

На правах рукописи

Степанцова Анастасия Юрьевна



**ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАКРЫТЫХ УГОЛЬНЫХ СКЛАДОВ
ПО ГАЗОВОМУ И ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРАМ**

Специальность 2.10.3. Безопасность труда

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

Санкт-Петербург – 2025

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:

Фомин Анатолий Иосифович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра аэрологии, охраны труда и природы, заведующий кафедрой;

Кобылкин Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, лаборатория 2.2. Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений, старший научный сотрудник.

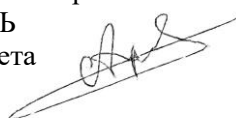
Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **16 июня 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Ежегодное увеличение добычи и потребления угольного сырья определяют необходимость в организации мест для его временного складирования как на территории угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, так и на специально сооружённых пунктах временного размещения (складских терминалах). В настоящее время хранение угля осуществляется, преимущественно, на складах открытого типа, где уголь размещается «под открытым небом». Для такого способа размещения угля характерен интенсивный процесс пылевыведения с поверхности штабелей и при погрузо-разгрузочных работах, что приводит к распространению угольной пыли как по территории склада, способствуя развитию профессиональных заболеваний рабочего персонала, так и по близлежащим селитебным зонам, приводя к негативному аэротехногенному воздействию на окружающую среду. Более того, климатические факторы окружающей среды (ветер, снег, дождь), приводят к изменению физико-химических и механических свойств угля, что как следствие, снижает его качество. Радикальное решение этих проблем возможно при переходе к складированию угля в закрытых складах, позволяющих исключить воздействие перечисленных факторов на угольное сырьё. При несомненных преимуществах складов закрытого типа их эксплуатация осложняется возможностью накопления внутри склада метана, выделяющегося из угольных отдельностей, а также угольной пыли, возникающей как при непосредственном хранении угля в штабелях, так и в процессе погрузо-разгрузочных операций. В этой связи, обеспечение безопасных условий эксплуатации закрытых угольных складов, связанное с необходимостью решения данных вопросов, определяющих условия труда персонала угольного склада, является актуальной задачей с точки зрения предотвращения влияния на них негативных факторов производственной среды.

Степень разработанности темы исследования

Проблемам, связанным с обеспечением экологической и промышленной безопасности открытых угольных складов посвящено значительное количество исследований. В работах Руш Е.А., Шувалова Ю.В., Портола В.А., Сикарева С.Н., Кузнецова В.С., Московской И.В., Курмазовой Н.А., Мазуренко О.И., Лазаревой Л.П.,

Молотилова С.Г., Кривопишиной М.Е. и др. раскрыты негативные последствия аэротехногенного воздействия угольных складов на окружающую среду.

Гораздо меньше исследований было направлено на изучение безопасности персонала, обслуживающего закрытые угольные склады. Здесь уместно обратить внимание на работы Фомина Е.И., Перминова В.Ю., Агошкова А.И., в которых делается попытка сформулировать основные проблемы, возникающие при хранении угля в складах закрытого типа. Вместе с тем, в работах этих авторов практически не рассматриваются вопросы, связанные с причинами, обуславливающими возникновение опасностей, приводящих к снижению безопасности персонала, а именно аэрогазопылединамическими процессами, оказывающими влияние на формирование концентраций газа и пыли, отклоняющихся от нормативных значений.

Предмет исследования – метановая и пылевая обстановка в закрытых угольных складах.

Объект исследования – закрытые угольные склады.

Цель работы – обеспечение безопасных условий эксплуатации закрытых угольных складов по газовому и пылевому факторам.

Идея работы - оценку газовой и пылевой обстановки в закрытых угольных складах и последующее установление необходимости её нормализации следует осуществлять на основе учёта аэрогазопылединамических процессов, имеющих место как при транспортировании угольной массы до мест временного размещения, приводящих к снижению начальной газоносности угля, так и непосредственно в период хранения угля.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Обоснование перспектив использования закрытых угольных складов с точки зрения снижения аэротехногенного воздействия на окружающую среду по сравнению со складами открытого типа.
2. Разработка математических моделей аэрогазодинамических процессов в системе насыпной объем угля – воздушная среда.
3. Экспериментальное исследование эффективного коэффициента диффузии метана из угольных отдельностей при контакте с воздушной средой.

4. Численное моделирование скоростных полей и полей концентраций метана в воздушной среде закрытого склада с одновременным вычислением требуемой величины расхода воздуха для обеспечения безопасных условий по метановому фактору.

5. Оценка пылевой обстановки в закрытом складе при величине количества воздуха, необходимой для нормализации газового режима;

6. Обоснование способов проветривания закрытого склада.

Научная новизна работы:

1. Выявлены закономерности аэрогазопылединамических процессов, приводящих к формированию полей концентрации газа и пыли в свободном объеме закрытых угольных складов и определяющих условия, характеризующиеся превышением допустимых значений концентраций метана и пыли в воздухе рабочей зоны.

2. Установлена зависимость, связывающая концентрацию метана в объеме угольного склада с количеством воздуха, необходимого для обеспечения безопасных условий эксплуатации закрытого склада угля.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.10.3. Безопасность труда по пунктам 1 и 2.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснована математическая модель формирования полей концентрации метана в насыпных объемах угля, учитывающая диффузионные процессы в угольных отдельностях и воздушных пустотах.

2. Разработана методика расчета остаточной концентрации метана в насыпном объеме угля в зависимости от температуры окружающей среды и времени транспортирования угля на склад для временного размещения.

3. Результаты диссертационной работы подтверждены решением о выдачи свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684677 от 17 ноября 2023 года.

4. Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к внедрению при проектировании мероприятий по повышению безопасности закрытых складов (акт об использовании результатов кандидатской диссертации от 28 августа 2024 года).

Методология и методы исследования.

При выполнении работы использовался комплексный метод исследования, включающий в себя: аналитические исследования диффузионных процессов в угольных отдельностях и насыпном объеме угля, а также процессы образования и переноса угольной пыли; экспериментальное определение эффективного коэффициента диффузии метана и энергии активации диффузионного процесса в угольных отдельностях; статистические методы обработки экспериментальных данных; численное моделирование процессов переноса метана в воздушной среде склада.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Безопасные условия эксплуатации закрытых угольных складов по газовому и пылевому факторам определяются возможностью управления в период хранения угля аэрогазотермодинамическими процессами, связанными с выделением метана и пыли с поверхности угольного штабеля непосредственно в воздушную среду закрытого склада.

2. Эквивалентный коэффициент диффузии, определяющий выделение метана из насыпного объема угля в воздушную среду, определяется совокупной величиной эффективного коэффициента диффузии метана из угольных отдельностей и коэффициента диффузии метана в воздухе, заполняющего свободное пространство между ними, причём, эффективный коэффициент диффузии метана из угля следует устанавливать на основе термогравиметрического метода с последующим сопоставлением экспериментальных кривых, характеризующих суммарный поток метана из угля, с аналитическим решением диффузионной задачи для угольной отдельности в виде шара.

3. Установление необходимости нормализации газовой и пылевой обстановки в закрытых угольных складах следует осуществлять на основе учёта аэрогазопылединамических процессов, влияющих на распределение концентрации метана и пыли в воздушной среде склада, имеющих место как при транспортировке угольной массы до мест временного хранения и приводящих к снижению начальной газоносности угля, так и непосредственно во время хранения.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается проведением измерений по утверждённым методикам с использованием поверенного измерительного оборудования, внесённого в государственный реестр средств измерений; использованием математических моделей, основанных на классических уравнениях газо- и массопереноса; использованием современного программного обеспечения для осуществления математического моделирования процессов метановыделения из угольного штабеля при удовлетворительном соотношении результатов моделирования и данных теоретических исследований; непротиворечивостью результатов моделирования аналогичным данным других авторов.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на: XXXI Международном научном симпозиум «Неделя горняка – 2023» (30 января – 2 февраля 2023 г., г. Москва); XIV Международном форум-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (22-27 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург); Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Промышленная безопасность и охрана труда» (13-15 декабря 2023 г., Санкт-Петербург); XXXII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2024» (30 января – 2 февраля 2024 г., г. Москва); XI научно-практической конференции «Метан угольных пластов» (25 сентября 2024 г., г. Кемерово); XV Международном форум-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (1-7 декабря 2024 г., г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в определении проблемы исследования, постановке цели и задач исследования, анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке методики проведения натурных исследований и построения математической и компьютерной модели, проведения натурных и теоретических исследований, компьютерного моделирования, формулировании защищаемых научных положений и заключения.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 4 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соис-

кание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684677.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 110 наименований и 3 приложения. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 10 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.т.н. профессору Гендлеру С.Г., а также д.т.н. профессору Василенко Т.А. и к.т.н. доценту Серегину А.С. за помощь в проведении натурных исследований и компьютерного моделирования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен сравнительный анализ проблем, связанных с эксплуатацией открытых и закрытых угольных складов. Выявлено, что складирование угля открытым способом приводит к снижению качества угольного сырья ввиду климатических факторов, срыву и распространению угольной пыли как по территории склада, так и за его пределами. Показано, что закрытые склады позволяют решить проблемы, связанные со снижением качества угольной продукции, а также минимизировать аэротехногенное воздействие на окружающую среду. Проведено моделирование распространения угольной пыли на складах открытого и закрытого типа. Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены теоретические исследования процессов диффузии и фильтрации в насыпном объеме угля. Приведен расчёт эквивалентной величины коэффициента диффузии метана в насыпном объеме угля, зависящий от скорости протекания процесса диффузии в угле и в воздухе. Рассмотрены методы определения параметров массопереноса в каменных углях.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования процессов массообмена при взаимодействии разрушенного угля с воздушной средой термогравиметрическим методом. На основе экспериментальных данных вычислены параметры массопереноса (эффективный коэффициент диффузии метана и энергия активации диффузионного процесса) для исследуемых образцов. Расчетным методом определены эффективные коэффициенты диффузии метана из угля для температур, отличных от экспериментальных.

В четвертой главе рассмотрены аэрогазотермодинамические процессы при транспортировке и хранении каменного угля, определяющие безопасность эксплуатации закрытых складов. На основе экспериментальных данных произведена оценка метаносодержания в угле перед его загрузкой в закрытый склад. Проведено математическое моделирование аэрогазодинамических процессов в воздушном пространстве закрытого угольного склада для выявления «застойных» зон и определение количества воздуха, необходимого для подачи в склад с целью соблюдения нормативных значений концентраций метана. Для оценки распределения концентрации пыли в объеме склада было выполнено численное моделирование рассеивания угольной пыли, образующейся при непосредственном хранении сырья, а также при работе погрузо-разгрузочной техники, с учетом средней скорости движения воздушных масс.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Безопасные условия эксплуатации закрытых угольных складов по газовому и пылевому факторам определяются возможностью управления в период хранения угля аэрогазотермодинамическими процессами, связанными с выделением метана и пыли с поверхности угольного штабеля непосредственно в воздушную среду закрытого склада.

После добычи и извлечения на поверхность угольная продукция на разных стадиях транспортировки до момента поступления потребителю складывается в штабеля различной формы, представляющие собой насыпные объёмы, содержащие хаотичным образом распределённые угольные отдельности, разделённые воздухом, заполняющим пустоты, образовавшиеся вследствие неправильной

формы кусков угля. К насыпным объёмам могут быть отнесены насыпи угля перед погрузкой его в вагоны, объёмы угля, заполняющие их, а также насыпи угля, образованные в местах его временного хранения (портовые терминалы, складские помещения на ТЭЦ, химических и металлургических заводах и т.п.).

В тех случаях, когда за время транспортирования угольной массы от места добычи до конечного пункта дегазация угля произошла частично, то угольная масса будет иметь некоторую газоносность.

Процесс дегазации насыпного объёма угля осуществляется следующим образом. В начальный период сразу же после образования насыпного объёма концентрация метана в воздухе, заполняющем пустоты, имеет нулевое значение. С течением времени воздушные пустоты начинают заполняться метаном, поступающим с поверхности каждой угольной отдельности, и концентрация метана в воздушных пустотах непрерывно растёт, достигая некоторого асимптотического значения. Если поверхность насыпного объёма угля омывается воздухом, то одновременно с увеличением концентрации метана в глубине насыпного объёма, происходит отток метана с его поверхности, то есть в зонах, прилегающих к поверхности штабеля, образуются зоны со сниженной концентрацией метана, относительно областей, на которые влияние газообмена с поверхности ещё не распространилось.

Предложенный механизм газообмена насыпного объёма угля с воздухом (атмосферным при транспортировке или складским при хранении) даёт основание для разработки следующей двухстадийной методики расчёта выделения метана из насыпного объёма и его газосодержания на различных этапах.

Отличие в расчёте массообмена насыпного объёма, имеющего форму штабеля при хранении угля, и заполняющего железнодорожный вагон, состоит в вычислении потока метана с поверхности. Для угольного штабеля насыпной объём моделируется полуцилиндром, а для железнодорожного вагона - полуограниченным массивом с газовыделяющей поверхностью, соответствующей поверхности верхней части вагона, контактирующей с воздухом.

Оценка концентрационных полей метана $C(For^v)$ внутри насыпного объёма угля на основе известных начальных условий

(начальная концентрация метана в угле C_0) и эффективного коэффициента диффузии метана для угля $D_{эфф}$ производится при допущении, что выделение метана в единицу объема угольной массы, где поверхность угольных отдельностей равна $F_{ед.об}$, происходит при условии изоляции этого объема, в котором угольные отдельности и пустоты, заполненные воздухом, занимают соответственно объемы $(1-m)$ и m , от наружного воздуха, омывающего его поверхность.

Изменение концентрации метана в единице объема воздушного пространства насыпного объема может быть описано следующим уравнением (1):

$$m \cdot \frac{dC(For^{yr})}{dFor^{yr}} = (1 - m) \cdot F_{ед.об} \cdot j(For^{yr}), \quad (1)$$

Начальные условия $C(For^{yr})|_{For^{yr}=0} = 0$

где For^{yr} – фильтрационное число Фурье для угольной отдельности, моделируемой шаром со средним радиусом $r_{ср}$;

$j(For^{yr})$ – диффузионный поток с поверхности угольной отдельности при произвольном изменении $C(For^{yr})$, кг/м².

При постоянном значении $C(For^{yr}) = C_{\tau}$ в случае $For^{yr} \leq 0,2$ диффузионный поток может быть вычислен по формуле (2):

$$j(For^{yr}) = \frac{D_{эфф}}{r_{ср}} \left(-1 + \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot For^{yr}}} \right) (C_0 - C_{\tau}) \quad (2)$$

где C_{τ} – концентрация метана в воздушном пространстве насыпного объема, кг/м³.

В случае изменения $C(For^{yr})$ по произвольному закону поток метана, фигурирующий в зависимости (1) устанавливается на основе теоремы Дюамеля. В этом случае совместное решение уравнений (1) и (2) с учетом произвольного закона приводит к следующему соотношению относительно $C(For^{yr})$ (3):

$$C(For^{yr}) = C_0 f(Z) \quad (3)$$

где $f(Z)$ – табулированная функция, определяемая выражением (4):

$$f(Z) = 1 - e^{k^2 \cdot For^{yr}} \cdot \operatorname{erfc}(k \cdot \sqrt{For^{yr}}) \quad (4)$$

где $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{k \cdot \sqrt{For^{yr}}} e^{-\xi^2} d\xi$ – интеграл вероятности при (5):

$$k = \frac{r_{ср}}{m} \cdot F_{ед.об} \cdot (1 - m) \quad (5)$$

Принято допущение, что поток метана с поверхности насыпного объема в воздушную среду за время τ определяется величиной эквивалентного коэффициента диффузии $D_{экв}$ вычисляемого по

формуле (11). С учетом зависимости (2) диффузионный поток с поверхности угольного штабеля $J_{штаб}$ и с поверхности железнодорожного вагона $J_{ваг}$ рассчитываются по следующим формулам (6-7):

$$J_{штаб} = \frac{D_{эвк}}{R_{штаб}} \cdot \left(-0,5 + \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot Fo_{штаб}}} \right) \cdot \left[\overline{C(Fo^{уг})} - C_{возд} \right], \quad (6)$$

$$J_{ваг} = \sqrt{\frac{D_{эвк}}{\pi \cdot \tau}} \cdot \left[\overline{C(Fo^{уг})} - C_{возд} \right] \quad (7)$$

где $R_{штаб}$ – эквивалентный радиус штабеля, м;

$\overline{C(Fo^{уг})}$ – средняя за время массообмена τ концентрация метана в единице объема угольной массы, кг/м³;

τ – время транспортирования угля (хранения угля на складе), с;

$C_{возд}$ – концентрация метана в воздухе, кг/м³.

Зависимость для определения $\overline{C(Fo^{уг})}$ в предположении плоскопараллельного характера движения воздуха вдоль поверхности штабеля может быть представлена в виде (8):

$$\overline{C(Fo^{уг})} = \frac{C_0 \cdot k \cdot [2 \cdot \sqrt{\frac{Fo^{уг}}{\pi}} - Fo^{уг}]}{1 + 0,5k \cdot [2 \cdot \sqrt{\frac{Fo^{уг}}{\pi}} - Fo^{уг}]} \quad (8)$$

Полученная зависимость относительно диффузионного потока с поверхности железнодорожного вагона использована для оценки изменения газоносности угольной массы X_τ при транспортировании, относительно начального значения газоносности X_0 (9):

$$X_\tau = X_0 - \frac{J_{ваг} \cdot F_{пов}}{\rho_{мет} \cdot M_{ваг}} \quad (9)$$

где $F_{пов}$ – поверхность угля в вагоне, м²;

$\rho_{мет}$ – плотность метана, м³/т;

$M_{ваг}$ – грузоподъемность вагона, т.

Результаты расчётов $\overline{C(Fo^{уг})}$, $J_{штаб}$, и X_τ представлены на рисунках 1,2,3.

Изменение средней концентрации метана в воздушном пространстве закрытого склада, определяемое выражением 8, связано с расходом воздуха, необходимым для поддержания в закрытом складе концентрации метана менее 1% по объёму. В то же время, увеличение расхода воздуха, и, как следствие, скорости движения воздушного потока, будет влиять на распространение угольной пыли, образующейся вследствие измельчения угольных частиц при проведении

погрузо-разгрузочных работ, а также её срыв с поверхности сформированного штабеля. Количество пыли и её перенос в замкнутом пространстве склада будет зависеть от объемов и влажности загружаемого угля, а также от скорости движения воздуха в закрытом складе.

Для оценки пылевыведений от технологических операций по погрузке и разгрузке угля, а также с учётом пыления с поверхности штабеля, был проведен расчёт максимального выброса угольной пыли фракцией 1-5 мкм, по результатам которого построен график зависимости выбросов угольной пыли при различных скоростях движения воздушного потока в закрытом складе (рисунок 4) (10):

$$\Sigma M = M_p + M_t + M_{ш} \quad (10)$$

где M_p – выброс пыли при работе портального реклаймера, г/с;

M_t – выброс пыли при работе сбрасывающей тележки, г/с;

$M_{ш}$ – выброс пыли с поверхности угольного штабеля, г/с.

В этой связи, безопасные условия эксплуатации закрытого угольного склада по газовому и пылевому факторам базируются на расчете расхода воздуха, необходимого для поддержания в закрытом складе концентрации метана менее 1% по объёму с одновременным определением концентрации пыли, образующейся вследствие погрузо-разгрузочных операций и непосредственном хранении угольного сырья и её распределением в зависимости от скорости воздушного потока.

2. Эквивалентный коэффициент диффузии, определяющий выделение метана из насыпного объёма угля в воздушную среду, определяется совокупной величиной эффективного коэффициента диффузии метана из угольных отдельностей и коэффициента диффузии метана в воздухе, заполняющего свободное пространство между ними, причём, эффективный коэффициент диффузии метана из угля следует устанавливать на основе термогравиметрического метода с последующим сопоставлением экспериментальных кривых, характеризующих суммарный поток метана из угля, с аналитическим решением диффузионной задачи для угольной отдельности в виде шара.

Поступление метана в воздушную среду из насыпного объёма угля зависит от двух механизмов массопереноса: первый - заполнение воздушных пустот между кусками угля (угольными отдельностями).

стями), который определяется эффективным коэффициентом диффузии $D_{эфф}$, величина которого находится экспериментально; второй - движение метана по связанным между собой воздушным пустотам, описываемым коэффициентом диффузии метана в воздухе $D_{возд}$. Суммарный диффузионный поток метана в насыпном объёме, представляющий сумму диффузионных потоков по угольным отдельностям, имеющим поверхности контакта с воздухом, и связанным между собой воздушным пустотам, пропорционален эквивалентному коэффициенту диффузии $D_{экв}$.

Для вычисления величины суммарного диффузионного потока метана принято, что структуру насыпного объёма можно представить в виде угольных отдельностей, имеющих кубическую форму, и воздушных прослоек, заполняющих свободное пространство между угольными отдельностями (рисунок 5).



Рисунок 5 - Расчётная схема к вычислению суммарного диффузионного потока (предполагается, что угольные отдельности имеют кубическую форму и одинаково ориентированы, а диффузионный поток перпендикулярен грани угольной отдельности)

Эквивалентный коэффициент диффузии в этом случае будет равен (11):

$$D_{экв} = D_{возд} \cdot \left[1 + v_{уг} \cdot \frac{1 - \frac{D_{возд}}{D_{эфф}}}{1 - \sqrt[3]{v_{уг} \cdot (1 - \frac{D_{возд}}{D_{эфф}})}} \right] \quad (11)$$

где $v_{уг}$ - объёмное содержание угольных отдельностей в насыпном объёме, доли ед.

Экспериментальные исследования эффективного коэффициента диффузии метана в угле проводились на основе термогравиметрических измерений.

метрического метода, который заключался в измерении метановыделения из угля, предварительно насыщенного метаном. Для проведения экспериментов использовались угли Кузнецкого угольного бассейна с различными физико-химическими свойствами (таблица 1).

Таблица 1 – Физико-химические свойства исследуемых углей

№ навески	Месторождение	Марка угля	Размер фракции, мм	Объем пор, см ³ /г	Радиус микропор, R, Å	Влажность, %
1	Осинниковское	Г	2-3	0,001	12,351	1,0
2	Ленинское	Г		0,007	12,744	3,9
3		Г		0,006	12,802	3,1
4		Ж		0,015	14,969	4,8
5		Ж		0,013	10,648	4,8
6	Нарыкско-осташкинское	Ж		0,009	13,628	3,3
7		Ж		0,011	13,972	3,2
8		Ж		0,010	13,396	3,3

Общая масса десорбированного метана ΔM_{CH_4} определялась как разность между начальной $M_{уг}^0$ и конечной массами угля $M_{уг}^{\tau}$ (12):

$$\Delta M_{CH_4} = M_{уг}^0 - M_{уг}^{\tau} \quad (12)$$

а масса метана десорбированного за промежуток времени $\Delta \tau_i$, как (13):

$$M_{CH_4}^{\Delta \tau_i} = M_{CH_4}^{\tau_i} - M_{CH_4}^{\tau_{i+1}} \quad (13)$$

По результатам измерений массы метана, десорбированного из угольной навески, за промежутки времени $\Delta \tau_i$ строился график зависимости $M_{CH_4}^{\Delta \tau_i}$ от τ , участки которого в пределах различных временных интервалов аппроксимировались экспоненциальными кривыми вида $a \cdot e^{-b\tau}$. При этом, временной интервал выбирался из условия достижения максимального значения коэффициента детерминации, превосходящего 0,99.

В качестве примера рассмотрим экспериментальные данные для навески № 1 при температуре +30 °С при начальной и конечной массах угля 112,62 г и 111,645 г. На основании их обработки было установлено, что в наибольшей степени выше установленным условиям удовлетворяет временной интервал 1000 – 7000 с (рисунок 6).

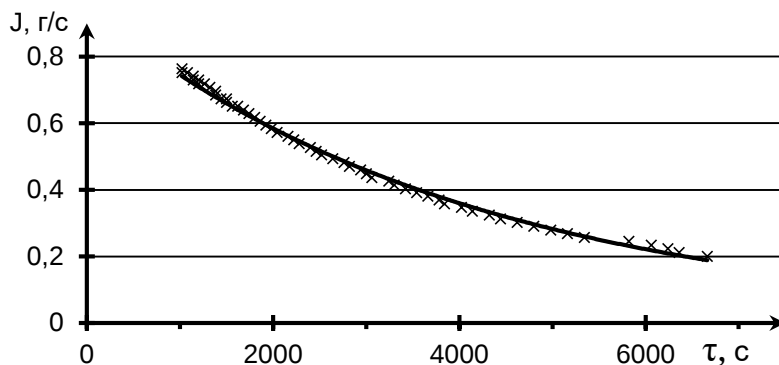


Рисунок 6 – Зависимость потока метана с поверхности насыпи угля от времени (коэффициент детерминации 0,995)

Временная зависимость $M_{CH_4}^{\Delta\tau_i}$, представляющая собой суммарный поток метана с поверхности насыпного объема J , имеет вид (14):

$$M_{CH_4}^{\Delta\tau_i} = J = 0,7097 \cdot e^{0,0002\tau} \quad (14)$$

Аналитическое решение задачи о формировании поля концентраций газа в частице шаровой формы относительно потока метана, может быть представлено формулой, полученной путём применения преобразования Лапласа и метода Бубнова-Галеркина (15):

$$J = A \cdot e^{\frac{10,5 \cdot D_{эфф} \cdot \tau}{r_{cp}^2}} \quad (15)$$

Величина эффективного коэффициента диффузии устанавливается из равенства показателей экспоненты для экспериментальной и теоретической кривых, т.е. (16):

$$\frac{10,5 \cdot D_{эфф} \cdot \tau}{r_{cp}^2} = 0,0002\tau \quad (16)$$

Следовательно, при среднем радиусе частиц угля 1,25 мм значение эффективного коэффициента диффузии метана в угле составит $3,04 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$.

3. Установление необходимости нормализации газовой и пылевой обстановки в закрытых угольных складах следует осуществлять на основе учёта аэрогазопылединамических процессов, влияющих на распределение концентрации метана и пыли в воздушной среде склада, имеющих место как при

транспортировке угольной массы до мест временного хранения и приводящих к снижению начальной газоносности угля, так и непосредственно во время хранения.

При размещении в закрытом складе углей с некоторым содержанием метана, при недостаточном количестве воздуха возможно повышение его концентрации выше 1%, что нарушает нормативные требования. В этой связи, необходимо определить расход воздуха, который позволит обеспечить непревышение установленного значения. С учетом параметров угольного склада и угольного штабеля расход воздуха следует рассчитывать по следующей формуле (17):

$$Q = - \frac{J_{\text{штаб}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}}}{\ln\left(\frac{C_{\text{штаб}} - C_{\text{пр}}}{C_{\text{штаб}}}\right)} \quad (17)$$

где $F_{\text{пов}}^{\text{штаб}}$ - поверхность угольного штабеля, м/с;

$C_{\text{штаб}}$ - концентрация метана в угольном штабеле, кг/м³;

$C_{\text{пр}}$ - предельная концентрация метана, кг/м³.

Для подтверждения результатов вычислений расхода воздуха, выполненных по приближенной аналитической зависимости, на основе программы Flow Vision проведено математическое моделирование аэрогазодинамических процессов при проветривании закрытого угольного склада. При этом поток метана с поверхности угольного штабеля соответствовал потоку, принятому в приближенных расчётах (10⁻⁶ кг/м²с), метаноносность угля 15 м³/т, а геометрия склада типовым проектным решениям: высота угольного штабеля - 23 м, ширина его основания – 65 м, длина - 600 м, с размещением погрузо-разгрузочной техники (портального реклаймера).

С целью снижения количества расчетных блоков и увеличения точности моделирования расчётная область была разделена на 4 равные части путем отсека продольной вертикальной плоскостью, проходящей вдоль длинной стороны, перпендикулярной основанию штабеля и поперечной вертикальной плоскостью, проходящей по центру склада, поперёк длинной стороны. Все вычисления выполнялись для одной из этих частей. Численные расчёты осуществлялись до момента стабилизации концентрации метана в объёме склада 1% по объёму (рисунок 7), при этом выход концентрации на квазистационарные значения происходит в течение ~ 45000 се-

кунд, что соответствует 12,5 часам хранения угля на складе. Распределение массовых долей метана в объеме закрытого склада приведено на рисунке 8.

Расход воздуха, установленный на основе численных расчетов и обеспечивающий разбавление метана до допустимых значений, равен $48 \text{ м}^3/\text{с}$, что с 6% точностью совпадает с результатами аналитических вычислений по формуле (17). Это подтверждает возможность использования приближенных зависимостей для вычисления необходимых для нормализации газовой обстановки расходов воздуха.

По результатам математического моделирования движение воздушного потока в объеме закрытого склада, вызванное работой комбинированной системы вентиляции, обеспечивающей расход $48 \text{ м}^3/\text{с}$, происходит со скоростью менее 1 м/с , что согласно выполненным оценкам не приводит к значительному пылению с поверхности угольного штабеля и при проведении погрузо-разгрузочных работ.

Для оценки распределения концентрации пыли в объеме склада было выполнено численное моделирование рассеивания угольной пыли на различной высоте, образующейся при непосредственном хранении сырья, а также при работе погрузо-разгрузочной техники, с учетом средней скорости движения воздушных масс 1 м/с . Направление движения воздушного потока задавалось в сторону воздуховыводящей трубы. Суммарное количество выбросов угольной пыли принято в соответствии с формулой 10. Для удобства вычислений и лучшей визуализации угольный склад был разделен на две равные части путём отсечения поперечной вертикальной плоскостью, проходящей по центру склада, поперёк длинной стороны. Результаты моделирования приведены на рисунке 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной задачи, направленной на обеспечение безопасной эксплуатации закрытого склада для временного хранения угля после его добычи и транспортировки перед отправкой потребителю при одновременном снижении негативного влияния на окружающую среду. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности размещения угольной

продукции в закрытых складах, даже в случае сохранения остаточной газоносности угля.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Обоснованные математические модели аэрогазопылединамических процессов в системе насыпной объём угля – воздушная среда позволяют определять поля концентраций метана в насыпных объёмах и воздушной среде склада, а также количество пыли, образующейся при разгрузочно-погрузочных операциях, и её перенос по объёму склада.

2. Усовершенствованный метод определения эффективного коэффициента диффузии метана в угольных отдельностях должен включать сочетанное использование термогравитометрического метода с последующим сопоставлением данных экспериментальных измерений с аналитическими зависимостями, характеризующими поток метана с поверхности угольной отдельности, имеющей сферическую форму.

3. Удовлетворительное совпадение данных аналитических расчётов с результатами математического моделирования (расхождение относительно расхода воздуха не превышает 6%) подтверждает правомерность допущений, использованных при выводе приближенной зависимости.

4. Выполненные оценки пылевой обстановки в закрытом угольном складе при расчётных величинах количества воздуха, обеспечивающих нормализацию газового режима, показывают, что образующаяся вследствие движения воздуха пыль не приводит к превышению в воздушной среде её допустимых концентраций.

Перспективным направлением дальнейшей работы, развивающей исследования, осуществленные в диссертации, следует считать разработку стохастической модели вычисления риска возникновения аварийной ситуации, связанной с превышением предельно-допустимой концентрации метана в воздушном пространстве закрытого склада, в зависимости от начальной газоносности угля, время транспортировки, температуры окружающей среды, геометрических параметров склада.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Гендлер, С.Г. Закрытые склады как безопасный способ хранения угля /С.Г. Гендлер, **А.Ю. Степанцова** // Известия Тульского Государственного университета. Науки о Земле. - 2022. - № 2. - С. 66-74. DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-64-77

2. Гендлер, С.Г. Проблемы промышленной и экологической безопасности при использовании для временного хранения угля открытых и закрытых складов / С.Г. Гендлер, **А.Ю. Степанцова**, В.С. Кузнецов // Известия Тульского Государственного университета. Науки о Земле. - 2022. - № 4. - С. 134-143. EDN: APNBUG

3. Gendler, S.G. Change of coal's gas content during transportation to the temporary storage / S.G. Gendler, **A.Yu. Stepantsova**, D.B. Mozzhanov // Journal of Civil Protection, Vol. 8, No. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.188>

4. Гендлер, С.Г. Оценка пылевого режима при эксплуатации угольных складов / С.Г. Гендлер, **А.Ю. Степанцова**, В.С. Кузнецов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. - 2024. - Т. 13, № 2(66). - С. 256-262. - EDN FQDXNB.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

5. Гендлер, С.Г. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях / С.Г. Гендлер, Т.А. Василенко, **А.Ю. Степанцова** // Горный информационно-аналитический бюллетень. - № 9-1 - 2023. - С. 135-148. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_135

6. Гендлер, С.Г. Обоснование безопасной эксплуатации закрытых угольных складов по газовому фактору / С.Г. Гендлер, **А.Ю. Степанцова**, М.М. Попов // Записки Горного института. 2024. С. 1-11 EDN SIJDWE

Патенты:

7. Программа для ЭВМ RU2023684677 Российская Федерация, Программа для выбора параметров системы вентиляции закрытых угольных складов, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию № 2023682679 01.11.2023, заявлен. 17.11.2023 Бюл. № 11 / Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Серегин А.С. заявитель СПГУ. – 1 с.: ил.

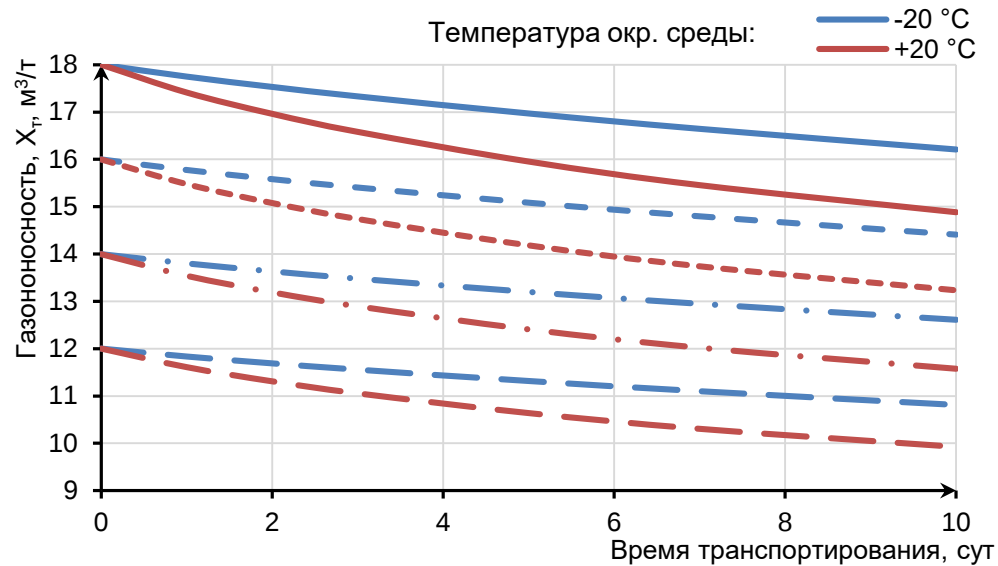


Рисунок 1 - Изменение газоносности угля за время его транспортирования

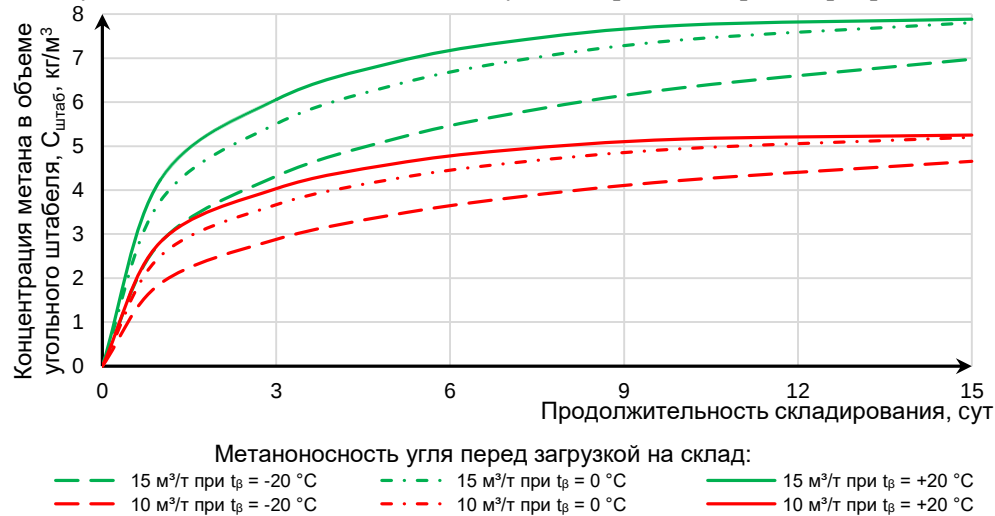


Рисунок 3 - Зависимость концентрации метана в объёме штабеля от продолжительности хранения при различных температурах окружающей среды

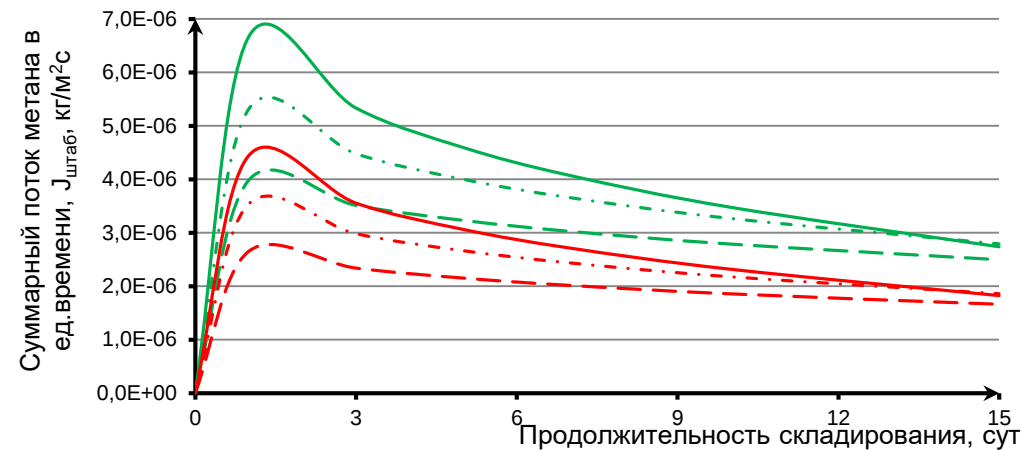


Рисунок 2 - Зависимость потока метана с поверхности угольного штабеля при различных температурах окружающей среды от продолжительности хранения

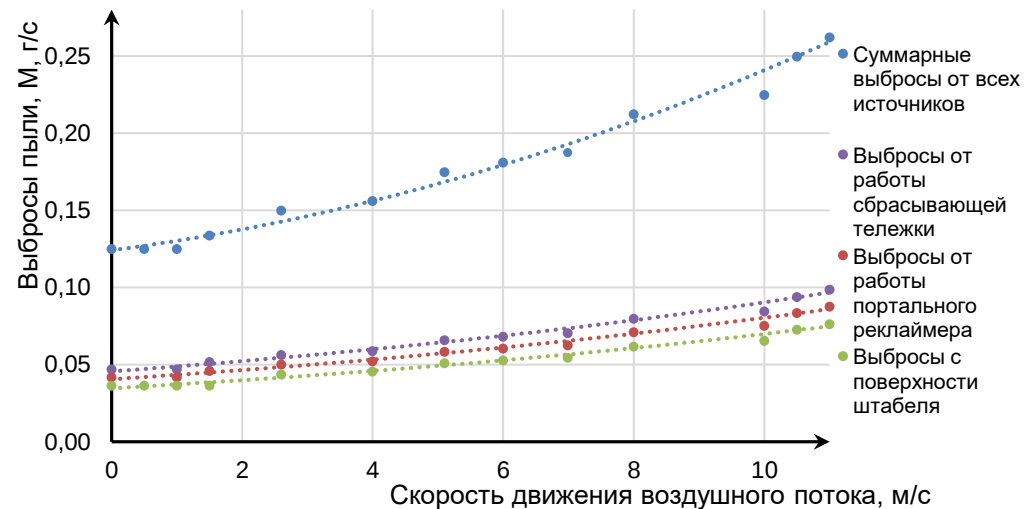


Рисунок 4 - График зависимости выбросов угольной пыли при различных скоростях движения воздуха в закрытом складе

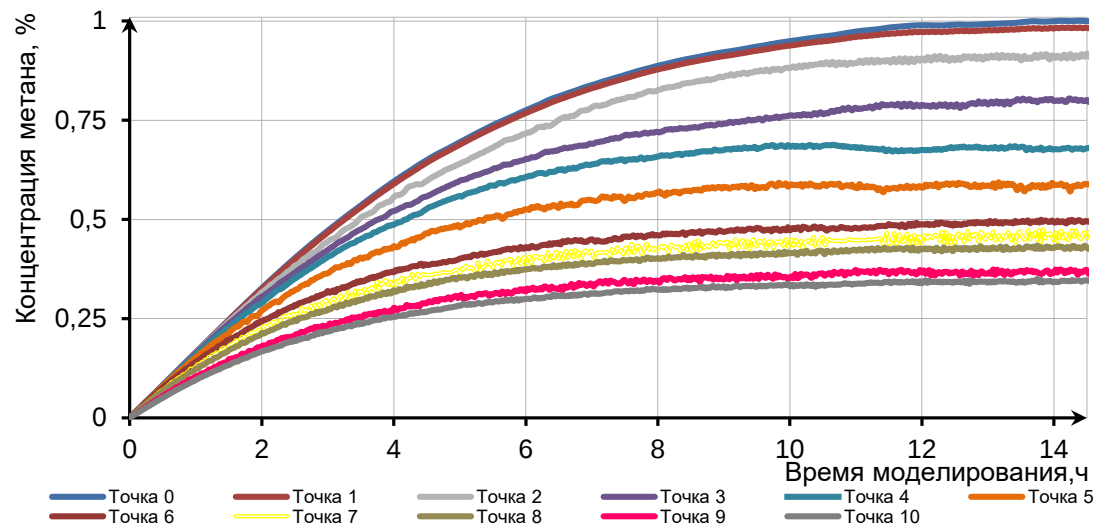


Рисунок 7 - График зависимости изменения концентрации метана в различных точках пространства закрытого склада от продолжительности моделирования

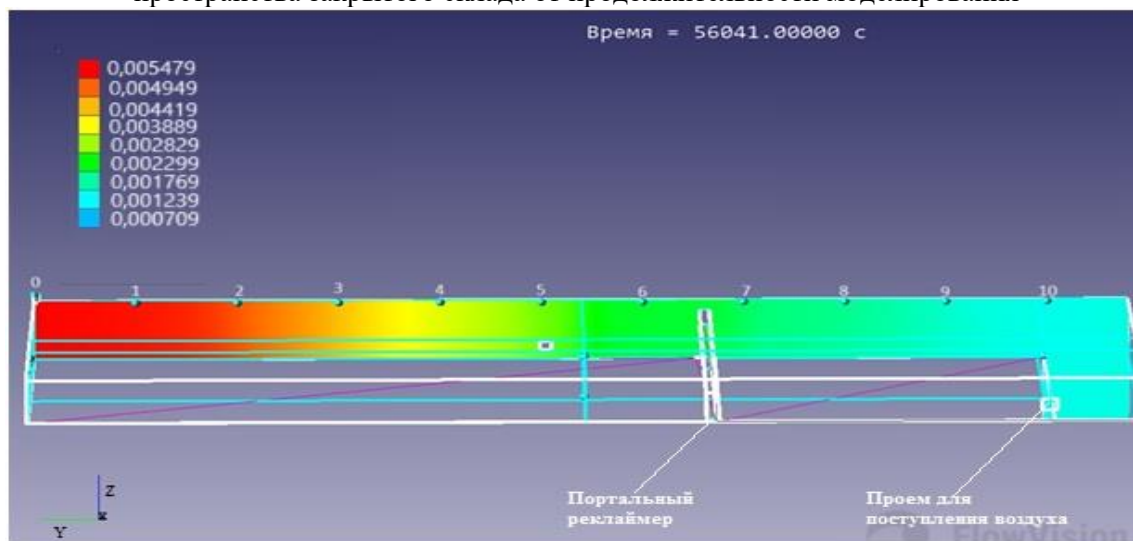


Рисунок 8 - Массовые доли метана и расположение точек замера

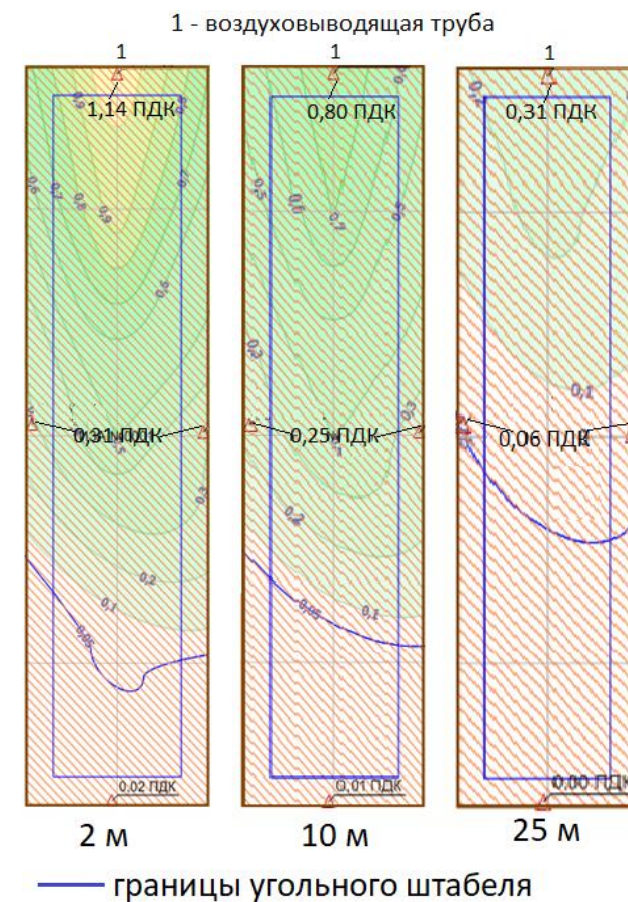


Рисунок 9 - Результаты моделирования распределения концентрации угольной пыли в объеме закрытого склада при скорости движения воздуха 1 м/с