.1016/j.energy.2014.08.059

122. Verschueren, R., Verhelst S. Increasing exhaust temperature to enable after-treatment operation on a two-stage turbo-charged medium speed marine diesel engine //Energy. - 2018. - T. 147. - C. 681-687. DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.081

123. Wallace, K., Prosser B., Stinnette J. D. The practice of mine ventilation engineering //International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – T. 25. – №. 2. – C. 165-169. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001

124. Wang, Z. et al. Research of NO_x reduction on a low-speed two-stroke marine diesel engine by using EGR (exhaust gas recirculation)-CB (cylinder bypass) and EGB (exhaust gas bypass) //International Journal of Hydrogen Energy. -2017.- T. 42.-№. 30.- C. 19337-19345. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.009

125. Whitefoot, k. S., Skerlos s. J. Design incentives to increase vehicle size created from the us footprint-based fuel economy standards //energy policy. - 2012. - T. 41. - c. 402-411. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.10.062

126. Zeraati-Rezaei, S., Alam, M.S., Xu, H., Beddows, D.C., Harrison, R.M. Size-resolved physico-chemical characterization of diesel exhaust particles and efficiency of exhaust aftertreatment// Atmospheric Environment, 2020, Том 222, c.117021 DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117021

127. Zhang, J. T. Li, Comparisons of Shear Stress Transport and Detached Eddy Simulations of the Flow Around Trains / H. Hemida [et al.] // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 2018. – Vol. 140, No. 11. – P. 111108. – DOI: 10.1115/1.4040672. – EDN VIHRMX.

128. Zheng, Y. et al. Effect of auxiliary ventilations on diesel particulate matter dispersion inside a dead-end entry //International journal of mining science and technology, 2015, Vol. 25, no. 6, pp. 927-932. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.09.008

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**2 851 560**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
E21F 1/08 (2006.01)
F24F 7/04 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
E21F 1/08 (2025.08); *F24F 7/04* (2025.08)

(21)(22) Заявка: **2025111943**, **27.02.2025**
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.02.2025
 Дата регистрации:
25.11.2025

Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: **27.02.2025**

(45) Опубликовано: **25.11.2025** Бюл. № 33

Адрес для переписки:
**199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
 ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный
 университет императрицы Екатерины II",
 Патентно-лицензионный отдел**

(72) Автор(ы):
**Гендлер Семён Григорьевич (RU),
 Иконников Дмитрий Андреевич (RU),
 Серегин Александр Сергеевич (RU),
 Белехов Павел Александрович (RU),
 Подрезова Мария Андреевна (RU)**

(73) Патентообладатель(и):
**Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования "Санкт-Петербургский горный
 университет императрицы Екатерины II"
 (RU)**

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: **RU 2816134 C1, 26.03.2024. SU
 1654589 A1, 07.06.1991. SU 1355724 A1,
 30.11.1987. RU 2631946 C1, 29.09.2017. SU
 1627721 A1, 15.02.1991. CN 106968700 A,
 21.07.2017. GB 2039362 B, 20.10.1982.**

(54) Система проветривания протяженных тупиковых выработок

(57) Реферат:
 Изобретение относится к системе проветривания протяженных тупиковых выработок. Техническим результатом является повышение эффективности проветривания, протяженных тупиковых горных выработок. Система содержит вентилятор местного проветривания, участки вентиляционного трубопровода, элементы крепления к крепи горной выработки. Вентиляторы местного проветривания - ВМП соединены с возможностью съема с участками гибкого вентиляционного

трубопровода. В конце каждой секции образован технологический разрыв. Перед каждым ВМП, за исключением ВМП первой секции, с возможностью съема закреплены насадки. Насадки выполнены в форме кольца постоянного или переменного сечения - конфузор или диффузор, с толщиной стенок, выполненной с возможностью выдерживать разрежение воздуха, создаваемое ВМП, следующим за насадкой, без деформации. 3 ил.

RU 2 851 560 C1

RU 2 851 560 C1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт об использовании результатов кандидатской диссертации



«Сибирская Каменноугольная Компания»
Общество с ограниченной ответственностью
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г.о. Новокузнецкий,
г. Новокузнецк, р-н Центральный, ул. Орджоникидзе
зд. 35 помещ. 30, офис 1101
ИНН 4217140314; КПП 421701001; ОГРН 1114217012997
Email: SKK-N@mail.ru; телефон +7 (923) 467 49 50

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации аспиранта Санкт-Петербургского горного университета, Белехова Павла Александровича, обучающейся по научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

от 04/03/2026

№ 04-03-К

СОСТАВ КОМИССИИ:

Председатель комиссии	генеральный директор ООО «Сибирская Каменноугольная Компания», кандидат технических наук, эксперт первой категории, старший аудитор промышленной безопасности	Ванякин Олег Владимирович
------------------------------	---	---------------------------

<u>начальник отдела разработки и экспертизы обоснований безопасности</u>	<u>Серегин Григорий Сергеевич</u>
<u>эксперт первой категории</u>	<u>Чумак Виталий Валерьевич</u>

ПОСТАНОВИЛИ:

Составить настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Разработка метода прогноза концентраций загрязняющих веществ в воздухе тупиковых горных выработок при работе машин с ДВС», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, приняты к использованию при разработке Обоснования безопасности опасного производственного объекта.

Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению в ходе работ по Обоснованию безопасности опасного производственного объекта Рудник с подземным способом разработки, II класса опасности, «Проект увеличения производственной мощности ОАО «Комбинат КМАруда» Этап 1. Рудно-сырьевая база комбината. Увеличение производственной мощности по

добыче руды за счет запасов нижних горизонтов Коробковского месторождения. Корректировка в части недостаточности требований обеспечения безопасности нормы удельного расхода воздуха, подаваемого для проветривания выработок подземного рудника по фактору рассеивания отработанных газов от самоходного дизельного оборудования на 1 л.с. паспортной мощности двигателя».

В ходе работ были установлены нормы удельных расходов воздуха для проветривания подземных горных выработок, где работают машины с ДВС в количестве, достаточном для поддержания содержания кислорода в воздухе не менее 20 %, при этом удельный расход воздуха должен составлять 1,76-3,51 м³/мин в зависимости от типа дизельного оборудования на 1 л.с. применяемого дизельного оборудования.

При разработке обоснования безопасности в результате оценки рисков средневзвешенный балл до принятия мероприятий составлял 0,550, а после разработанных мероприятий стал 0,100. Таким образом, уровень риска после разработанных мероприятий уменьшился, а уровень безопасности увеличился.

Выявленные в диссертационной работе зависимости позволяют обосновать принятые технические и организационные решения, направленные на обеспечение безопасных условий эксплуатации выработок, в которых используются дизельные средства механизации, а также повысить безопасность ведения подземных горных работ.

Председатель комиссии

Генеральный директор
ООО «СКК», к.т.н., эксперт первой
категории
старший аудитор промышленной
безопасности



О.В. Ванякин

М.П.

Члены комиссии:

Начальник отдела разработки и
экспертизы обоснований
безопасности,

Г.С. Серегин

Эксперт первой категории

В.В. Чумак