

*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*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Гендлер Семен Григорьевич*

**Официальные оппоненты:**

*Кобылкин Сергей Сергеевич*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра безопасности и экологии горного производства, профессор;

*Мальцев Станислав Владимирович*

кандидат технических наук, доцент, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, отдел аэрологии и теплофизики, заведующий сектором экспериментальной аэрогазодинамики.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита диссертации состоится **16 июля 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 15 мая 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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 м<sup>3</sup>/мин на лошадиную силу (кВт), максимальная величина которых составляла 5 м<sup>3</sup>/мин.

С другой стороны, выполнение требований ФНИП ПБ предполагает необходимость осуществления специальных исследований,

в том числе натуральных 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 натуральных 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. Смирникова, 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 горнотранспортных 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:**

1. Изучение мирового опыта нормализации газового режима при эксплуатации в горных выработках машин с ДВС.

2. Экспериментальные исследования параметров выбросов загрязняющих веществ при работе в горных выработках машин с ДВС.

3. Численное моделирование полей концентраций CO и NO<sub>x</sub> в тупиковых горных выработках при работе машин с ДВС.

4. Верификация математической модели по результатам натуральных измерений.

5. Определение алгоритма вычисления, необходимого для обеспечения у кабины водителя нормативных концентраций загрязняющих компонентов, расхода воздуха.

**Научная новизна работы:**

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) 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 м<sup>3</sup>/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 позволило 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.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

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 транспортного 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: XI Форум Союзного государства ВУЗов инженерно-технологического профиля (БНТУ, 12-16 декабря 2022), XI научно-практическая конференция «Метан угольных пластов» (ООО «Газпром добыча Кузнецк», 01-10 января 2024 г.), Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (НИТУ МИСИС, февраль 2024 г); Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (НИТУ МИСИС, февраль 2024 г), XI Международная научно-практическая конференция молодых учёных и студентов (ТулГУ, 05-08 ноября 2024 г.), Актуальные проблемы недропользования 2024 (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 01-07 декабря 2024 г.), Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (НИТУ МИСИС, февраль 2025 г), 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 постановке цели и задач исследования, анализе отечественных и зарубежных научных источников, разработке методики и участии в проведении натурных исследований, 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, 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 (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 128 наименований, и 2 приложений. 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 натуральных исследований и компьютерного моделирования. За ценные научные советы и рекомендации в процессе подготовки диссертационного исследования автор выражает благодарность всему коллективу кафедры безопасности производств.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследований, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводятся особенности эксплуатации машин с двигателями внутреннего сгорания в подземных тупиковых горных выработках. Выполнен обзор исследований отечественных и зарубежных учёных, изучавших вопросы определения количества воздуха, необходимого для проветривания сооружаемых горных выработок. Определены основные факторы, влияющие на величину расхода воздуха. Рассмотрены существующие экологические стандарты для дизельных двигателей, применяемых в разных странах, и подходы к их регулированию. Дано описание приборов для измерения величин выбросов выхлопных газов дизельной самоходной техники с ДВС. Рассмотрены научно-методические подходы к разработке методик расчёта удельного расхода воздуха в горных выработках.

**Во второй главе** описана экспериментальная методика исследования газовой обстановки в тупиковой выработке при работе в ней дизельных машин с ДВС, включающая определение выбросов загрязняющих веществ для их различных типов и режимов работы двигателя, а также регистрацию распределения концентраций оксида углерода и окислов азота по объёму выработки как при стационарном расположении машины, так и в случае ее движения. Осуществлены

математическая обработка данных натуральных замеров и их сопоставление с результатами численных расчётов, выполненных для условий проведения эксперимента. Доказана удовлетворительная сходимость данных замеров с результатами численных расчётов, что дало возможность верифицировать разработанную аэрогазодинамической модель для оценки полей концентраций загрязняющих веществ.

**В третьей главе** представлены результаты моделирования динамического и статического режимов работы в горной выработке погрузочно-доставочного оборудования, распределения по объёму загрязняющих веществ на различных стадиях производственного цикла, определяемых погрузкой разрыхлённой горной массы в забое, временем проветривания, скорости движения машины и нагрузкой на двигатель. Выявлены закономерности динамики концентраций вредных компонентов при изменении площади поперечного сечения горной выработки, нагрузки на двигатель, изменения величины расхода свежего воздуха, а также температуры выхлопных газов дизельного оборудования.

**В четвёртой главе** проанализированы результаты математического моделирования, даны рекомендации по повышению эффективности проветривания тупиковой горной выработки, а также приведены зависимости для определения расхода воздуха, обеспечивающего нормативное значение концентраций загрязняющих веществ на рабочем месте водителя.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. При проведении натуральных 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.**

Современные натурные исследования газовой обстановки в тупиковых горных выработках при эксплуатации машин с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в подавляющем большинстве случаев ограничиваются измерением концентраций загрязняющих веществ в выхлопных газах и определением расходов подаваемого воздуха. Однако пространственное распределение полей концентраций загрязняющих компонентов в воздушной среде выработки определяется рядом факторов, включающим: объём выбросов выхлопных газов; их термодинамические параметры (в том числе температуру); направление выброса; конструктивные характеристики выхлопной системы (в том числе геометрические параметры выхлопной трубы).

Эти факторы были учтены при осуществлении экспериментальных исследований в натуральных условиях, которые проводились в тупиковой горной выработке площадью 12 м<sup>2</sup>, где неподвижно находилось погрузочно-доставочная машина с мощностью двигателя 84 л.с. Измерения проводились в поперечных сечениях в 9 точках при помощи многокомпонентного газоанализатора ПОЛАР. Шаг между сечениями принимался от 5 до 15 м. Условием прекращения измерений в точке и переходом к следующему замеру являлось неизменность показаний концентраций СО и NO<sub>x</sub> многокомпонентного прибора более чем на 10%. В первой серии измерений расход воздуха составлял 4,9 м<sup>3</sup>/с. Результаты измерений концентраций оксидов азота в 9 точках сечения, отстоящего на 13,6 м от выхлопной трубы (I), и сечения (VI), отстоящего на 52 м от выхлопной трубы (рисунок 1). Линии на рисунке 1 соответствуют границам областей с высокой концентрацией NO<sub>x</sub>.

Во второй и третьей серии расход воздуха, поступающего в тупиковую выработку, уменьшался за счёт увеличения сопротивления воздуховода (в результате уменьшения сопротивления выходного отверстия путём прикрытия шиберов) и составлял соответственно 3,57 м<sup>3</sup>/с и 2,17 м<sup>3</sup>/с. Это приводило к тому, что концентрации вредных компонентов в сечениях I и VI увеличились в среднем на 18 % во втором случае и на 36 % в третьем, о чем свидетельствуют данные графика на рисунке 2.

Анализ экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы:

-высокие концентрации вредных компонентов отработанных выхлопных газов на первых метрах от выхлопной трубы скапливаются в левой части выработки вблизи стенки по направлению движения к устью. Постепенно высококонцентрированные скопления перемещаются к правой части выработки в область вентиляционного трубопровода с последующим устойчивым скоплением в этой области;

-средняя концентрация по сечению выработки  $\text{NO}_x$  не превышала нормативного значения 0,00026% при расходе воздуха 4,9 м<sup>3</sup>/с;

-при заданном расходе воздуха распределение концентраций оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) по поперечному сечению горной выработки носит немонотонный характер. Максимальные значения концентрации фиксируются в прикровельной зоне выработки, тогда как минимальные наблюдаются в её центральной части.

Величины выбросов CO и  $\text{NO}_x$ , приводящие к формированию измеренного поля концентрации, могут быть рассчитаны по (1):

$$J_{ydi} = \frac{10C_iMPvS}{RT}, \quad (1)$$

где  $C_i$  – объёмная концентрация загрязняющего компонента в выхлопных газах, %;  $v$  – скорость истечения выхлопных газов, м/с;  $S$  – поперечное сечение выхлопного тракта в месте измерения скорости потока, м<sup>2</sup>;  $N$  – мощность ДВС, л.с.;  $M$  – молярная масса компонента;  $P$  – полное давление выхлопных газов, вычисленное как сумма статического и динамического давления. Па;  $T$  – температура газов, К.

Расчет по формуле (1) для условий натуральных измерений показал, что величины выбросов CO и  $\text{NO}_x$  соответственно равны 49,2 мг/с и 24,5 мг/с. Для этих значений выбросов расход воздуха для средних по сечению выработки нормативных концентрации CO и  $\text{NO}_x$  20 мг/м<sup>3</sup> и 5 мг/м<sup>3</sup>, рассчитанной по формуле статического разрежения, будут составлять 2,46 м<sup>3</sup>/с и 4,9 м<sup>3</sup>/с, что практически совпадает с экспериментальными данными. Однако если ориентироваться на распределение концентраций загрязняющих веществ по сечению выработки, то их минимальные значения приурочены к её центральной части, то есть к зоне, где будет располагаться рабочее место машиниста. Это позволяет говорить о возможности снижения расхода воздуха в 1,37 раза, т.е. до 3,5 м<sup>3</sup>/с (2,55 м<sup>3</sup>/мин на л.с.).

При движении транспортного средства от забоя к устью выработки рабочее место водителя оказывается в воздушной среде, в

которой начальная концентрация загрязняющих веществ определяется временем нахождения машины в забое и соотношением скоростей движения вентиляционной струи и машины. Для условий эксперимента при расположении выхлопной трубы в задней части машины и движения воздуха к устью тупиковой выработки выбросы загрязняющих веществ, хотя и практически не влияли на их концентрацию непосредственно у кабины, ухудшали газовую обстановку в тупиковой выработке после прохода машины.

Формула (1) может быть использована для вычисления выбросов от всех машины парка горнотранспортной техники, находящегося в распоряжении предприятия и планируемой для эксплуатации в будущем. При этом для имеющегося парка машин необходимо осуществить предварительные измерения параметров выбросов загрязняющих веществ, а для машин, планируемых для эксплуатации, для расчета выбросов использовать их технические характеристики, представленные изготовителем.

**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.**

Первый этап разработки аэрогазодинамической модели включал построение геометрической схемы тупиковой выработки с учетом её призабойной части, расположения и размеров воздуховода относительно размеров корпуса самой машины, положения выхлопной трубы и направления выброса выхлопных газов, а также расхода воздуха, подаваемого в проходческий забой.

На втором этапе осуществлялся выбор модели турбулентности, максимально адаптированной к рассматриваемому процессу. Так как срыв потока при расположении машины должен происходить в окрестности выхлопной трубы и самого транспортного средства,

была использована модель турбулентности Shear Stress Transport (SST).

Проверка адекватности компьютерной модели осуществлялась на основе сопоставления результатов, полученных при расчетах, с данными натурных замеров в выбранных точках поперечных сечений горных выработок (рисунок 3).

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных показали, что разница между ними не превышает 15%, что подтверждает адекватность разработанной математической модели реальным газодинамическим процессам, протекающих в тупиковой выработке при работе в забое машины с ДВС.

Данная математическая модель была использована для оценки газовой обстановки в тупиковой выработке при изменении определяющих показателей в широком диапазоне.

Обработка данных численного эксперимента осуществлялась с применением безразмерных переменных, форма которых была определена на основе анализа размерностей. При формировании системы безразмерных комплексов в качестве определяющих параметров были использованы величины, представленные в формулах (2,3):  $Q_B$  – расход воздуха на выходе из трубопровода,  $L_K$  – расстояние от выхлопной трубы до точки сечения, соответствующей нахождению рабочего места машиниста,  $S_B$  – поперечная площадь выработки,  $d_{тр}$  – диаметр выхлопной трубы,  $v_r$  – скорость выхлопных газов;  $C_i$  – концентрация вредного компонента на выхлопе.

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

Результаты вычислений, представленные на графике (рисунок 4), при величине коэффициента детерминации 0,95 описываются зависимостью следующего вида (формула 3):

$$\frac{c}{c_i} = 3,1 \left( \frac{v_r \cdot d_{тр}^2}{Q_B} \right)^{0,36} \cdot \left( \frac{d_{тр}}{L_K} \right)^{0,13} \cdot \left( \frac{d_{тр}^2}{S_B} \right)^{0,02} \quad (3)$$

**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 транспортного средства и подаваемого воздуха, а также распределения полей концентраций загрязняющих веществ в тупиковой выработке, сформировавшимся в период нахождения машины в забое.**

При прогнозировании газовой обстановки в процессе цикла работы погрузо-доставочной машины с дизельным двигателем внутреннего сгорания в условиях подземных тупиковых горных выработок необходимо учитывать последовательность технологических операций, приводящую к наложению концентраций загрязняющих компонентов выброса выхлопных газов при нахождении машины в забое и её последующим движением задним ходом к устью выработки.

Для вычисления распределения концентраций загрязняющих компонентов в каждом сечении по длине тупиковой выработки использовалась математическая модель, аналогичная модели нахождения машины с ДВС в забое горной выработки. Проведён анализ с учётом следующих параметров: распределения концентраций загрязняющих компонентов, сформировавшихся в процессе эксплуатации машины с ДВС в забое; относительной скорости перемещения машины по отношению к скорости воздушного потока в выработке; изменения величины выбросов загрязняющих веществ, отличной от величины выбросов при работе машины в забое. Графические зависимости, иллюстрирующие расчётное распределение концентраций загрязняющих компонентов по длине горной выработки, а также в её поперечных сечениях при стационарном положении и динамическом движении машины в тупике, представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.

В качестве основных параметров, характеризующих движение транспортного средства были выбраны:  $t_{ст}$  – время нахождения машины в забое под погрузкой;  $t_{дин}$  – время движения машины до каждого сечения выработки с концентрацией загрязняющих компонентов к рабочего места машиниста  $C_{ст}$ ,  $C_{дин}$  - концентрация загрязняющих компонентов у рабочего места после прохода машины данного сечения выработки,  $v_v$  – скорость воздуха в горной выработке;  $v_m$  – скорость движения машины.

Полученные безразмерные переменные имеют следующий вид (4):

$$Z_1 = \frac{t_{ст}}{t_{дин}}; Z_2 = \frac{v_B}{v_M}. \quad (4)$$

Результаты статистической обработки результатов численного эксперимента представлены на рисунке 7.

При коэффициенте детерминации, равном 0,95, уравнение, описывающее связь между  $C_{дин}/C_{ст}$  и безразмерными параметрами (5):

$$\frac{C_{дин}}{C_{ст}} = 1,36 \cdot \left(\frac{t_{ст}}{t_{дин}}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{v_B}{v_M}\right)^{0,08} \quad (5)$$

После объединения зависимостей (6) и (8) может быть вычислен расход воздуха  $Q_B$ , при котором выполняется условие равенства  $C_{дин}$  нормативному значению предельно-допустимой концентрации  $C_{ПДК}$  для  $NO_x$  (6,7).

$$Q_B = \left(\frac{K}{C_{ПДК}}\right)^{3,5}, \quad (6)$$

где

$$K = \frac{4,2 \left(\frac{t_{ст}}{t_{дин}}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{d_{тр}}{L_K}\right)^{0,13} \cdot \left(\frac{d^2_{тр}}{S_B}\right)^{0,13} \cdot C_i \cdot (v_i \cdot d^2_{тр})^{0,36}}{(S_B \cdot v_M)^{0,08}} \quad (7)$$

Процедура вычисления расхода воздуха, необходимого для обеспечения нормативного значения предельно-допустимой концентрации для  $CO$ , реализуется аналогичным образом.

Расчёты, выполненные по уравнению (6), были сопоставлены с вычислениями, использующими методику определения расхода воздуха, основанную на принципе статического разжижения выбросов выхлопных газов при работе машин с ДВС. Величины необходимого расхода, рассчитанные по формуле (6) оказались ниже в среднем на 14%, чем вычисленные по традиционным зависимостям.

### 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<sub>x</sub> у кабины водителя на основе комплексных исследований, включающих натурные измерения параметров выбросов выхлопных газов, в том числе скорость их истечения, выходные концентрации, температуру газовой воздушного 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<sub>x</sub> 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 натурных наблюдений и результатов численного эксперимента подтверждена возмож-

ность использования математической модели для анализа аэрогазо-динамических 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 NOx 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. 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.

2. Влияние параметров тупикового забоя, погрузочно-доставочного оборудования и системы вентиляции на качество вдыхае-

мого 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.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:*

3. 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**, М.А. Подрезова // Горная промышленность. – 2025. – № 6. – С. 173-180. – DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-173-180. – EDN ACLOCI

4. 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.

5. 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

*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

6. 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: опублик. 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.

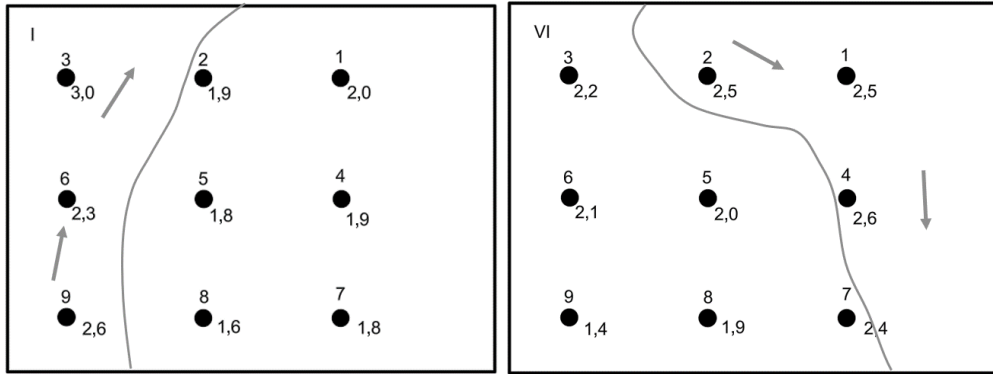


Рисунок 1 – Результаты измерений концентраций оксидов азота в 9 точках сечений I и VI

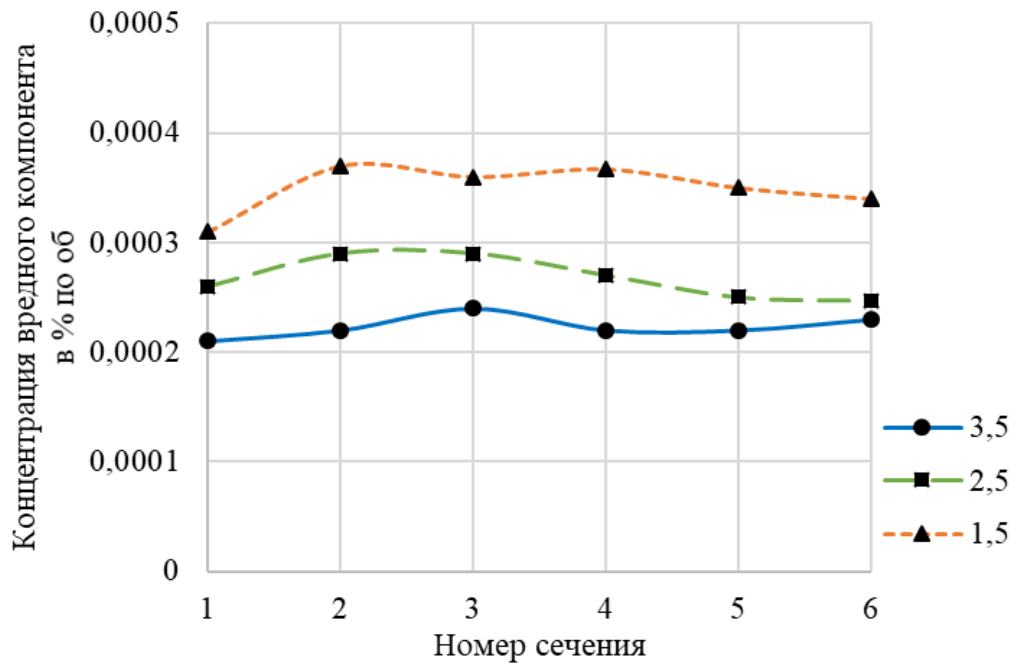


Рисунок 2 – Изменение средних значений концентраций в поперечных сечениях при различном удельном расходе свежего воздуха.

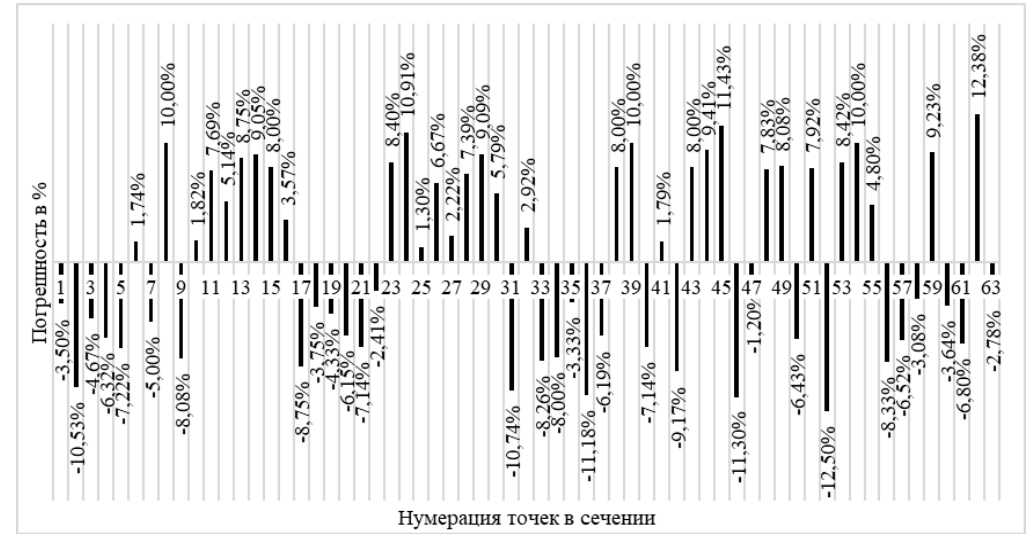


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования по точкам.

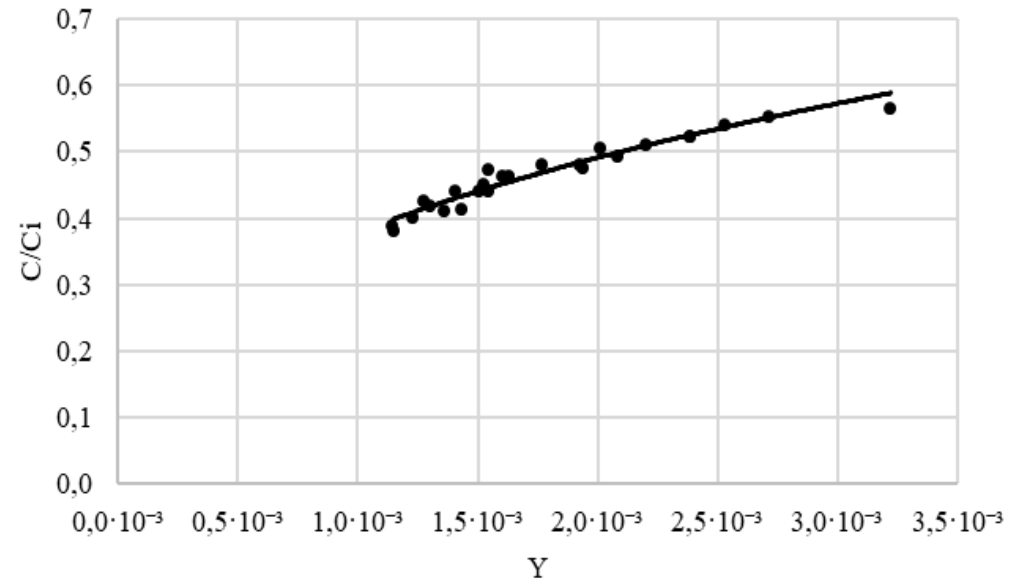


Рисунок 4 – Концентрация NO<sub>x</sub> в расчетной точке, соответствующей рабочему месту машиниста при расположении машины в забое под погрузкой

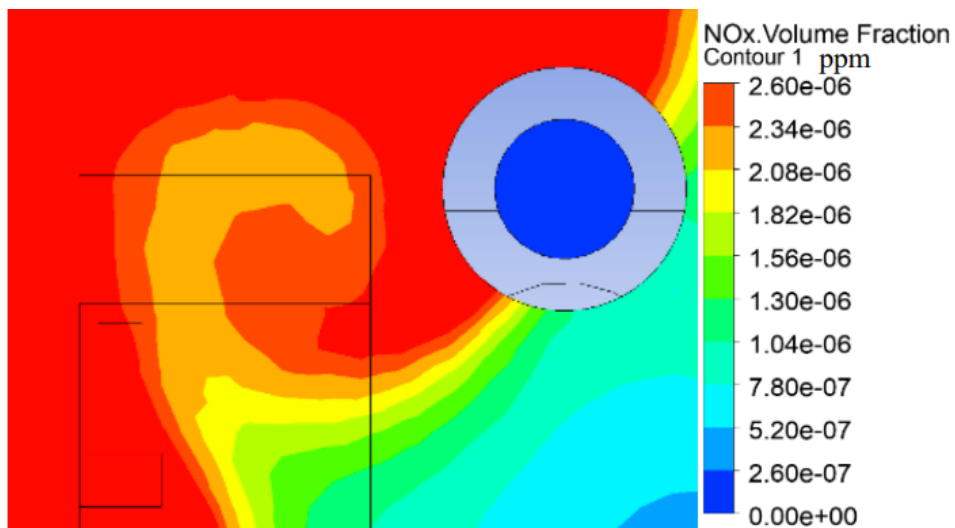


Рисунок 5 – Расчётное распределение концентраций загрязняющих компонентов в её поперечных сечениях при работе в тупиковой части выработки

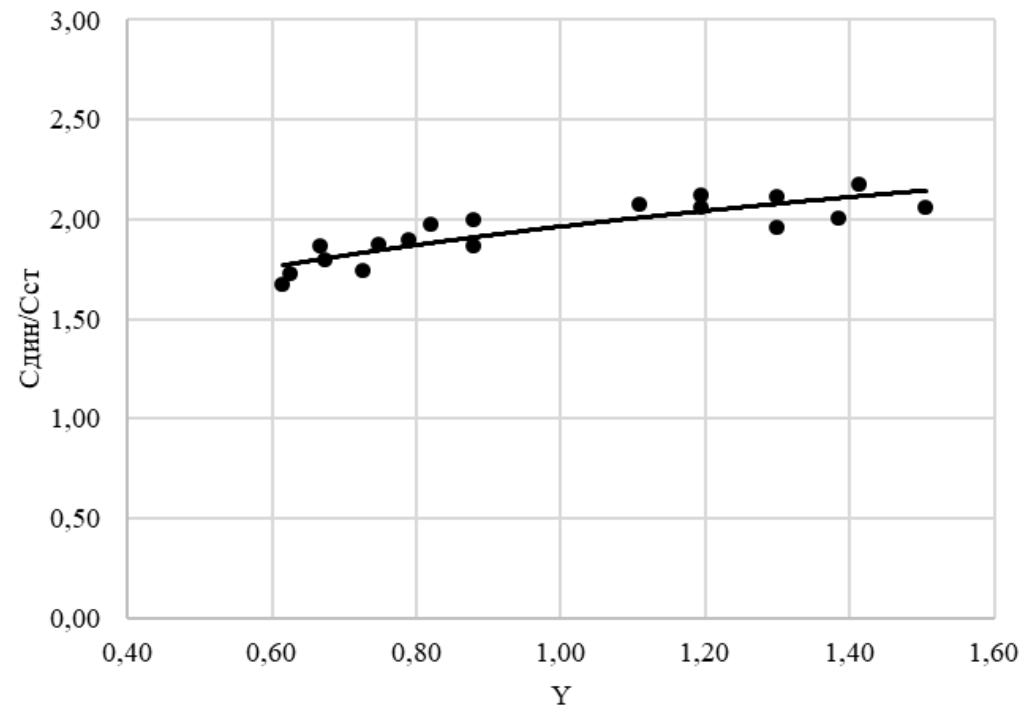


Рисунок 7 – Концентрации  $\text{NO}_x$  в области кабины при движении машины в зависимости от параметра Y

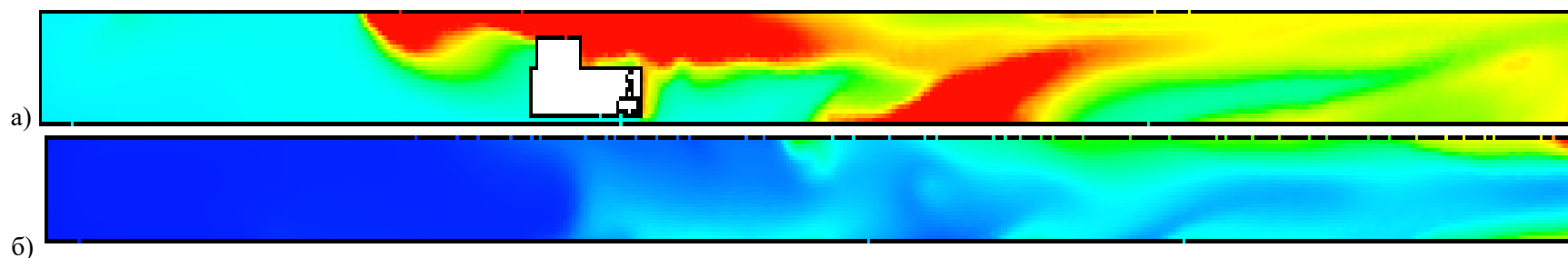


Рисунок 6 – Расчётное распределение концентраций загрязняющего компонента в области тупика (по продольному сечению выработки) в момент начала движения машины из забоя (а) и по прошествию 2 минут (б)