

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

*На правах рукописи*

Степанцова Анастасия Юрьевна



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

Специальность 2.10.3. Безопасность труда

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПРОМЫШЛЕННУЮ И ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТИ ОТКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ УГОЛЬНЫХ СКЛАДОВ..</b>	<b>11</b>
1.1 Анализ существующих технических решений при временном складировании угля.....	11
1.2 Оценка влияния эксплуатации открытых угольных складов на окружающую среду.....	18
1.3 Особенности временного размещения угля в закрытых помещениях .....	25
1.4 Сравнительный анализ открытого и закрытого способов временного хранения угля.....	30
1.5 Выводы по главе 1 .....	33
<b>ГЛАВА 2 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИИ В НАСЫПНОМ ОБЪЕМЕ УГЛЯ .....</b>	<b>35</b>
2.1 Структура и свойства насыпного объема угля .....	35
2.2 Процессы диффузии и фильтрации в насыпном объеме угля .....	38
2.3 Расчёт эквивалентной величины коэффициента диффузии метана из насыпного объема угля.....	44
2.4 Связь параметров массопереноса с эмиссией метана из угля. Энергия активации диффузионного процесса. Эффективный коэффициент диффузии .....	49
2.5 Выводы по главе 2 .....	52
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАЗРУШЕННОГО УГЛЯ С ВОЗДУШНОЙ СРЕДОЙ.....</b>	<b>54</b>
3.1 Основные положения методики экспериментальных исследований .....	54
3.2 Подготовка навесок угля к проведению эксперимента.....	56
3.3 Экспериментальное исследование процесса десорбции метана из угля термогравиметрическим методом .....	59

3.4 Методика обработки экспериментальных данных. Вычисление эффективного коэффициента диффузии и энергии активации .....	62
3.5 Обсуждение результатов экспериментального исследования параметров массопереноса .....	66
3.6 Выводы по главе 3 .....	69
<b>ГЛАВА 4 АЭРОГАЗОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ И ХРАНЕНИИ КАМЕННОГО УГЛЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАКРЫТЫХ СКЛАДОВ .....</b>	<b>71</b>
4.1 Теоретические основы газовыделения метана из угольных штабелей .....	71
4.2 Анализ снижения газоносности каменных углей перед погрузкой в вагоны и при транспортировании .....	76
4.3 Определение величины газовыделения с поверхности угольного штабеля при размещении угля в закрытом складе .....	83
4.4 Математическое моделирование аэрогазодинамических процессов в воздушном пространстве закрытого угольного склада .....	86
4.5 Методика расчета параметров системы вентиляции закрытого угольного склада .....	93
4.6 Выводы по главе 4 .....	99
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>101</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>103</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Отчет о результатах исследований .....</b>	<b>118</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения .....</b>	<b>125</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....</b>	<b>127</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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 сооруженных 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 пылевыделения 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 сырье. 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 закрытых помещениях.

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.

**Объект исследования** – закрытые угольные склады.

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

**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. Разработка научных основ создания и функционирования систем и методов мониторинга, контроля, оценка и прогнозирования опасных и вредных факторов производства, способов и средств локализации и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

2. Научное обоснование, конструирование, установление области рационального применения и оптимизация способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов, разработка технических средств защиты людей от различных поражающих факторов источников чрезвычайных ситуаций.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Обоснована математическая модель формирования полей концентрации метана в насыпных объёмах 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 выдаче свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684677 от 17 ноября 2023 года (Приложение В).

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 г.) (Приложение Б).

#### **Методология и методы исследования.**

При выполнении работы использовался комплексный метод исследования, включающий в себя: аналитические исследования диффузионных процессов в угольных отдельностях и насыпном объёме угля, 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 объёма угля в воздушную среду, определяется совокупной величиной эффективного коэффициента диффузии метана из угольных отделностей 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., 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 (пункты списка литературы № 13-17, 76-79, 106), 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 соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684677 (Приложение В).

**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 своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Гендлеру С.Г. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, консультации и ценные указания, доктору технических наук профессору Василенко Т.А. и кандидату технических наук Серегину А.С. за помощь в проведении натурных исследований и компьютерного моделирования.

# ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПРОМЫШЛЕННУЮ И ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТИ ОТКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ УГОЛЬНЫХ СКЛАДОВ

## 1.1 Анализ существующих технических решений при временном складировании угля

На сегодняшний день добыча угля в России ведется практически во всех районах страны (рисунок 1.1.1). Миллиарды тонн угля залегают в угольных бассейнах на территории Кемеровской области, Якутии, Красноярского края, Иркутской области и пр. [6,99,101].

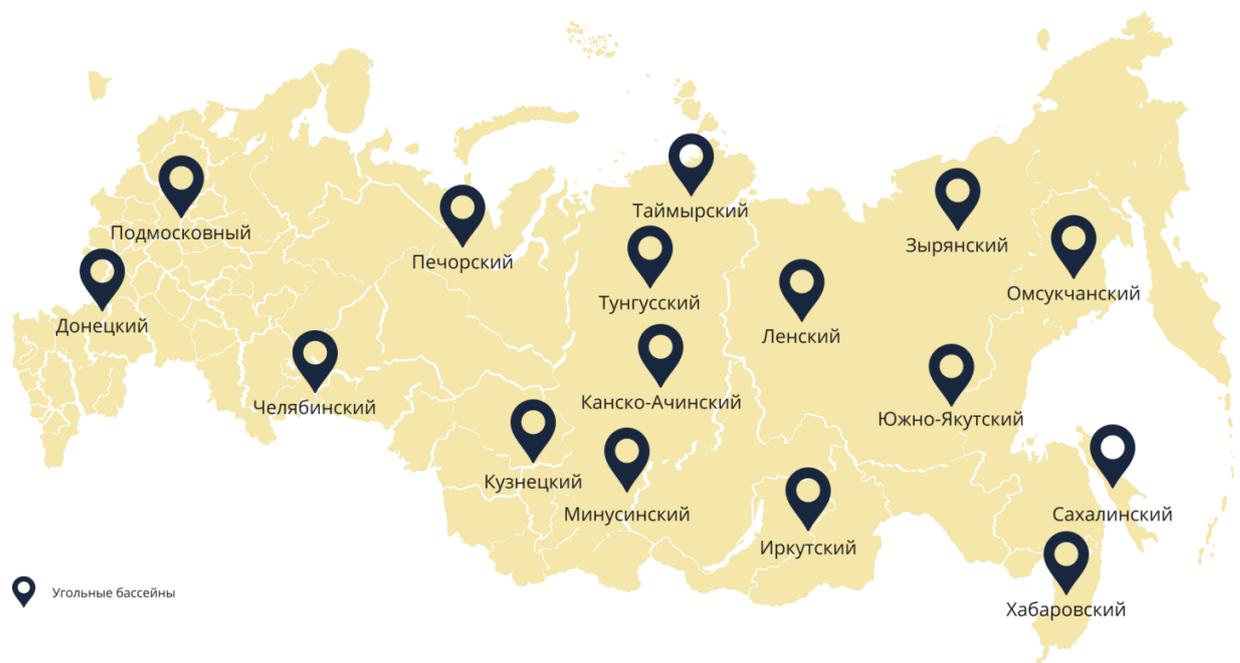


Рисунок 1.1.1 - Угольные бассейны России [32]

По данным [55] за 2024 году объем добычи угля составляет 443,5 млн. тонн, при этом почти половина объема добытого сырья была отправлена на экспорт. Угольная промышленность занимает четвертое место по объёму экспортной выручки после газовой и нефтяной промышленностей и продукции металлургии. Важность угольной промышленности для России заключается не только в экономическом аспекте, но и в социальном, так как данная отрасль является основным источником занятости для многих регионов страны. Кроме того, уголь как важный источник энергии, используется для производства электроэнергии и тепла [34,50,102].

Рост добычи угля и повышенный коммерческий интерес к его приобретению приводят к необходимости организации временного складирования угля не только на территории угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, но также в портовых терминалах и на складских площадках для последующей отправки потребителю [15].

Анализируя мировой опыт эксплуатации угольных складов, можно отметить, что по способу размещения сырья выделяют склады открытого и закрытого типа [14,76,81].

Угольный склад открытого типа собой большую прикордонную зону, где уголь, приведенный в транспортабельное состояние, формируется в штабели для последующей погрузки на судно или запускается в производство [16,45].

Типичным примером открытого склада является специализированный угольный терминал с высокотехнологичной перевалкой угля АО «Ростерминалуголь» (рисунок 1.1.2), расположенный в порту Усть-Луга (Кингисеппский район, Ленинградская область). Этот высокотехнологичный комплекс обеспечивает полный цикл обработки угля: от приема из железнодорожных вагонов до погрузки на морские суда. Ключевым элементом системы является склад открытого типа, площадь которого определяется пропускной способностью терминала и сезонными колебаниями объемов перевалки.



Рисунок 1.1.2 - Общий вид АО «Ростерминалуголь» [97]

Однако, при складировании и перевалке угля на открытых складах возрастает риск снижения качества угля ввиду воздействия атмосферных факторов (дождь, ветер, снег). Более того, при ветровой эрозии происходит срыв мелких угольных частиц с поверхности угольного штабеля, интенсифицирующийся при увеличении скорости движения воздушного потока, а также образующихся вследствие погрузо-разгрузочных операций и перемещении угля по конвейерам [7,48]. Значительная часть мелкой фракции уносится ветром, что, помимо потерь сырья, создает проблему запыленности воздуха на территории склада, так как вдыхание угольной пыли негативно сказывается на здоровье персонала, вызывая респираторные заболевания. Кроме того, витающая в воздухе пыль загрязняет и окружающую склад территорию, приводя к загрязнению почвы и водных источников [9,71,75].

Помимо ветровой эрозии, атмосферные осадки вызывают увлажнение угля, что приводит к снижению его теплотворной способности и ухудшению технологических характеристик. Колебания температуры, способствующие замерзанию и оттаиванию угля, особенно характерные для регионов с резко континентальным климатом, вызывают микротрещины и фрагментацию, увеличивая количество мелкой фракции и способствуя дальнейшему пылеобразованию и окислению. Ввиду циклического замораживания-оттаивания возникают термические напряжения в угольных кусках, приводя к их механическому разрушению и изменению структуры. Кроме того, инициируемые воздействием атмосферного кислорода и влаги окислительные процессы приводят к снижению содержания углерода и водорода и одновременному увеличению содержания кислорода в угле, что может привести к самовозгоранию угольного штабеля. В результате воздействия всех этих факторов происходит снижение физико-химических и механических свойств угля [8,17,63,88].

Помимо непосредственного воздействия на здоровье людей и экологию прилегающих территорий, угольная пыль представляет опасность возникновения пожаров и взрывов при наличии источников открытого огня или искрообразования. Возгорание на открытом угольном терминале стакер-реклаймера в порту Тамань

7 февраля 2022 года, причиной которого стала угольная пыль, служит ярким примером образования такой опасности [62].

Минимизировать негативное воздействие хранения угля открытым способом можно за счёт различных мер, включая оптимизацию формы складов, использование водоотводных систем, применение специальных покрытий для снижения пылеобразования, контроль влажности и температуры и регулярное уплотнение угля на складе [7,54,69]. Но даже при использовании всех этих мер, полностью исключить вышеописанные факторы невозможно.

Одним из способов решения вопросов, связанных с промышленной и экологической безопасностью при эксплуатации открытых угольных складов, является использование складов закрытого типа [14,26,60]. Закрытые склады, будь то ангары, бункера или специальные силосы, обеспечивают защиту угля от атмосферных воздействий, значительно снижая потери и сохраняя его качество. Однако, эксплуатация закрытых складов требует специфических инженерных решений, включая систему вентиляции для предотвращения образования взрывоопасных ситуаций, систему контроля запыленности и загазованности воздуха, а также температуры и влажности угля и др.

Первые закрытые склады появились в портах Тайваня в 20 веке, что послужило толчком для реализации подобных проектов в других странах. Сегодня крытые хранилища эксплуатируются в Германии (Роттердам), Северной Корее (Раджин), России (Восточно-Уральский Терминал, ПАО «Кокс»), некоторых европейских странах (Вентспилс, Клайпеда).

Восточно-Уральский терминал (рисунок 1.1.3) был создан в 1998 году в порту Восточный города Находка. Он занимает площадь около 11 гектар и имеет закрытый склад площадью 12000 м<sup>2</sup> и общей вместимостью 90000 тонн [11].



Рисунок 1.1.3 - Восточно-Уральский терминал с закрытым складом и тремя купольными складами [11]

Изначально этот склад предназначался для хранения сыпучих материалов перед их отгрузкой на морские суда. Однако, в настоящее время основным грузом является уголь с угольных шахт и разрезов Кузбасса и Якутии. Также, на территории терминала были построены ещё три закрытых купольных склада, вместимостью 35000 тонн каждый. При погрузке на судно груз, хранящийся на данных складах, перемещается посредством крытых конвейерных линий на судопогрузочную машину с локальной системой орошения, откуда по специальным закрытым рукавам подаётся в трюмы судна. При такой технологии погрузочных работ возникновение пыли с последующим её выбросом в окружающую среду практически отсутствует.

В 2008 году был введён в эксплуатацию угольный терминал в порту латвийского города Вентспилс (рисунок 1.1.4), также использующий крытый угольный склад для краткосрочного промежуточного хранения угля и последующей отгрузки его на морские суда [100]. Вентспилский угольный терминал способен переваливать 6 млн. тонн угля в год, при этом штабелируя уголь в трёх отсеках по 70000 тонн угля каждый. Крытый склад этого терминала занимает площадь 24800 м<sup>2</sup> и вмещает до 210000 тонн угля. Технологические процессы крытого склада Вентспилского угольного терминала полностью автоматизированы и управляются посредством единой системы управления оборудованием склада.

Данный терминал является одним из основных транспортных узлов Балтии, также отгружающим уголь с шахт Кузнецкого угольного бассейна.



Рисунок 1.1.4 - Угольный склад закрытого типа в порту Вентспилс [100]

С 2023 года в Выборгском районе Ленинградской области вводится в эксплуатацию универсальный морской портовый комплекс – «Приморский универсально-перезгрузочный комплекс» (рисунок 1.1.5), который предполагает складирование угольного сырья на закрытых складах хребтового типа, поступающего железнодорожным транспортом «Выборг – Приморск» [14,83].



Рисунок 1.1.5 - Закрытые склады хребтового типа Приморского УПК [83]

Склады закрытого типа нашли применение не только на горно-обогатительных предприятиях, но также эксплуатируются и на тепловых электростанциях, основным видом топлива которых является уголь.

Примером использования закрытых хранилищ на электростанциях является склад угля на электростанции Бокамина, город Коронель в Чили. Руководство электростанции приняло решение о возведении закрытого хранилища угля в целях обеспечения более эффективной и безопасной эксплуатации. По форме склад

напоминает купол площадью более 15000 квадратных метров (рисунок 1.1.6). За счет применения естественной и искусственной вентиляции обеспечивается безопасная эксплуатация по пылевому и газовому факторам [82].



Рисунок 1.1.6 - Купольный склад угля закрытого типа теплоэлектростанции Бокамина в Чили [82]

Строительство закрытых угольных складов во всех вышеперечисленных случаях обуславливается в первую очередь факторами, формирующими экологическую и промышленную обстановку в этих регионах. Так как транспортировка и перегрузка угля связаны с образованием большого количества пыли, попадающей в почву, водоёмы и, в конечном счёте, в организмы людей, переход от хранения угля в открытых складах к хранению угля в складах закрытого типа является важным шагом к минимизации влияния фактора на здоровье людей и окружающую среду.

Помимо портовых терминалов и электростанций, закрытые склады угля применяются на некоторых химических заводах, предприятиях по производству угольного кокса, угольных обогатительных фабриках (рисунок 1.1.7), а также на металлургических комбинатах и заводах.



Рисунок 1.1.7 - Закрытый склад угля Бачатской обогатительной фабрики [59]

Таким образом, несмотря на довольно малое распространение, закрытые угольные склады имеют большой потенциал к более масштабному применению, особенно в условиях постоянно ужесточающихся требований норм и стандартов в области промышленной безопасности и экологии. Более того, правильная организация складирования позволяет обеспечить бесперебойные поставки сырья, удовлетворить спрос на уголь различного качества и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Однако, учитывая экономические, климатические и иные факторы, выбор способа хранения угля должен основываться на комплексной оценке того или иного типа и размера хранилища.

## **1.2 Оценка влияния эксплуатации открытых угольных складов на окружающую среду**

На территории России наиболее широко распространены открытые угольные терминалы, где угольные штабели формируются и размещаются на большой территории с прямым выходом в море или океан. Такая необходимость обусловлена поддержанием торговых отношений, как с отечественными потребителями, так и странами-импортерами. В этой связи, время существования каждого штабеля определяется спросом и графиком движения морского транспорта [39,44].

Открытое складирование угля, несмотря на свою кажущуюся простоту и экономичность, сопряжено с рядом существенных недостатков, приводящих к значительным потерям качества и количественного снижения запасов топлива ввиду климатических условий региона.

Как было отмечено ранее, влияние атмосферных осадков проявляется, в первую очередь, в увлажнении угля, ухудшая не только его транспортировку и технологические свойства, но и запуская процессы химического выветривания. Вода, проникая в поры угля, способствует окислению органического вещества, что приводит к снижению теплоты сгорания и увеличению зольности. Зольность угля увеличивается за счет накопления минеральных примесей, а теплота сгорания снижается из-за окисления органического вещества и потери летучих компонентов. Спекающая способность – важный показатель для коксования – также уменьшается, снижая пригодность угля для металлургической промышленности [8,17,63].

Температурные колебания также вносят свой вклад в деградацию качества угля. Дневные и сезонные перепады температур вызывают термические напряжения в угольных отдельностях, способствуя образованию микротрещин и дальнейшему его измельчению [88]. Это особенно актуально для угля с неоднородной структурой и высокой пористостью. В результате уменьшается размер угольных частиц, увеличивается их удельная поверхность, что, в свою очередь, повышает активность окислительных процессов. Этот процесс, называемый морозным выветриванием, особенно интенсивно протекает в регионах с частыми циклами замерзания и оттаивания. Глубина промерзания грунта и угля, а также состав самого угля (пористость, прочность) – важные факторы, влияющие на интенсивность морозного выветривания.

Еще одним немаловажным фактором является ветровая эрозия, приводящая к дополнительному измельчению угля и выносу его мелких фракций. Сила ветра, его направление и продолжительность воздействия оказывают влияние на интенсивность ветровой эрозии. Более того, неровности поверхности угольных штабелей, их высота и форма также играют существенную роль, создавая зоны

завихрений и ускоряя процесс выветривания [44,47,91]. Подобные эффекты особенно ощутимы в регионах с сильными ветрами и открытыми ландшафтами.

Согласно литературным данным [29,53,61], основными источниками пылеобразования на складах открытого типа, помимо складских площадок с угольным сырьем, можно считать конвейерные линии, железнодорожный грузовой фронт разгрузки вагонов, а также морской грузовой фронт.

Процесс пыления угля, возникающий при перегрузке сырья, ввиду просыпания и измельчения угольных отдельностей (рисунок 1.2.1) является серьезной экологической и экономической проблемой. Пыль угольной мелочи, состоящая из тончайших частиц, загрязняет окружающую среду, ухудшает условия труда персонала угольного склада.



Рисунок 1.2.1 - Способы попадания угольной пыли в воздух при транспортировании угля на ленточном конвейере [65]

Для наглядности размещения источников пыления (организованных и неорганизованных) при перемещении и хранении угля принята [65] общая технологическая схема (рисунок 1.2.2).

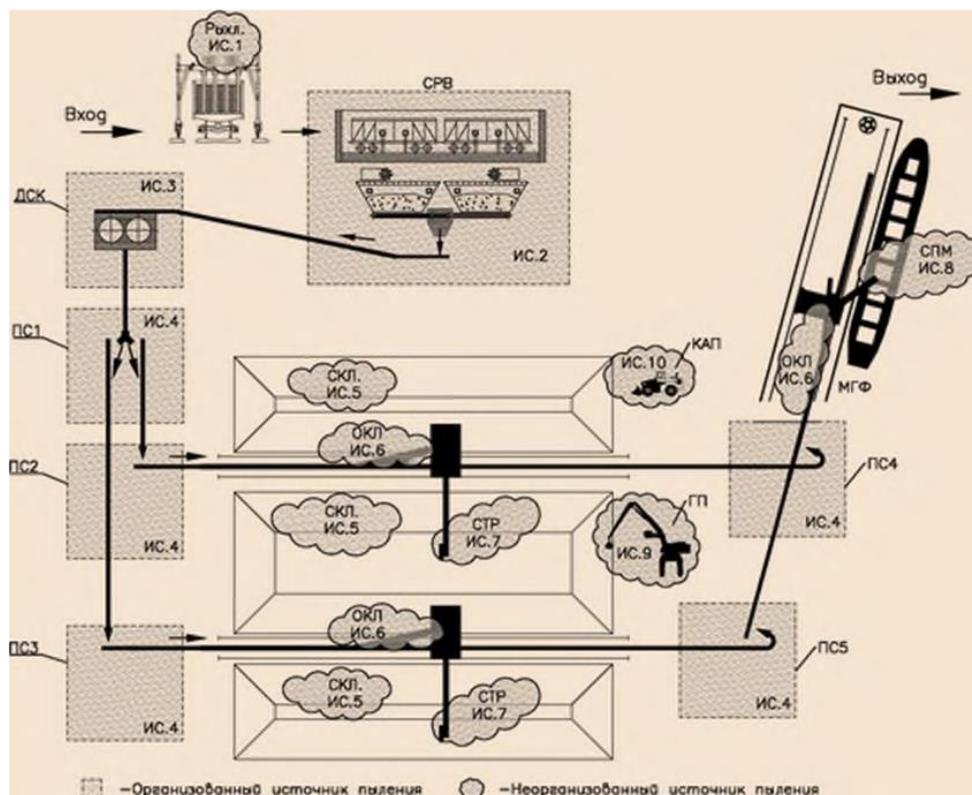


Рисунок 1.2.2 - Принципиальная технологическая схема портового специализированного угольного терминала с указанием расположения источников пыления. ИС – источник пыления, МГФ – морской грузовой фронт, СРВ – станция разгрузки вагонов, СКЛ – открытые складские площадки; ОКЛ – открытые конвейерные линии, СТР – стекер-реклаймер [65]

Образующаяся от вышеупомянутых источников пыль распространяется как по площади склада, так и по вблизи расположенным селитебным зонам, ввиду ветрового потока [17,37,75].

Анализ литературных источников показывает [17,36,49], что на удалении от подветренной кромки поверхности штабеля до 20-40 м присутствуют частицы размером до 100-200 мкм, но на расстояниях 50-70 м частицы этого размера в воздухе с подветренной стороны не обнаруживаются, что свидетельствует о преобладающем влиянии на процесс осаждения гравитационных сил.

Однако, пыль размером 30-40 мкм способна распространиться на большие расстояния и тем самым формируя основную величину пылевой нагрузки как на персонал, обслуживающий открытые угольные склады, так и на население, проживающее в пределах ореолов распространения пыли [17,37,74].

Для оценки рассеивания угольной пыли в окружающей среде был спроектирован открытый угольный склад вблизи морского порта (рисунок 1.2.3) с помощью программы УПРЗА «ЭКОЛОГ», версии 4.50. Синей линией выделена санитарно-защитная зона на расстоянии 500 м от источника загрязнения.

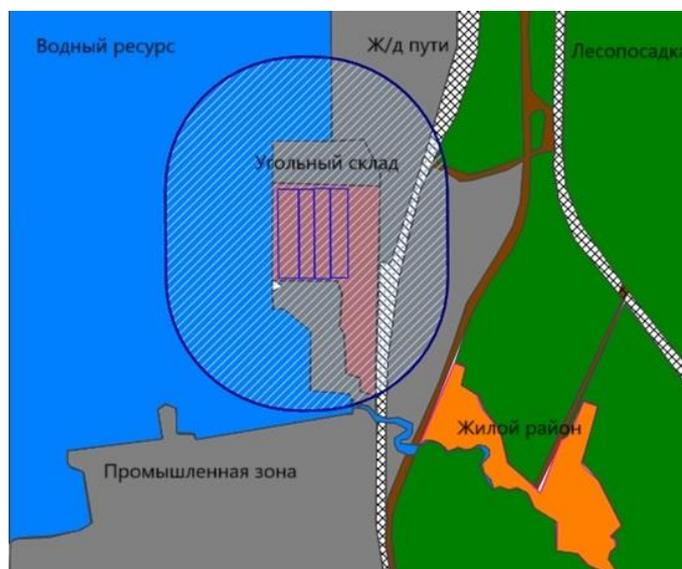


Рисунок 1.2.3 - Схематичное изображение открытого угольного склада

При моделировании в качестве источников выделения угольной пыли рассматривались четыре угольных штабеля высотой 26 м, шириной по основанию 65 м и протяженностью 600 м, а также используемое технологическое оборудование (стакер, реclaimer). Метеорологические параметры местности представлены в таблице 1.2.1.

Таблица 1.2.1 - Метеорологические параметры местности

Средняя минимальная температура наружного воздуха наиболее холодного месяца, °С:	-30
Средняя максимальная температура наружного воздуха наиболее жаркого месяца, °С:	23
Коэффициент А, зависящий от температурной стратификации атмосферы	160
Скорость ветра, наблюдаемая на данной местности, повторяемость превышения которой находится в пределах 5%, м/с:	5
Плотность атмосферного воздуха, кг/м <sup>3</sup> :	1,29
Скорость звука, м/с:	331

Параметры выброса угольной пыли в атмосферу от эксплуатации открытого склада определялись по отраслевой методике [23]. На основе полученных данных определены области рассеивания угольной пыли по территории угольного склада при скорости ветра 1 м/с без учета его направления (рисунке 1.2.4) в 5 различных точках.



Рисунок 1.2.4 - Изолинии концентрации угольной пыли по территории склада

Данные результаты характерны преимущественно для летнего засушливого периода, при отсутствии ветрового потока. При таких условиях фактическая концентрация пыли будет существенно превышать предельно-допустимые значения, принятые  $0,3 \text{ мг/м}^3$  [70].

С целью оценки влияния скорости ветрового потока на вынос угольной пыли, проведены расчеты для скоростей ветра 3 и 5 м/с без учета его направления. Результаты приведены в таблице 1.2.2.

Таблица 1.2.2 - Сводные данные расчетов концентрации угольной пыли в зависимости от скорости ветрового потока

Номер контрольной точки	Скорость ветра					
	1 м/с		5 м/с		7 м/с	
	C, мг/м <sup>3</sup>	C/ПДК	C, мг/м <sup>3</sup>	C/ПДК	C, мг/м <sup>3</sup>	C/ПДК
1	1,95997	6,53	0,4649	1,55	0,1794	0,60
2	1,809	6,03	0,4136	1,38	0,1552	0,52
3	1,7378	5,79	0,3869	1,29	0,1423	0,47
4	1,7471	5,82	0,4289	1,43	0,1746	0,58
5	2,077	6,92	0,6082	2,03	0,2813	0,94

Анализ данных показывает, что с увеличением скорости ветрового потока, снижается концентрация угольной пыли вблизи источников пыления и при движении ветра 7 м/с становится в пределах ПДК. Это объясняется тем, что с увеличением скорости ветрового потока пыль выносится потоком воздуха на большие расстояния и оседает за пределами промышленной зоны, создавая угрозу близлежащим селитебным зонам. Так, например, на границе санитарно-защитной зоны максимальная приземная концентрация угольной пыли составляет 4,36 ПДК при скорости ветрового потока 7 м/с.

Ситуация существенно меняется при моделировании распространения угольной пыли с учетом направления ветра (рисунок 1.2.5), так как под влиянием ветрового потока угольная пыль будет преимущественно лететь в его направлении.



Рисунок 1.2.5 - Распространение угольной пыли по территории с учетом направлением ветра в летний период

Согласно исходным данным, преобладающее направление ветра июнь-август – западное. Таким образом, наиболее подвержены пылевому фактору прилежащие к складу юго-западные территории (лесополоса и жилой район).

Для снижения негативных воздействий необходимо применять комплексные меры: правильный выбор места складирования с учетом климата региона, оптимизацию формы и размеров штабелей, использование специальных покрытий и технологий, регулярный мониторинг состояния угля и своевременная обработка. Внедрение современных технологий складирования и применение

специализированного оборудования позволит значительно снизить потери и улучшить качество хранящегося угля.

### 1.3 Особенности временного размещения угля в закрытых помещениях

Закрытые склады временного хранения угольного сырья (рисунок 1.3.1) представляют собой полностью изолированные здания с крышей и стенами, обеспечивающими защиту размещаемого сырья от внешних факторов.

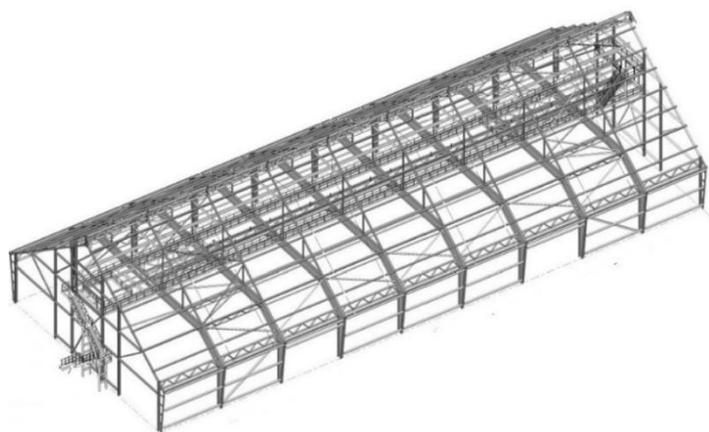


Рисунок 1.3.1 - Конструкция типового закрытого склада хребтового типа

По системе ленточных конвейеров угольное сырье поступает на складскую зону, где производится штабелирование либо путем сбрасывания угля с ленточного конвейера, расположенного в верхней части склада (рисунок 1.3.2), либо с помощью фронтального погрузчика и поворотного штабелера. Хранение угля производится в штабелях, разделённых по необходимым характеристикам: фракции, марке угля, времени хранения [16].

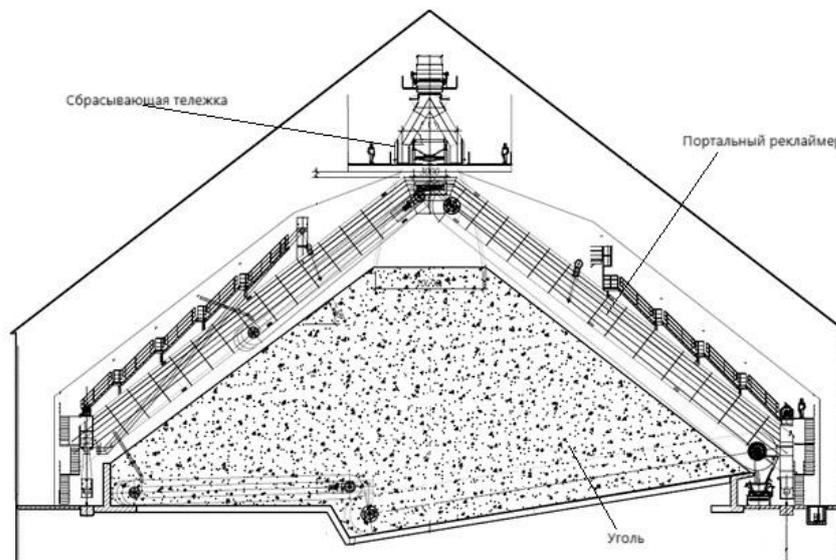


Рисунок 1.3.2 - Поперечный разрез закрытого склада хребтового типа

Разгрузка склада является важным этапом его хранения и транспортировки. Для эффективной разгрузки используется порталый реклаймер, который перемещается по рельсам вдоль склада и разгружает нужный штабель (рисунок 1.3.2.). Управление процессом разгрузки производит машинист реклаймера из кабины. Разбор штабеля осуществляется с помощью скребков, которые направляют уголь на ленточный конвейер, ведущий на погрузочное устройство [66].

Этап хранения угля сопровождается выделением газа метана из угольных штабелей, образованием угольной пыли, а также возможным окислением угля, вследствие чего вероятно самовозгорание. По этим причинам во время хранения осуществляется контроль состава воздуха, степени запылённости помещения, а также температуры угольных штабелей [24,66,67].

О важности соблюдения требований безопасности свидетельствует происшествие на складе угля Шагонарской ТЭЦ (Республика Тыва), где 6 марта 2024 года произошел взрыв угольной пыли на ленточном конвейере с последующим возгоранием [89]. За несколько месяцев до этого 13 сентября 2023 года в вечернее время на Кемеровской ТЭЦ, принадлежащей ОАО «Кемеровская генерация», произошло возгорание угольной пыли, повлекшее воспламенение машиниста топливоподачи топливно-транспортного цеха [73].

Одним из важных вопросов обеспечения безопасной эксплуатации закрытого склада является угольная пыль, образующаяся при погрузо-разгрузочных работах в узлах пересыпки и при формировании штабелей. Данные производственные процессы аналогичны процессам при хранении угля на складах открытого типа, однако, распространение пыли происходит в замкнутом объеме, что может привести к превышению предельно-допустимых значений концентрации угольной пыли в воздухе рабочей зоны ( $\text{ПДК}_{\text{ср}} 10 \text{ мг/м}^3$  [п. 2128 70]), создавая угрозу для здоровья обслуживающего персонала.

Для оценки концентрации угольной пыли в объеме закрытого склада, образующейся от технологических операций по погрузке и разгрузке угля, а также с учетом пыления штабеля, был проведен расчет максимального выброса угольной

пыли по Отраслевой методике [23]. При этом суммарный выброс угольной пыли рассчитывался по следующей формуле (1.3.1):

$$\sum M = M_p + M_T + M_{ш} \quad (1.3.1)$$

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

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

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

Графическая зависимость выбросов пыли при совокупной работе портального рекаймера и сбрасывающей тележки, а также с учетом срыва пыли с поверхности угольного штабеля при разных скоростях движения воздуха в складе приведена на рисунке 1.3.3. Расчеты производились для угольного штабеля высотой 26 м, шириной по основанию 65 м и протяженностью 600 м, влажностью угля 6%, коэффициентом измельчения угольной массы 0,1. Размер пылевых частиц от 0,25 до 10 мкм.

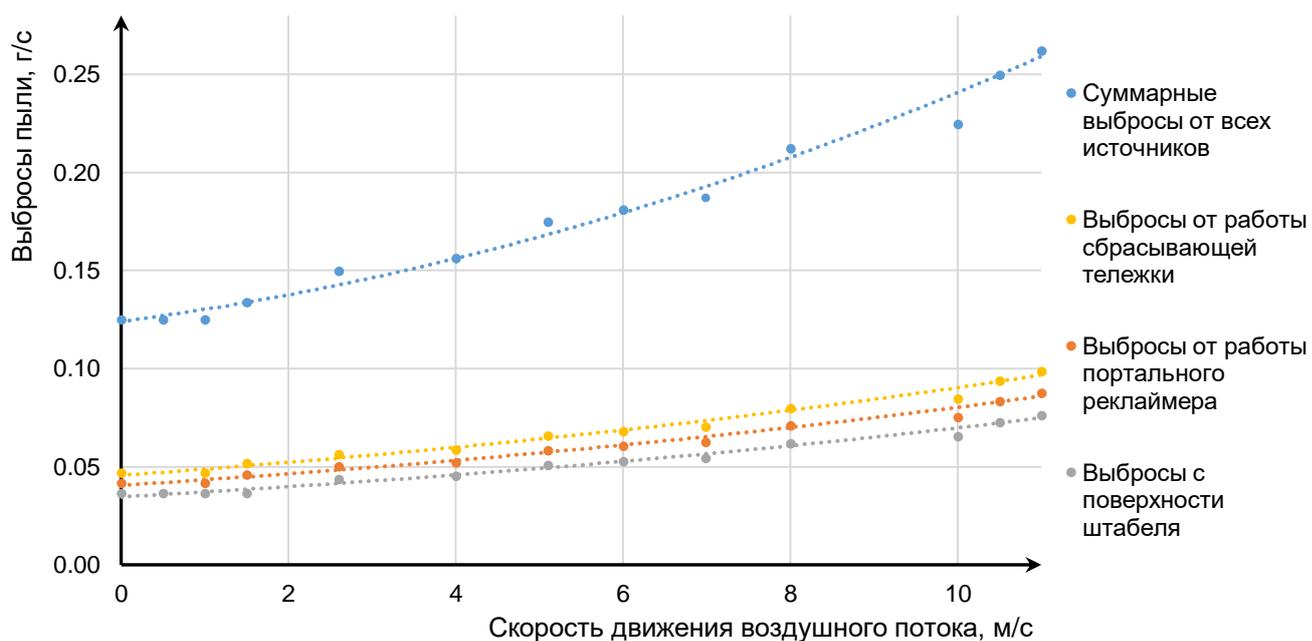


Рисунок 1.3.3 - График зависимости выбросов угольной пыли при различных скоростях движения воздуха в закрытом складе

Как видно из графика, представленного на рисунке 1.3.3, рост выбросов угольной пыли при осуществлении технологических процессов в закрытом угольном складе связан со скоростью воздушного потока и имеет некоторую экспоненциальную зависимость. Например, при скорости движения воздуха 1 м/с суммарная величина выбросов от всех источников будет 0,12 г/с, а при 15 м/с – 0,34

г/с. Это связано с тем, что продолжительность пребывания пылевых частиц в воздухе, а также возможность их проникновения в организм человека и накапливание в органах дыхания напрямую зависит от дисперсного состава пыли [10]. Известно, что более крупные частицы пыли оседают под действием силы тяжести быстрее, чем более мелкие частицы, которые, наоборот, подхватываются и перемещаются воздушными потоками, возникающими во время погрузки и разгрузки угля, равномерно распределяясь по всему пространству склада. В этой связи, при значениях скорости витания пыли, превышающей значение скорости потока воздуха, будет превалировать процесс осаждения пылевых частиц и наоборот.

Еще одной не менее важной проблемой, возникающей при хранении угля в закрытом складе, является десорбция метана в замкнутый объем. Количество выделяемого метана напрямую связано со значением метаноносности перед загрузкой угля в склад, величина которого зависит от следующих факторов:

- Природная метаноносность угля: варьируется в широких пределах в зависимости от геологического происхождения угольного пласта, его возраста, глубины залегания и степени метаморфизма. Угли с высокой степенью метаморфизма (антрациты) содержат значительно меньше метана, чем бурые угли. Поэтому, даже при одинаковых условиях хранения, выделение метана будет существенно отличаться для разных типов угля.

- Физико-механические свойства угля: пористость, проницаемость и трещиноватость угля напрямую влияют на скорость диффузии метана. Более пористый уголь с развитой системой трещин будет выделять метан быстрее, чем плотный, монолитный уголь.

- Условия транспортировки угля: в зависимости от температуры окружающей среды в течение транспортирования (зимний или летний период) и времени транспортировки остаточная метаноносность угля будет варьироваться.

При размещении в закрытом угольном складе углей с высокой метаноносностью возможно загазирование замкнутых объемов, которое может продолжаться длительное время, при этом взрывоопасная обстановка может быть

создана при нахождении большого количества угля (десятков или сотен тонн) в условиях слабо проветриваемых или непрветриваемых объемов.

В соответствии [66] с величину остаточной газоносности углей следует считать основным показателем, определяющим возможное превышение концентрации газа в воздухе склада, предельное значение которой ограничено 1% по объему.

Согласно исследованиям [15], природная газоносность некоторых угольных месторождений России высокая - более 15 м<sup>3</sup>/т, что может привести к формированию взрывоопасной обстановки как при добыче, так и при хранении угля. В таблице 1.3.2 приведены значения максимальной природной метаноносности некоторых угольных пластов Кузбасса.

Таблица 1.3.2 - Метаноносность некоторых угольных месторождений Кузбасского угольного бассейна [15]

Месторождение	Максимальная природная метаноносность м <sup>3</sup> /т с.б.м.
Алардинское	44,7
Байдаевское	30,3
Березово-Бирюлинское	36,7
Егзово-Красноярское	13,5
Кедровско-Крохалевское	17,6
Киселевское	35
Ленинское	25
Ольжерасское	31
Распадское	22
Соколовское	17,1
Шелканское	23,5
Чертинское	35

Снижение газоносности относительно его начального значения проходит в несколько этапов: извлечение отбитого угля на поверхность, погрузка в вагоны, транспортировка по железной дороге, разгрузка на склад. На каждой из этих стадий необходимо исследовать процессы дегазации угольной массы и учитывать технологические особенности каждого этапа [15].

Поступление метана в атмосферу закрытого склада требует обязательной организации эффективной системы вентиляции. Выбор между естественной и

искусственной вентиляцией зависит от объёма склада, количества выделяющегося метана, а также климатических условий региона. Естественная вентиляция может быть достаточной для небольших складов с низкой метанноносностью угля, но для больших объёмов и интенсивного выделения метана необходима искусственная вентиляция, часто с применением специализированного оборудования, например, систем принудительной вытяжки.

В то же время, вентиляция увеличивает интенсивность распространения угольной пыли. Циркуляция воздуха внутри склада приводит к сложному распределению пыли по высоте, которое зависит от ее дисперсного состава. Мелкие частицы пыли могут оставаться во взвешенном состоянии значительно дольше, создавая опасность взрыва метановоздушной смеси. Согласно литературным данным [35,56,58], нижний концентрационный предел взрываемости угольной пыли снижается при наличии в воздушной среде метановых скоплений.

#### **1.4 Сравнительный анализ открытого и закрытого способов временного хранения угля**

Склады для временного хранения, не зависимо от типа, являются неотъемлемой частью грузового оборота угля, являясь «посредником» между поставщиком и потребителем. Так как рассматриваемые способы хранения принципиально разные, то необходимо провести оценку существующих преимуществ и недостатков этих вариантов.

Принципиальным преимуществом складов открытого типа является неограниченность в площади складской зоны виду отсутствия ограждающих конструкций. Однако, при размещении угля «под открытым небом» угольное сырьё подвергается воздействию внешних факторов природной среды (ветер, дождь, снег), которые могут привести к чрезмерному увлажнению, выветриванию, а также измельчению, что напрямую оказывает влияние на качество складированной продукции - снижается теплота сгорания, увеличивается зольность, понижается содержание углерода и водорода, повышается содержание кислорода. Помимо этого, разрушается органическое вещество угля, ухудшая его технологические

свойства. Высокое содержание кислорода увеличивает риск самовозгорания угольных штабелей, что представляет собой серьезную опасность, требующую постоянного контроля и принятия мер противопожарной безопасности.

Более того, под воздействием ветрового потока происходит срыв пыли с поверхности угольного штабеля, а также увеличивается вынос пыли при погрузо-разгрузочных операциях, что оказывает неблагоприятное влияние как на рабочих угольного склада, так и на экологическую обстановку прилегающей территории.

Очевидно, что при использовании закрытых угольных складов практически сокращается до пренебрежимо малых значений выброс пыли в окружающую среду, а вследствие отсутствия непосредственного контакта с атмосферным воздухом снижается негативное влияние метеорологических условий на качество угля [17].

Тем не менее, проблема пылеобразования с поверхности угольного штабеля и от погрузочно-разгрузочных операций остается неизменной, и даже может усугубиться ввиду скопления пыли в закрытом объеме склада, при достижении предельно-допустимых значений.

Еще одной задачей, требующей особого контроля, является выделение метана из угля и его накопление в воздушной среде закрытого склада. Количество поступающего метана определяется многими факторами, основным из которых следует считать величину метаноносности угля, зависящую от природной метаноносности, его физико-механических свойств и времени транспортировки угля до закрытого склада [14].

Поступление метана в атмосферу закрытого склада требует обязательной организации эффективной системы вентиляции для недопущения превышения концентрации метана более 1% по объему. Однако, вентиляция увеличивает интенсивность распространения угольной пыли из-за чего мелкие частицы пыли могут оставаться во взвешенном состоянии значительно дольше, создавая опасность взрыва метановоздушной смеси. В этой связи необходимо применение систем пылеулавливания с последующей очисткой воздуха перед его выбросом в атмосферу.

Закрытые угольные склады, несмотря на сложности, связанные с контролем выделения метана и пыли, обладают рядом преимуществ перед открытыми складами. Это и компактность, позволяющая экономить территорию, и полная механизация перегрузочных операций, повышающая производительность и безопасность труда. Помимо того, организованное дозирование угля перед его подачей в производство, исключает потери сырья при перегрузках и обеспечивая равномерное снабжение потребителей. Однако, экономия на строительстве и эксплуатации закрытого склада должна оправдываться инвестициями в сложные системы вентиляции и пылеподавления. Более того, необходимо проводить регулярный мониторинг концентрации метана и пыли в воздухе склада, чтобы своевременно предотвращать аварийные ситуации.

На основании вышеизложенных данных составлена блок-схема, иллюстрирующая основные преимущества и недостатки при выборе места временного хранения угольного сырья (рисунок 1.4.1).



Рисунок 1.4.1 - Преимущества и недостатки открытых и закрытых угольных складов [17]

Стоимость строительства и эксплуатации закрытых складов существенно выше, но в ряде случаев, данные затраты полностью окупаются за счет сохранения

качества угля и снижения экологических рисков. Выбор между открытым и закрытым хранением определяется экономическим обоснованием с учетом стоимости угля, требованиям к его качеству, климатическими условиями и регламентами промышленной и экологической безопасности.

### **1.5 Выводы по главе 1**

1. Возрастающий коммерческий интерес на российский уголь в странах мира приводит к необходимости в организации портовых терминалов для осуществления морских перевозок сырья.

2. Организация площадок для временного хранения угольного сырья является важным звеном в процессе реализации продукции потребителям, а также обеспечения непрерывной работы тепловых электростанций, коксохимических заводов и т.п.

3. Получившие наибольшее распространение на территории России склады открытого типа позволяют размещать уголь на практически неограниченной территории. Однако, при определённых условиях хранение угля на открытых складах не представляется возможным при выполнении требований нормативных документов в области промышленной и экологической безопасности. В таких случаях появляется необходимость в использовании закрытых складов угля, имеющих определённую специфику при эксплуатации.

4. Закрытые склады позволяют решить проблемы, связанные со снижением качества угольной продукции, а также минимизировать аэротехногенное воздействие на окружающую среду. Вместе с тем, возникает ряд вопросов, связанных с пылением от погрузо-разгрузочных операций и выделением метана в закрытое пространство угольного склада.

5. При размещении в закрытом складе углей с высокой метаноносностью возможно загазирование замкнутых объемов, которое может продолжаться длительное время в условиях слабо проветриваемых или непрветриваемых объемов. Нормативными документами предусмотрено предельно-допустимое значение концентрации метана 1% по объему.

6. Внедрение систем вентиляции для разбавления метановоздушных смесей будет способствовать интенсификации пыления с поверхности угольного штабеля и при погрузо-разгрузочных операциях, что может усугубить ситуацию и спровоцировать взрыв газопылевоздушной смеси.

## ГЛАВА 2 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИИ В НАСЫПНОМ ОБЪЕМЕ УГЛЯ

### 2.1 Структура и свойства насыпного объема угля

Складируемый в штабелях уголь представляет собой сыпучий материал (сыпучее тело), в рыхлонасыпанном состоянии (без уплотнения), состоящий из отдельных частиц (зерен), различных по форме и размеру. Любое сыпучее тело можно представить как эквивалентную (сплошную) среду (рисунок 2.1.1) или в качестве дискретной среды, состоящей из множества частиц [1].

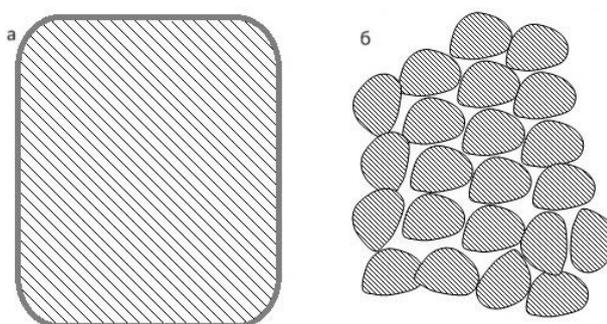


Рисунок 2.1.1 - Модели представления сыпучих тел. а – эквивалентная модель; б – дискретная модель

Согласно дискретной модели, сыпучее тело имеет удельное содержание твердой фазы (частицы, зерна) и удельное содержание воздушной фазы (межзерновые пустоты) в определенной пропорции. Изображение твердой и воздушной фазы сыпучего материала представлены на рисунке 2.1.2.

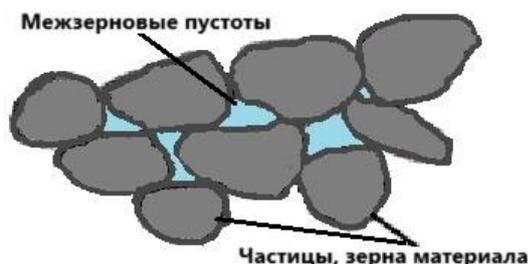


Рисунок 2.1.2 - Элементарный объем насыпного объема, состоящего из твердой и воздушной фазы

Твердая фаза сыпучего материала, помимо наиболее распространенной шарообразной формы, может быть представлена также в виде эллипсоида, цилиндра, пирамиды и др. [33,38].

Округлая форма характерна для таких материалов как песок или гравий, а угловатой форме соответствует, например, щебень, уголь. Основным фактором, влияющим на форму и размер частиц твердого материала, является способ его разрушения - раздавливание или свободный удар. Так, дробление свободным ударом позволяет получать материал более изометричной формы по сравнению с материалом, который получается при дроблении по способу раздавливания [25,33,98].

В зависимости от диаметра частиц сыпучие тела могут быть в различных состояниях, сводные данные приведены в таблице 2.1.1 [21].

Таблица 2.1.1 - Классификация сыпучих тел в зависимости от диаметра куска [21]

№ п/п	Диаметр куска, мм	Наименование
1	$< 0,05$	пылевидное
2	$0,5 \text{ мм} < d < 0,05$	порошкообразное
3	$2 \text{ мм} < d < 0,5$	мелкозернистое
4	$10 \text{ мм} < d < 2$	крупнозернистое
5	$d > 10$	кусковое

С учётом размеров и формы твёрдой фазы сыпучего материала промежутки между зёрнами, заполненные воздухом, могут иметь ромбоидальный, тетраэдрический, щелевидный и т.д. вид [21].

В качестве примера рассмотрим сыпучее тело, состоящее из частиц круглой формы одинакового размера. При данном способе укладки сыпучего материала воздушное пространство будет иметь ромбоидальную форму, так как каждая частица соприкасается с другими в шести точках, 4 из которых лежат в плоскости (рисунок 2.1.3 а). Данная схема укладки называется кубическая и является рыхлой.

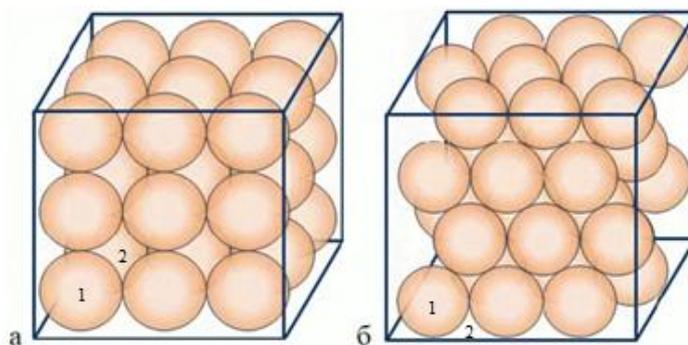


Рисунок 2.1.3 - Виды укладки сыпучего материала: а – кубическая, б – ромбическая. 1 – отдельная частица сыпучего материала; 2 – поровое пространство между соседними частицами

На рисунке 2.1.3. б приведен вариант плотной укладки сыпучего материала круглой формы, где воздушное пространство принимает форму тетраэдра, так как каждый шар расположен в вершине тетраэдра и касается 12 других. Такая форма укладки называется ромбической.

Одной из важнейших характеристик, отличающих сыпучие материалы от твердых, является подвижность частиц, позволяющая принимать насыпи любую геометрическую форму при наличии ограничивающих поверхностей (контейнер, колба), а также произвольные формы при свободной укладке (рисунок 2.1.4.).

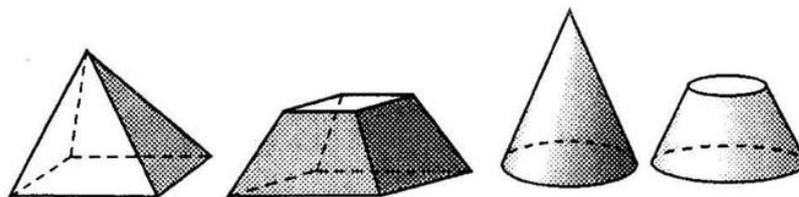


Рисунок 2.1.4 - Возможные геометрические формы насыпного объема при свободной укладке

Подвижность сыпучих тел, зависящая от сил трения и сцепления между отдельными частицами, характеризуется следующими параметрами:

- углом внутреннего трения (внутреннее динамическое равновесие между массой сыпучего материала и отдельными частицами, движущимися в контакте с этой массой вдоль поверхности раздела [45]). Данный параметр наиболее часто находится в пределах  $20 \div 60^\circ$  и уменьшается с увеличением содержания в породе мелких фракций и минералов, способствующих взаимному скольжению одной части породы относительно другой);

- углом естественного откоса (образуется плоскостью естественного откоса штабеля сыпучего материала и горизонтальной плоскостью и зависит от подвижности частиц: чем более подвижны частицы, тем меньше будет угол естественного откоса. Для скальных трещиноватых пород всех типов угол откоса будет 38-42°, для несвязных и глинистых пород – 20-38°);

- углом обрушивания (угол между горизонтальной плоскостью и массой сыпучего материала (не зерен в отдельности), скользящего под действием собственного веса по неподвижному сыпучему материалу. Для многих материалов угол обрушивания равен углу трения);

- углом скольжения (характеризует силы трения между зернами сыпучего материала и наклонной твердой поверхностью и зависит от характера поверхности, по которой ссыпается материал) [45].

Таким образом, при рассмотрении насыпного объема угля, размещаемого в штабелях, необходимо применять дискретную модель представления сыпучих материалов, включающую твердую фазу (частицы) и воздушную фазу (межкусковые пустоты). Так как все сыпучие тела обладают свойством подвижности частиц, их текстура, форма и размер будут определять геометрическую форму насыпного объема, зависящую, главным образом, от сил трения и сцепления между отдельными частицами.

## **2.2 Процессы диффузии и фильтрации в насыпном объёме угля**

Одним из наиболее распространенных сыпучих материалов, укладка которого производится в штабелях, является каменный уголь.

Угольные отдельности, слагающие штабель, представляют собой сложный пористый материал, состоящий преимущественно из углерода с небольшим содержанием водорода, серы, кислорода и азота. Само углеобразование (рисунок 2.2.1.) - разложение древнего растительного материала и его структурно-молекулярное преобразование - происходило несколько сотен миллионов лет под действием физических, химических, биологических, метеорологических и прочих факторов [14,18].



Рисунок 2.2.1 – Блок-схема перехода органического вещества в полезное ископаемое [14]

По завершении стадии гумификации растительного материала на этапе диагенеза (перехода торфа в бурый уголь) происходит формирование устойчивых минеральных образований, которые в процессе глубокой структурно-молекулярной модификации (метаморфизма) под действием температуры и давления (в результате горно-геологических и тектонических процессов) образуют уголь [14,18]. Результатом изменений внутримолекулярного строения в угольном веществе, его физических и химических свойств является постепенное увеличение процентного содержания углерода с одновременным уменьшением содержания водорода и кислорода. На этом же этапе образуются углеводородные газы, основным компонентом которых является метан.

В угольном пласте метан находится в сорбированном (связанном) состоянии и локализован в алифатических соединениях угольного вещества. Согласно литературным источникам, энергия связи молекулы метана с угольным веществом в твёрдом растворе определяется межмолекулярными силами Ван-дер-Вальса [4,86,95].

Накопление метана в угольном пласте происходит как на поверхности трещин и пор (открытых и закрытых) в виде сорбционной плёнки (адсорбция), так и в их объеме (свободный газ) (рисунок 2.2.2).

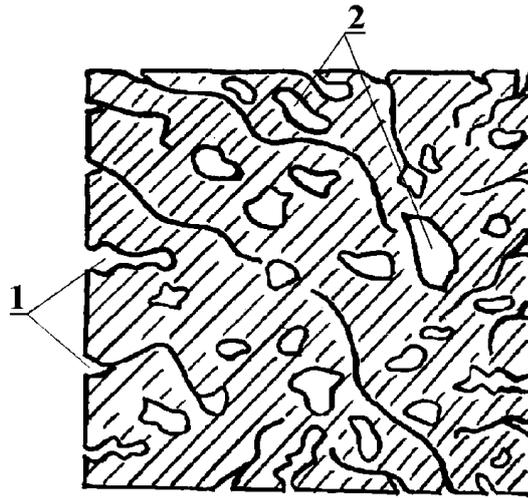


Рисунок 2.2.2 - Модель угольной отдельности. 1 – трещины и открытые поры; 2 – закрытые поры

Адсорбция представляет собой процесс прилипания молекул метана к поверхности угольных частиц, как на внутренних стенках микроскопических пор и трещин (открытых, то есть сообщающихся с окружающим пространством, и закрытых, изолированных), так и на поверхности самих частиц угля. Образующаяся при этом сорбционная плёнка может быть довольно толстой, особенно в порах меньшего размера, где силы межмолекулярного взаимодействия наиболее значительны [85,95,108].

Свободный газ, напротив, заполняет более крупные поры и трещины, находясь в газообразном состоянии под определенным давлением. Соотношение адсорбированного и свободного метана зависит от многих факторов, включая давление, температуру, свойства самого угля и геометрию порового пространства.

Находясь в нетронутом массиве, угольный пласт, представляющий собой флюидонасыщенную трещиновато-пористую среду, сохраняет равновесное состояние в системе «уголь-газ». Тогда, начальное условие для концентрации газа в сорбционных частицах угля будет определяться его природной метаноносностью  $X_0$  и начальным давлением газа, равным пластовому давлению  $P_0$  по следующей зависимости (2.2.1):

$$C = C_{cp} = X_0(P_0) \quad (2.2.1)$$

где  $C$  – концентрация метана в угольной отдельности, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{cp}$  – усредненная по объему концентрация метана, кг/м<sup>3</sup>.

При отторжении угольных кусков от массива и последующем образовании насыпных объёмов, давление в угольных отдельностях снижается и газ, высвобождаясь, поступает в новообразовавшееся свободное пространство (фильтрационный объём), межкусковое пространство (воздушный объём между угольными отдельностями) и к поверхности насыпного объёма (рисунок 2.2.3).



Рисунок 2.2.3 - Схема движения метана при отторжении угольных кусков

Известно, что эмиссия метана из угольного пласта определяется сочетанным действием процессов массопереноса - фильтрации и диффузии [4,28,85]. На начальном этапе дегазации массоперенос метана в угольной отдельности происходит преимущественно путем фильтрации - движение метана через транспортные каналы, трещины и открытые поры - под действием градиента давления. Скорость этого процесса определяется законом Дарси, где проницаемость угля – ключевой параметр, характеризующий его способность пропускать газ [87] (2.2.2):

$$U = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.2.2)$$

где  $k$  - коэффициент газопроницаемости,  $m^2$ ;

$\mu$  - вязкость газа,  $Pa \cdot s$ ;

$dP/dx$  - градиент давления.

Проницаемость, в свою очередь, зависит от таких факторов, как пористость угля, размер и геометрия пор, а также наличие и характер трещиноватости [3]. Более высокая пористость и наличие крупных, хорошо соединенных пор приводят

к значительно большей проницаемости и, следовательно, более быстрому выходу метана. Следует отметить, что проницаемость угля не является константой и может изменяться в зависимости от давления, влажности и температуры. Например, при высоких давлениях микротрещины могут закрываться, снижая проницаемость [95,110].

По мере снижения градиента давления, роль фильтрации уменьшается, и на первый план выходит диффузия - процесс переноса метана из областей с более высокой концентрацией (закрытые поры) в области с более низкой концентрацией (открытые поры и трещины). Этот процесс обусловлен хаотическим тепловым движением молекул метана и не требует наличия градиента давления.

В общем виде диффузионный перенос метана пропорционален изменению его концентрации, где коэффициентом пропорциональности является коэффициент диффузии. Тогда при отсутствии внешних воздействий поток массы описывается законом Фика (при условии сохранения закона сохранения массы) [84] следующим образом (2.2.3):

$$j = -D \cdot F \cdot \frac{dC}{dx} \quad (2.2.3)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$F$  - площадь сечения пористого тела,  $\text{м}^2$ ;

$dC/dx$  - изменения концентрации метана в направлении потока.

Знак минус указывает на направление потока метана в сторону уменьшения концентрации в порах и каналах.

Согласно исследованиям [2,3,31], скорость десорбции метана из фильтрационного объема (открытые поры и трещины) меньше скорости десорбции при диффузионном процессе на 2 порядка  $10^{-2}t_d$ .

В реальных условиях диффузия и фильтрация действуют одновременно, их относительный вклад изменяется во времени и пространстве. С другой стороны, дегазация угля осложняется множеством других факторов, таких как состав самого угля (содержание влаги, органических веществ, минеральных включений), геометрические особенности кусков угля и геометрические параметры

межкускового пространства, температура и влажность окружающего воздуха и др. Кроме того, наличие адсорбированного метана на поверхности пор угля также так же играет существенную роль, определяя скорость его высвобождения.

Помимо фильтрационных и диффузионных процессов внутри угольной отдельности происходит перенос метана с поверхности каждой угольной отдельности в воздушное межкусковое пространство. Физическим процессом здесь выступает диффузия, так как перенос метана осуществляется преимущественно за счет разности концентраций внутри угольной отдельности и воздушной прослойкой [2,95].

Дальнейший процесс эмиссии метана из насыпного объема угля представляется следующим образом. Метан, попадая в воздушную среду, окруженную угольными отдельностями, продолжает свой путь по воздушным прослойкам, стремясь выйти на поверхность угольного штабеля. Коэффициент диффузии метана в воздухе, представляющий собой среднее значение при идеальных условиях  $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  [22,28] соответствует скорости при отсутствии значительных препятствий и градиентов давления. На практике же, движение метана сильно затрудняется извилистостью и неравномерностью поровых каналов, из-за чего молекулы метана постоянно меняют направление движения, сталкиваясь со стенками пор и другими молекулами. Это явление называется "капиллярным эффектом" и существенно замедляет продвижение газа. Более того, сопротивление движению метана зависит не только от геометрии поровых каналов, но и от их размера. Очень узкие поры создают значительное сопротивление, вплоть до полного блокирования движения метана. Кроме того, наличие влаги в порах увеличивает вязкость среды и дополнительно снижает скорость диффузии [27,94].

Таким образом, коэффициент диффузии метана в воздушном объеме штабеля будет определяться как коэффициентом диффузии метана в угле, так и коэффициентом диффузии метана в воздухе, который связан с объемным содержанием воздушного пространства, окруженного угольными отдельностями.

### 2.3 Расчёт эквивалентной величины коэффициента диффузии метана из насыпного объёма угля

Как отмечалось выше, насыпной объём угля (отвал, бункер, вагон, штабель) представляет собой распределённые хаотическим образом угольные отдельности, разделённые воздухом, заполняющим пустоты между ними, образовавшиеся вследствие неправильной формы кусков угля.

Поступление метана в воздушную среду из насыпных объёмов зависит от двух механизмов массопереноса: первый - заполнение воздушных пустот между кусками угля (угольными отдельностями), 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 суммарного диффузионного потока примем ряд допущений. Структуру насыпного объёма можно представить в виде угольных отдельностей, имеющих кубическую форму, и воздушных прослоек, заполняющих свободное пространство между угольными отдельностями (рисунок 2.3.1). Данное допущение позволяет получить математически простые зависимости для вычисления эквивалентного коэффициента диффузии метана, наряду с другими геометрическими формами частиц (сферической и пирамидальной), по результатам которых наибольшее различие данных не превышает 15 % в сравнении с кубической формой представления частиц.

Обозначим через  $x$  ребро угольной отдельности кубической формы, а через  $y$  – ширину воздушной прослойки, заполняющей свободное пространство.

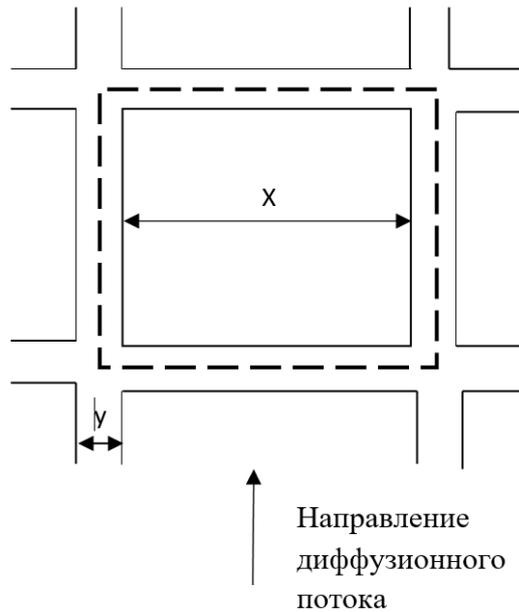


Рисунок 2.3.1 - Расчётная схема к вычислению суммарного диффузионного потока (предполагается, что угольные отдельности имеют кубическую форму и одинаково ориентированы). Диффузионный поток перпендикулярен грани угольной отдельности

Предположим, что  $x$  и  $y$  в совокупности образуют ребро куба, состоящего из угольных отдельностей кубической формы, погруженных в воздушную прослойку, и описываются зависимостью (2.3.1):

$$x + y = 1 \quad (2.3.1)$$

При этом толщина воздушной прослойки  $y/2$ .

Объем угольной отдельности равен  $x^3$ , а суммарный объем угольной отдельности и воздушной прослойки  $(x+y)^3$ . При этом объем воздушной прослойки вычисляется следующим образом (2.3.2):

$$v_{\text{возд}} = (x + y)^3 - x^3 \quad (2.3.2)$$

Тогда, формула для вычисления объёмного содержания угольных отдельностей в рассматриваемом кубе (2.3.3):

$$v_{\text{уг}} = \frac{x^3}{(x + y)^3} \quad (2.3.3)$$

Следовательно, объемное содержание пространства, заполненного воздухом можно представить как (2.3.4.):

$$v_{\text{возд}} = 1 - v_{\text{уг}} \quad (2.3.4)$$

Диффузия метана в объёме гетерогенного куба осуществляется по двум путям:

1) Через воздушные прослойки по поверхности  $(x+y)^2 - x^2$ . В этом случае коэффициент диффузии  $D_{\text{возд}}$ .

2) Через воздушные прослойки и угольную отдельность, имеющую относительную толщину  $x/(x+y)$ , по поверхности  $x^2$ .

В этом случае эквивалентный коэффициент диффузии  $D_{\text{экв}}'$  по аналогии с коэффициентом теплопроводности [52] определяется следующим выражением (2.3.5):

$$D_{\text{ЭКВ}}' = \frac{x + y}{\frac{x}{D_{\text{эфф}}} + \frac{y}{D_{\text{возд}}}} \quad (2.3.5)$$

Полный диффузионный поток равен сумме указанных двух потоков. При перепаде концентраций метана ( $\Delta C$ ) на верхней и нижней границах гетерогенного куба, составляющей  $1 \text{ кг/м}^3$ , диффузионный поток  $J$  может быть рассчитан по следующей формуле (2.3.6):

$$J = \frac{D_{\text{ЭКВ}}}{x + y} = [(x + y)^2 - x^2] \cdot \frac{D_{\text{возд}}}{x + y} + x^2 \cdot D_{\text{ЭКВ}}' \quad (2.3.6)$$

где  $D_{\text{ЭКВ}}$  – суммарный эквивалентный коэффициент диффузии метана через гетерогенный куб, включающий воздушные прослойки и угольные отдельности  $\text{м}^2/\text{с}$ .

После математических преобразований получим формулу для вычисления эквивалентного коэффициента диффузии метана (2.3.7):

$$D_{\text{ЭКВ}} = y \cdot \frac{2x + y}{x + y} \cdot D_{\text{возд}} + \frac{x^2}{\frac{x}{D_{\text{эфф}}} + \frac{y}{D_{\text{возд}}}} \quad (2.3.7)$$

С учетом формулы 2.3.1. выражение 2.3.7. примет следующий вид (2.3.8):

$$\frac{D_{\text{ЭКВ}}}{D_{\text{возд}}} = y \cdot (1 + x) + \frac{x^2}{\frac{x}{D_{\text{эфф}}} + \frac{y}{D_{\text{возд}}}} \quad (2.3.8)$$

Подставив в формулу 2.3.8 выражения из формул 2.3.3 и 2.3.4 получим (2.3.9):

$$\frac{D_{\text{ЭКВ}}}{D_{\text{ВОЗД}}} = 1 - v_{\text{ВОЗД}}^{2/3} + \frac{v_{\text{ВОЗД}}^{2/3}}{\sqrt[3]{v_{\text{УГ}}} \cdot \frac{D_{\text{ВОЗД}}}{D_{\text{ЭФФ}}} + 1 - \sqrt[3]{v_{\text{УГ}}}} \quad (2.3.9)$$

Тогда вычисление эквивалентного коэффициента диффузии метана может быть согласно следующему выражению (2.3.10):

$$D_{\text{ЭКВ}} = D_{\text{ВОЗД}} \cdot \left[ 1 + v_{\text{УГ}} \frac{\left(1 - \frac{D_{\text{ВОЗД}}}{D_{\text{ЭФФ}}}\right)}{1 - \sqrt[3]{v_{\text{УГ}}} \cdot \left(1 - \frac{D_{\text{ВОЗД}}}{D_{\text{ЭФФ}}}\right)} \right] \quad (2.3.10)$$

Как отмечалось выше, формула 2.3.10 получена в предположении, что угольные отдельности «погружены» в воздушную среду. Однако, вследствие хаотичной структуры насыпного объёма, с той же вероятностью можно считать, что, наоборот, воздушные промежутки отделены друг от друга угольными отдельностями. В этом случае, соотношение 2.3.10 может быть представлено в виде (2.3.11):

$$D'_{\text{ЭКВ}} = D_{\text{ЭФФ}} \cdot \left[ 1 + v_{\text{ВОЗД}} \frac{\left(1 - \frac{D_{\text{ЭФФ}}}{D_{\text{ВОЗД}}}\right)}{1 - \sqrt[3]{v_{\text{ВОЗД}}} \cdot \left(1 - \frac{D_{\text{ЭФФ}}}{D_{\text{ВОЗД}}}\right)} \right] \quad (2.3.11)$$

Усредненное значение эквивалентного коэффициента диффузии предлагается вычислять как среднегеометрическое значение коэффициентов диффузии  $D_{\text{ЭКВ}}$  и  $D'_{\text{ЭКВ}}$  (2.3.12):

$$\bar{D}_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{D_{\text{ЭКВ}} \cdot D'_{\text{ЭКВ}}} \quad (2.3.12)$$

В том случае, если  $D_{\text{УГ}} \ll D_{\text{ВОЗД}}$  то можно считать, что  $\frac{D_{\text{ВОЗД}}}{D_{\text{ЭФФ}}} \rightarrow \infty$ , тогда формула 2.3.10 примет следующий вид (2.3.13):

$$\frac{D_{\text{ЭКВ}}}{D_{\text{ВОЗД}}} = 1 - v_{\text{УГ}}^{2/3} \quad (2.3.13)$$

При этом  $\frac{D_{\text{УГ}}}{D_{\text{ВОЗД}}} \rightarrow 0$  и формула 2.3.11 приводится в следующий вид (2.3.14):

$$\frac{D'_{\text{ЭКВ}}}{D_{\text{ЭФФ}}} = 1 + \frac{v_{\text{ВОЗД}}}{1 + \sqrt[3]{v_{\text{ВОЗД}}}} \quad (2.3.14)$$

С учетом формул 2.3.13 и 2.3.14 среднее значение эквивалентного коэффициента диффузии может быть вычислено по следующей формуле (2.3.15):

$$\bar{D}_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{D_{\text{ВОЗД}} \cdot D_{\text{ЭФФ}} \cdot (1 - \sqrt[3]{v_{\text{ВОЗД}}}) \cdot \left(1 + \frac{v_{\text{ВОЗД}}}{1 + \sqrt[3]{v_{\text{ВОЗД}}}}\right)} \quad (2.3.15)$$

Преобразовав формулу 2.3.15 с учетом зависимости 2.3.4. получим (2.3.16):

$$\bar{D}_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{D_{\text{ВОЗД}} \cdot D_{\text{ЭФФ}} \cdot (1 - \sqrt[3]{v_{\text{УГ}}}) \cdot \left(1 + \frac{v_{\text{УГ}}}{1 + \sqrt[3]{v_{\text{УГ}}}}\right)} \quad (2.3.16)$$

На основании относительной величины  $\bar{D}_{\text{ЭКВ}}/\sqrt{D_{\text{ВОЗД}} \cdot D_{\text{ЭФФ}}}$  можно судить о характере изменения эквивалентного коэффициента диффузии в зависимости от объемного содержания угольных отдельностей в насыпном объеме (2.3.17):

$$\frac{\bar{D}_{\text{ЭКВ}}}{\sqrt{D_{\text{ВОЗД}} \cdot D_{\text{ЭФФ}}}} = \sqrt{(1 - \sqrt[3]{v_{\text{УГ}}}) \cdot \left(1 + \frac{1 - v_{\text{УГ}}}{1 + \sqrt[3]{1 - v_{\text{УГ}}}}\right)} \quad (2.3.17)$$

Построенный по расчетам график изменения относительной величины  $\bar{D}_{\text{ЭКВ}}/\sqrt{D_{\text{ВОЗД}} \cdot D_{\text{ЭФФ}}}$  от объемного содержания угольных отдельностей приведен на рисунке 2.3.2.

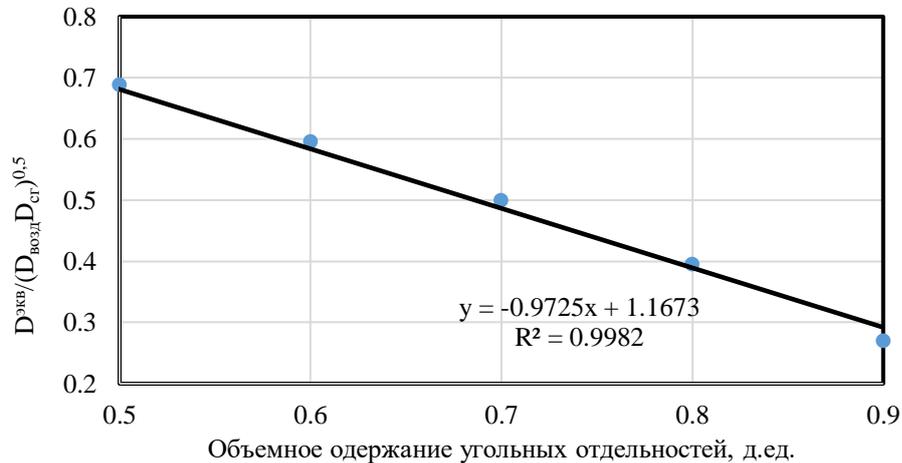


Рисунок 2.3.2 - График зависимости относительной величины  $\bar{D}_{\text{ЭКВ}}/\sqrt{D_{\text{ВОЗД}} \cdot D_{\text{ЭФФ}}}$  от объемного содержания угольных отдельностей

В общем виде изменение усредненного эквивалентного коэффициента диффузии в зависимости от объемного содержания угольных отдельностей в насыпном объеме можно представить следующим образом (2.3.18):

$$\frac{\bar{D}_{\text{ЭКВ}}}{\sqrt{D_{\text{возд}} \cdot D_{\text{эфф}}}} = -0,97 \cdot v_{\text{уг}} + 1,17 \quad (2.3.18)$$

#### **2.4 Связь параметров массопереноса с эмиссией метана из угля. Энергия активации диффузионного процесса. Эффективный коэффициент диффузии**

Кинетика выделения метана из угольного пласта и участие его в газодинамических явлениях зависят от множества природных и техногенных факторов: количества газа в пласте, количественного распределения его между различными фазовыми состояниями, пористости (открытой и закрытой), скорости разгрузки горного массива, газопроницаемости пласта и пр. Однако, ключевым аспектом кинетики выделения метана является механизм массопереноса угольного вещества [93,94].

Согласно литературным данным [13,27,86], основными параметрами массопереноса в системе «уголь-метан» являются эффективный коэффициент диффузии  $D_{\text{эфф}}$  и энергия активации диффузионного процесса  $E$ .

Коэффициент диффузии, с физической точки зрения, является количественной характеристикой, определяющей скорость диффузии молекул метана при наличии градиента концентрации, в то время как энергия активации представляет собой минимальную энергию, которую должна иметь молекула метана, чтобы преодолеть энергетический барьер, связанный с межмолекулярными взаимодействиями в угольной матрице. Этот барьер определяется геометрией пор, присутствием функциональных групп на поверхности угля (например, гидроксильных или карбоксильных групп), а также силами Ван-дер-Ваальса между молекулами метана и углеродным скелетом [70,108].

Термин "энергия активации" был введён шведским химиком Сванте Августом Аррениусом в конце 19 века. Он вывел уравнение, которое связывает скорость протекания реакции с температурой и энергией активации, известное как уравнение Аррениуса. Это уравнение показывает, что скорость реакции увеличивается экспоненциально с ростом температуры, что отражает зависимость между температурой и кинетической энергией молекул (2.4.1):

$$E = -R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{k_p}{A}\right) \quad (2.4.1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

$T$  – температура, К;

$k_p$  – константа скорости реакции;

$A$  – предэкспоненциальный множитель (фактор частоты) для реакции.

В контексте адсорбции и диффузии в пористых материалах, таких как каменный уголь, энергия активации играет ключевую роль, позволяя судить о структуре и свойствах материала на микроуровне. Известно, что уголь представляет собой трещиновато-пористую среду, в которой размеры пор и трещин находятся в широком диапазоне от соизмеримых с размером молекул метана (4,14 Å) до нескольких миллиметров (рисунок 2.4.1) [64].

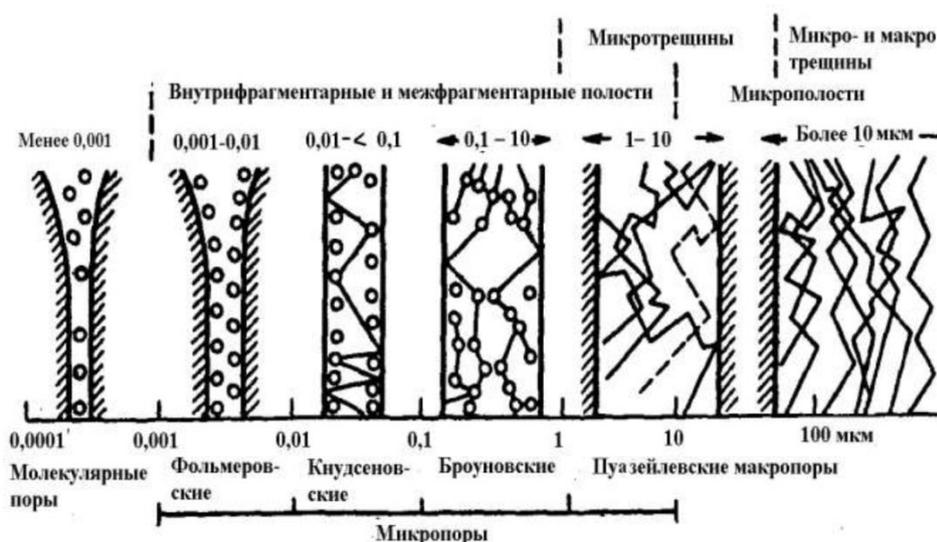


Рисунок 2.4.1 - Поры и трещины в угле [64]

Пористость угля, как открытая, так и закрытая, играет важную роль в процессе массопереноса метана. Открытая пористость обеспечивает доступ газа к поверхности, тогда как закрытая пористость может удерживать метан, затрудняя его извлечение [57,96].

Степень метаморфизма угля существенно влияет на его пористость: бурые угли, находящиеся на ранних стадиях метаморфизма, характеризуются относительно низкой пористостью и, как следствие, меньшим содержанием метана. По мере увеличения степени метаморфизма, уголь претерпевает изменения своей

структуры: увеличивается степень графитизации, происходит уменьшение количества функциональных групп, изменяется форма и размер пор. Хотя общая пористость антрацитов (угли высокой степени метаморфизма) может быть выше, чем у бурых углей, их сорбционная емкость по метану может быть ниже из-за меньшей активности поверхности. Это обусловлено тем, что графитизированная структура антрацита имеет менее развитую поверхность и меньшее количество активных центров для адсорбции [57].

Наличие сужений в микропорах угля (входного отверстия), диаметр которых может составлять порядка 0,5 нм, создаёт значительные энергетические барьеры для диффузии молекул. Так, например, высокие значения энергии активации в каменном угле средней степени метаморфизма свидетельствуют о большом количестве таких сужений и малых отверстий в микропорах [94]. Другими словами, значение энергии активации характеризует активность диффузии: большее значение энергии активации указывает на более медленную диффузию, требующую большего количества энергии для преодоления энергетического барьера.

В зависимости от размера пор выделяют несколько видов диффузии. Так, например, свободная диффузия  $D_{св}$  происходит при ширине диаметра угольной поры, большей, чем длина свободного пробега молекулы газа. При этом коэффициент диффузии изменяется от  $10^{-11}$  до  $10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. А кнудсеновская или молекулярная диффузия  $D_k$  имеет место при ширине (диаметре) поры (метана) меньшей свободного пробега молекулы. Значение  $D_k$  всегда на порядок ниже, чем  $D_{св}$ , т.е. оно изменяется в пределах от  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Диффузия метана в твердом теле протекает в порах малого диаметра, в которых адсорбционные поля накладываются друг на друга. Для метана, диффундирующего из закрытых пор, значения коэффициента твердотельной диффузии  $D_{тв}$  находятся в пределах от  $10^{-11}$  до  $10^{-16}$  м<sup>2</sup>/с.

Для комплексной оценки всех видов диффузии в угле необходимо ввести так называемый эффективный коэффициент диффузии, который будет учитывать сложную геометрию порового пространства угля, включая извилистость пор, их

размеры и связность, а также проницаемость угля, которые, в свою очередь, определяются степенью метаморфизма угля, его текстурой и тектоническими напряжениями. При этом эффективный коэффициент диффузии метана существенно ниже молекулярного коэффициента диффузии метана в свободном пространстве, поскольку движение молекул метана ограничено порами и извилистыми каналами в угольной матрице [5].

Так как диффузионный процесс во многом определяется наличием и объемом закрытых пор, то формулу для вычисления эффективного коэффициента диффузии метана в угле [46,70,72] можно представить в следующем виде (2.4.2):

$$D_{\text{эфф}} = \frac{D_{\text{ТВ}}}{1 - \gamma + \frac{\gamma}{\nu}} \quad (2.4.2)$$

где  $\gamma$  - закрытая пористость;

$\nu$  - растворимость метана в угле, доли ед.

С другой стороны, скорость термоактивированного процесса (диффузии молекул) внутри пористого тела будет связана с энергией активации согласно следующему уравнению (2.4.3) [43,78,96]:

$$D_{\text{эфф}} = D_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (2.4.3)$$

где  $D_0$  - предэкспоненциальный множитель, величина которого зависит от свойств, как поглощаемого вещества (газа), так и поглотителя (угля).

Данный эффективный коэффициент диффузии характеризует массоперенос метана в угольных отдельностях и может быть определен экспериментально. Наиболее распространённые методы определения параметров массопереноса – это газохроматографический анализ, измерения сорбции и десорбции газов, а также методы ядерно-магнитного резонанса и термогравиметрический метод [13].

## 2.5 Выводы по главе 2

1. Складируемый в штабелях уголь представляет собой сыпучий материал, в рыхлонасыпанном состоянии (без уплотнения), состоящий из отдельных частиц, различных по форме и размеру, окруженных воздушными прослойками.

2. Накопление метана в угле происходит в процессе углефикации, сопровождающийся постепенным увеличением процентного содержания углерода с одновременным уменьшением содержания водорода и кислорода, а также образованием углеводородных газов, основным компонентом которых является метан.

3. Предполагается, что метан в угле находится в открытых и закрытых порах в свободном состоянии под давлением, адсорбирован на поверхностях пор и трещин и абсорбирован в угольной матрице. Количество сорбированного метана зависит от физико-химических свойств угля, параметров залегания пласта и степени метаморфизма угля.

4. При отторжении угля от массива (при смещении равновесия в системе «уголь-газ») запускается процесс десорбции метана из угля, происходящий одновременно диффузионным путем (из закрытых пор) и путем фильтрации (из открытых пор).

5. Предполагается, что поступление метана из насыпного объема угля в воздушную среду зависит от двух механизмов массопереноса: первый - заполнение воздушных пустот между кусками угля (угольными отдельностями), который определяется эффективным коэффициентом диффузии; второй - движение метана по связанным между собой воздушным пустотам, описываемым коэффициентом диффузии метана в воздухе.

6. Кинетика выделения метана из угольного пласта может быть оценена на основе таких параметров как энергия активации диффузионного процесса и эффективный коэффициент диффузии, определение которых необходимо проводить экспериментально.

## **ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАЗРУШЕННОГО УГЛЯ С ВОЗДУШНОЙ СРЕДОЙ**

### **3.1 Основные положения методики экспериментальных исследований**

Технические возможности и развитие современной теории массопереноса в пористых средах являются методической базой для применения метода термогравиметрического анализа при изучении диффузионных параметров системы «уголь-метан».

Несмотря на широкое применение термогравиметрического метода анализа (ТГА) в материаловедении, химии и других областях, его использование для изучения сорбционных процессов в системах «уголь-флюид» до недавнего времени было ограничено.

Традиционно исследователи делали акцент на объемный метод, основанный на измерении изменения объема газа при сорбции-десорбции [104,109]. Это объяснялось, прежде всего, отсутствием широкодоступных автоматизированных систем ТГА, способных обеспечивать длительные, высокоточные измерения при точном поддержании температуры в течение всего экспериментального цикла.

Несмотря на простоту реализации объемного метода, он имеет существенные недостатки: он чувствителен к утечкам, требует сложной калибровки и не всегда позволяет точно контролировать давление газа в системе, что особенно критично при исследовании сорбции в пористых материалах с различной структурой пор.

Современное развитие технологий, включая появление высокочувствительных термовесов с автоматизированным управлением, а также значительный прогресс в понимании массопереноса в пористых средах с иерархической пористостью, кардинально изменили ситуацию.

Применение ТГА для изучения сорбционных характеристик угольных образцов стало не только возможным, но и предпочтительным методом в силу его преимуществ. ТГА позволяет проводить измерения с высокой точностью и воспроизводимостью, исключая влияние утечек газа и обеспечивая контроль над

массой образца с точностью до микрограммов. Это особенно важно при исследовании низкотемпературной сорбции метана, где изменения массы образца могут быть незначительными.

Метод ТГА основан на непрерывном взвешивании образца при изменении температуры. Существует два основных режима работы: изотермический и динамический [12,13].

В изотермическом режиме температура поддерживается постоянной, что позволяет изучать кинетику сорбции при определенной температуре.

Динамический режим, напротив, подразумевает изменение температуры с определенной скоростью (например, 10 °С/мин), что позволяет получить информацию о термостабильности образца и о процессах, протекающих в различных температурных диапазонах.

В результате эксперимента получают термогравиметрическую кривую (TG-кривая), которая представляет собой зависимость массы образца от температуры или времени.

Дифференциальная термогравиметрическая кривая (DTG-кривая) отображает скорость изменения массы образца в зависимости от температуры, что позволяет более точно определить температурные интервалы, соответствующие определенным процессам, например, десорбции метана из пор угля различных размеров.

Применение ТГА к системе "уголь-метан" требует усовершенствованной методики, учитывающей особенности структуры угля, так как уголь – это высокопористый материал со сложной иерархической структурой пор, включающей микропоры, мезопоры и макропоры.

Для обработки данных ТГА применяют математические модели, описывающие кинетику сорбции-десорбции в пористых средах, например, модели по Фрейндлиху, Лэнгмюру или модели, учитывающие диффузионные ограничения. Выбор конкретной модели зависит от особенностей структуры угля и условий проведения эксперимента [12,103,105].

Анализ данных ТГА даёт возможность построить изотермы сорбции, кинетические параметры процесса сорбции (коэффициенты диффузии, константы скорости), а также оценить вместимость угля по метану при различных температурах и давлениях.

Более того, ТГА позволяет изучить влияние различных факторов на сорбционные свойства угля, таких как размер частиц, пористость, содержание золы и др.

В данной работе экспериментальные исследования процессов массообмена проводилось на весах-влажномерах МОС-120Н при постоянной температуре среды. Методика экспериментальных исследований массообмена термогравиметрическим методом включает:

1. Подготовку образцов (навесок) угля к проведению эксперимента:
  - 1.1. Механическая подготовка навески.
  - 1.2. Сушка навесок угля в сушильной камере.
  - 1.3. Насыщение навесок угля метаном.
2. Экспериментальное исследование процесса десорбции метана из угля термогравиметрическим методом.
3. Методика обработки экспериментальных данных. Вычисление эффективного коэффициента диффузии и энергии активации диффузионного процесса.
4. Обсуждение результатов экспериментального исследования параметров массопереноса.

### **3.2 Подготовка навесок угля к проведению эксперимента**

Экспериментальные исследования десорбции метана из каменных углей проводились на образцах углей Кузнецкого угольного бассейна марок Г и Ж. Эти угли представляют интерес для изучения, поскольку их природная газоносность более  $15 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Для проведения экспериментальных исследований были отобраны бороздковым методом 8 образцов угля, отличных друг от друга по физико-химическим свойствам и местам залегания (таблица 3.2.1).

Таблица 3.2.1 – Физико-химические свойства исследуемых углей

№ п/п	Месторождение	Марка угля	Объем пор, см <sup>3</sup> /г	Радиус микропор, Å	Влажность, %
1	Осинниковское	Г	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
7	Ж		0,011	13,972	3,2
8	Ж		0,010	13,196	3,3

Определение внешней влаги проводилось по стандарту ГОСТ 11014-2001 «Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы» [19], а радиус микропор и объем пор получены с помощью низкотемпературной сорбции азота. Отчет о результатах исследований приведен в приложении А на примере навески с углем № 1.

По многочисленным научным исследованиям трещиновато-пористая структура угля на микроуровне, которая отвечает за сорбционные свойства, сохраняется при дроблении куска до размера 0,2 мм [95]. В этой связи, для повышения эффективности и снижения времени насыщения угля метаном образцы были измельчены до фракций 2-3 мм (рисунок 3.2.1).

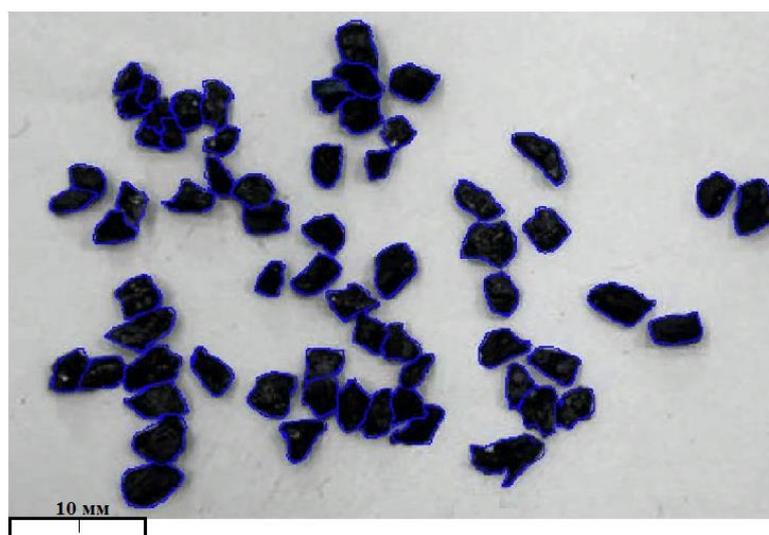


Рисунок 3.2.1 - Подготовленные к экспериментальным исследованиям угольные навески

Измельчение проводилось в керамической ступке с помощью пестика вручную, а разделение по фракциям - с помощью набора калиброванных сит.

Предварительно дегазированные навески с углем высушивались при температуре 105 °С в сушильной камере для удаления влаги из навесок. Таким образом, предполагается, что изменение в массе навески после ее насыщения метаном будет происходить за счет выхода газа [79,80].

После удаления из навесок газовой составляющей и влаги, уголь охлаждался до комнатной температуры в эксикаторе, а затем загружался в насытительную капсулу высокого давления, подключенную к манометру для контроля давления внутри капсулы (рисунок 3.2.2), и производилось вакуумирование с целью недопущения увлажнения просушенного образца, находящегося в капсуле, влагой из атмосферного воздуха.



Рисунок 3.2.2 - Капсула высокого давления с манометром

Насыщение угля, находящегося в капсуле, метаном производилось под давлением 65-70 атм. Поступление метана осуществлялось из газового баллона под контролем давления с помощью манометров на редукторе. Схематическое изображение установки для насыщения угольных навесок метаном приведено на рисунке 3.2.3.

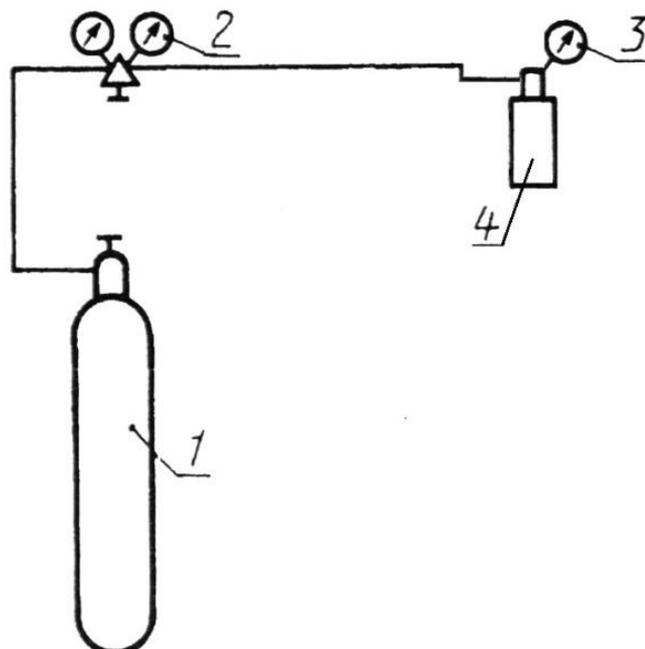


Рисунок 3.2.3 - Схематическое изображение установки для насыщения угольных навесок метаном. 1- газовый баллон с метаном; 2- газовый редуктор; 3 – манометр; 4 – капсула высокого давления [13]

После завершения процесса насыщения, капсула вскрывалась, и уголь высыпался на чашку весов-влажномеров. Важно отметить, что измерения десорбции метана проводились в кратчайшие сроки после вскрытия капсулы, поскольку метан из открытых пор угля начинает эмиссировать в течение первых секунд после сброса давления. Это подчеркивает необходимость быстроты действий после разгерметизации насытительной капсулы, чтобы получить наиболее точные данные о десорбции.

### 3.3 Экспериментальное исследование процесса десорбции метана из угля термогравиметрическим методом

Анализ эмиссии метана из угля проводился для различных температурных режимов с помощью электронных весов непрерывного взвешивания (термовесов) (рисунок 3.3.1), включающих печь, в которую помещают образец, датчиков, регистрирующих температуру (термопары) и программного регулятора температуры [13, 61,77].



Рисунок 3.3.1 - Весы – влагомеры МОС-120

Навеска угля размещалась на специальной платформе с системой автоматического уравнивания, которая производит замер массы остатка навески и рассчитывает относительное изменение массы навески (в %) при заданной постоянной температуре. На цифровом табло весов-влагомеров отображаются показания изменения массы во времени. Абсолютная погрешность прибора  $\pm 0,02$  г при  $10 < m < 120$  г. Минимально возможная поддерживаемая температура  $+30$  °С, максимальная –  $+200$  °С. Максимальное время работы весов - 12 часов.

Необходимо отметить, что при начальном прогреве весов до выхода на заданное значение температуры измерений в течение 1-2 мин наблюдалось фиктивное снижение массы навески. В то же время, при чрезмерно длительном времени проведения эксперимента может наблюдаться увеличение массы навески из-за не герметичности конструкции весов, что приводит к окислению угля (соединение кислорода из атмосферы с угольными отдельностями).

Данные особенности экспериментального исследования были учтены при анализе результатов. Перед основным измерением снимаются так называемые кривые коррекции с дегазированных навесок угля, с помощью которых возможно учесть особенности угля по сорбции влаги из воздуха.

Экспериментальные исследования проводились для 8 угольных навесок при температурах от  $+30$  °С до  $+70$  °С в течение 5-7 часов. Время десорбции во многом зависит от установленной температуры внутри весов: чем выше температура, тем быстрее будет протекать процесс эмиссии метана из угольных отдельностей.

Как отмечалось ранее, уравнение 2.4.3, описывающее кинетику десорбции, содержит 2 исследуемых параметра одновременно –  $D_{эфф}$  и  $E$ , что обуславливает необходимость в применении многопараметрического подхода. В этой связи термогравиметрические измерения следует проводить как минимум для двух температурных режимов [13,70], так как каждый температурный режим даст свою кривую зависимости потери массы от температуры. Анализ этих кривых позволит получить систему уравнений, где неизвестными будут  $D$  и  $E$ .

В таблице 3.3.1 приведены данные по угольным навескам и температурным режимам экспериментальных исследований.

Таблица 3.3.1 - Температурные условия проведения эксперимента

№ навески	Диаметр угольных частиц, мм	Марка угля	Температура, °С
1	2-3	Г	30
			40
			50
			60
2		Г	50
			60
			70
3		Г	50
	60		
	70		
4	Ж	50	
		60	
		70	
5	Ж	50	
		60	
		70	
6	Ж	40	
		50	
		60	
7	Ж	40	
		50	
		60	
8	Ж	40	
		50	
		60	

### 3.4 Методика обработки экспериментальных данных. Вычисление эффективного коэффициента диффузии и энергии активации

Методика обработки экспериментальных данных предполагает статистическую обработку, графическое представление и аппроксимацию.

В качестве примера рассмотрим экспериментальные данные для навески № 1 при заданной в печи температуре +30 °С и общей продолжительности эксперимента 421 мин. Начальная и конечная масса угля 112,62 г и 111,645 г соответственно.

Результаты измерений изменения массы угля при десорбции метана за промежутки времени  $\Delta\tau_i$ , полученные в % переводились в массовые единицы измерения (г), а время замера - в секунды. Общая масса десорбированного метана  $\Delta M_{\text{CH}_4}$  устанавливалась как разность между начальной  $M_{\text{уг}}^0$  и конечной массами угля  $M_{\text{уг}}^\tau$ , согласно следующей формулы (3.4.1):

$$\Delta M_{\text{CH}_4} = M_{\text{уг}}^0 - M_{\text{уг}}^\tau \quad (3.4.1)$$

Масса метана, десорбированного за конкретный промежуток времени  $\Delta\tau_i$ , определялась по следующей формуле (3.4.2):

$$M_{\text{CH}_4}^{\Delta\tau_i} = M_{\text{CH}_4}^{\tau_i} - M_{\text{CH}_4}^{\tau_{i+1}} \quad (3.4.2)$$

По полученным данным строился график зависимости  $M_{\text{CH}_4}^{\Delta\tau_i}$  от  $\tau$  (рисунок 3.4.1).

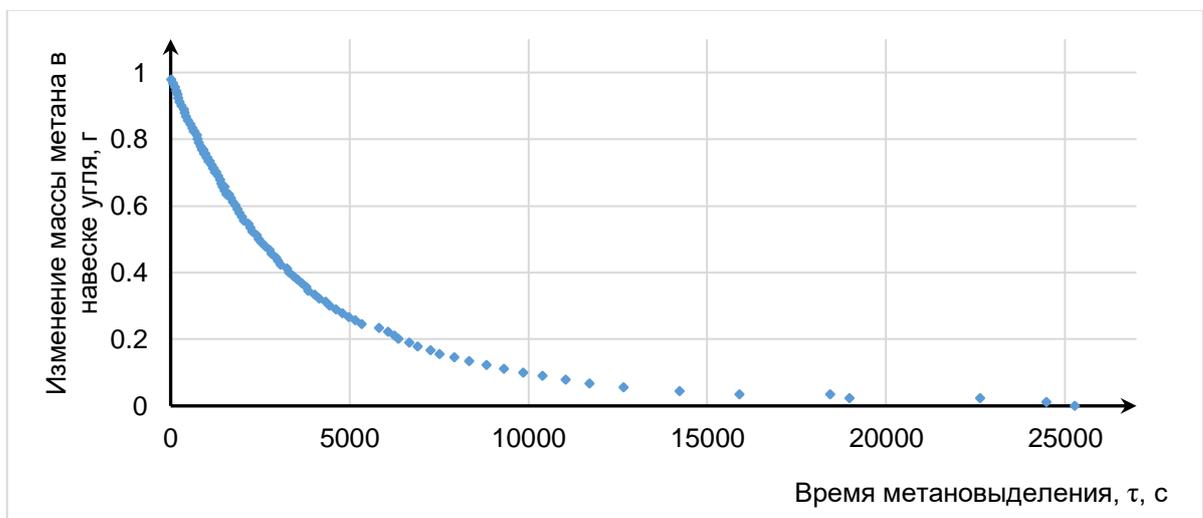


Рисунок 3.4.1 - График зависимости изменения массы метана в навеске со временем на примере навески углей № 1 при температуре + 30 °С

Полученная кривая достаточно четко аппроксимируется стандартной экспоненциальной зависимостью (3.4.3):

$$M = a \cdot e^{-b\tau} \quad (3.4.3)$$

Выбор типа аппроксимационной зависимости определялся максимальным соответствием экспериментальной кривой дегазации, так называемому регулярному режиму, который характерен для диффузионного числа Фурье, превосходящего 0,05. Более точная аппроксимация требует подобрать уравнение кривой таким образом, чтобы величина среднеквадратичного отклонения  $\sigma^2$  была близка к 1.

Для упрощения и удобства визуализации представляется возможным линеаризовать экспоненциальную кривую, построив график в полулогарифмических координатах, где по оси ординат – изменение массы метана в навеске, а по оси абсцисс – время метановыделения (рисунок 3.4.2).

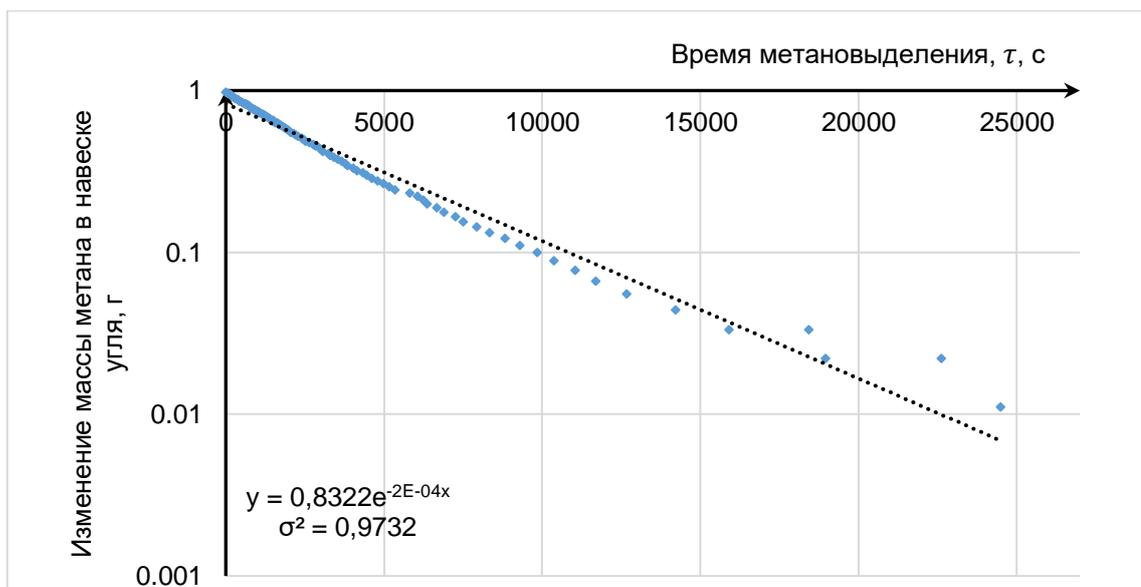


Рисунок 3.4.2 - График зависимости выхода метана во времени в полулогарифмических координатах на примере навески углей №1 при температуре + 30 °С

Практически на всем протяжении график представляет собой прямую линию, за исключением начального и конечного участка. Поэтому необходимо разбить кривую на две или более составляющие, так как наблюдается изменение значений тангенса угла наклона кривой на определенных временных этапах. Это связано, в первую очередь, с процессами массопереноса метана в угольных

отдельностях (фильтрации и диффузии). Поэтому, можно выделить как минимум 2 этапа: начальный этап, который соответствует процессу фильтрации (более быстрый перенос метана по открытым порам и трещинам) и второй этап – диффузионный перенос метана (из закрытых пор и твердого раствора). Завершающая стадия характеризуется изменением наклона кривой, вызванным снижением потока метана из поровой структуры и включением процесса подкачки влаги из воздуха при длительном процессе измерений. Данные значения не следует принимать к расчету, так как это может повлиять на конечный результат.

Кривая, представленная на рисунке 3.4.2, была разбита на две составляющие (рисунок 3.4.3). При этом временной интервал выбирался из условия достижения максимального значения коэффициента детерминации, превосходящего 0,99.

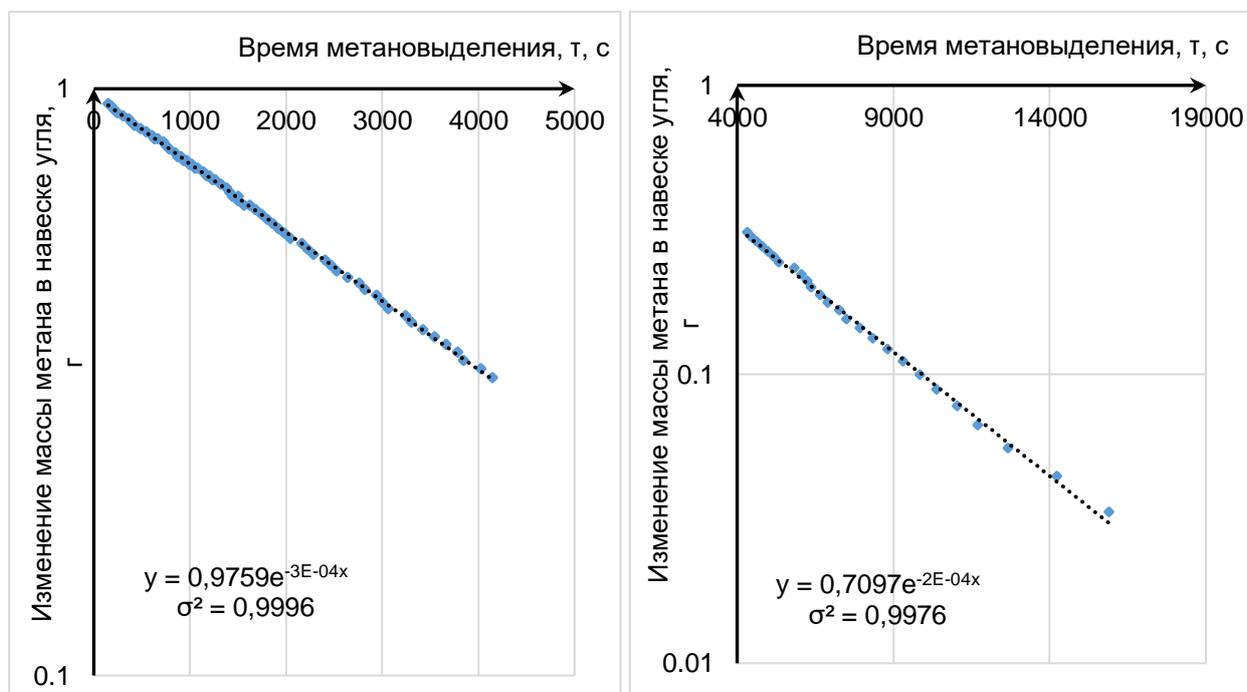


Рисунок 3.4.3 - Графики зависимости выхода метана в полулогарифмических координатах. 1- график, характеризующий первый этап (фильтрацию). 2 – график, характеризующий диффузию

Выход метана на втором этапе отвечает случаю проникновения метана в поры малого размера (порядка размеров молекул) при насыщении образцов в камере высокого давления.

Так как транспортировка и хранение углей на складах занимает длительное время (от нескольких недель до нескольких месяцев), то для оценки остаточного

содержания метана в угольных отдельностях следует использовать значения эффективного коэффициента диффузии и энергии активации, характеризующих диффузию метана на втором этапе.

Тогда, временная зависимость  $M_{\text{CH}_4}^{\Delta\tau_i}$ , представляющая собой суммарный поток метана с поверхности насыпного объема, имеет вид (3.4.4):

$$M_{\text{CH}_4}^{\Delta\tau_i} = J = 0,7097 \cdot e^{-0,0002\tau} \quad (3.4.4)$$

Аналитическое решение задачи о формировании поля концентраций газа в частице шаровой формы по аналогии с температурным полем, характеризующим регулярную стадию теплообмена, относительно потока метана, может быть представлено следующей формулой (3.4.5), полученной путём применения преобразования Лапласа и метода Бубнова-Галеркина [90]:

$$J = A \cdot e^{-\frac{10,5 \cdot D_{\text{эфф}} \cdot \tau}{r_{\text{cp}}^2}} \quad (3.4.5)$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель, учитывающий концентрацию метана, суммарную поверхность навески угля, эффективный коэффициент диффузии и средний радиус части угля.

Величина эффективного коэффициента диффузии устанавливается из равенства показателей экспоненты для экспериментальной и теоретической кривой (3.4.6):

$$\frac{10,5 \cdot D_{\text{эфф}} \cdot \tau}{r_{\text{cp}}^2} = 0,0002\tau \quad (3.4.6)$$

Следовательно, при среднем радиусе частиц угля 1,25 мм значение эффективного коэффициента диффузии метана в угле при температуре +30 °С составит  $3,04 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.

Аналогичная процедура расчета эффективного коэффициента диффузии проводится при других температурах.

Анализ температурной зависимости скорости диффузионного процесса позволяет определить энергию активации по формуле 2.4.3, как отношение полученных эффективных коэффициентов диффузии для двух разных температур  $D_{\text{эфф}}^{T1}$  и  $D_{\text{эфф}}^{T2}$  согласно следующей зависимости (3.4.7):

$$\frac{D_{\text{эфф}}^{T_1}}{D_{\text{эфф}}^{T_2}} = \frac{D_0 \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot T_1}}}{D_0 \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot T_2}}} \quad (3.4.7)$$

После математических преобразований получим уравнение (3.4.8):

$$\frac{D_{\text{эфф}}^{T_1}}{D_{\text{эфф}}^{T_2}} = e^{\frac{E_2}{R \cdot T_2} - \frac{E_1}{R \cdot T_1}} \quad (3.4.8)$$

В предположении о неизменности структуры угля в диапазоне температур, при которых производились исследования, считаем значения энергии активации постоянными. Тогда после математических преобразований формулы 3.4.8 энергия активации может быть вычислена (3.4.9):

$$E = \ln\left(\frac{D_{\text{эфф}}^{T_1}}{D_{\text{эфф}}^{T_2}}\right) \cdot \frac{R \cdot T_2 \cdot T_1}{T_1 - T_2} \quad (3.4.9)$$

Данный метод определения энергии активации может иметь небольшие отклонения, поэтому для более точного определения значения энергии активации необходимо построить график зависимости эффективного коэффициента диффузии от обратной температуры в аррениусовых координатах для  $\ln(D) - 1/T$  согласно уравнению 3.4.10, где тангенс угла наклона прямой численно равен среднему значению энергии активации (3.4.10):

$$\ln(D_{\text{эфф}}) = \ln(D_0) - \frac{E}{R \cdot T} \quad (3.4.10)$$

Полученные значения энергии активации выхода метана из образцов ископаемых углей различной стадии метаморфизма в интервале 2,8–25,2 кДж/моль достаточно хорошо совпадают с известными результатами исследователей [4,13,27].

### **3.5 Обсуждение результатов экспериментального исследования параметров массопереноса**

В ходе проведения экспериментальных исследований процессов массопереноса метана из углей при различных температурах для образцов трех месторождений Кузнецкого угольного бассейна: Ленинского, Осинниковского и Нарыкско-Осташкинского были рассчитаны значения эффективного

коэффициента диффузии и энергии активации диффузионного процесса. Полученные данные приведены в таблице 3.5.1.

Таблица 3.5.1 - Сводная таблица результатов экспериментальных исследований

Месторождение	Серия экспериментов	Температура, °С	$D_{эфф}$ , м <sup>2</sup> /с	Е, кДж/моль
Осинниковское	1	30	$3,04 \cdot 10^{-11}$	13,32
		40	$3,06 \cdot 10^{-11}$	
		50	$3,36 \cdot 10^{-11}$	
		60	$3,41 \cdot 10^{-11}$	
Ленинское	2	50	$5,11 \cdot 10^{-11}$	11,51
		60	$6,99 \cdot 10^{-11}$	
		70	$9,69 \cdot 10^{-11}$	
	3	50	$1,04 \cdot 10^{-10}$	3,74
		60	$1,17 \cdot 10^{-10}$	
		70	$1,42 \cdot 10^{-10}$	
	4	50	$1,12 \cdot 10^{-10}$	2,82
		60	$1,83 \cdot 10^{-10}$	
		70	$2,18 \cdot 10^{-10}$	
	5	50	$4,48 \cdot 10^{-11}$	4,63
		60	$1,12 \cdot 10^{-10}$	
		70	$1,59 \cdot 10^{-10}$	
Нарыкско-Осташкинское	6	40	$2,58 \cdot 10^{-11}$	21,57
		50	$2,63 \cdot 10^{-11}$	
		60	$2,68 \cdot 10^{-11}$	
	7	40	$2,09 \cdot 10^{-11}$	22,11
		50	$3,01 \cdot 10^{-11}$	
		60	$3,04 \cdot 10^{-11}$	
	8	40	$2,56 \cdot 10^{-11}$	25,21
		50	$2,72 \cdot 10^{-11}$	
		60	$4,61 \cdot 10^{-11}$	

Анализ результатов исследований подтвердил зависимость между энергией активацией и эффективным коэффициентом диффузии метана в угле. Меньшие значения энергии активации и энергии связи метана с угольным веществом, определяют более высокие значения коэффициентов диффузии.

Как было отмечено ранее, температура угольной массы может принимать и отрицательные значения, что связано с добычей угля в зимний период и его последующей транспортировкой до места временного хранения при отрицательной

температуре наружного воздуха. К сожалению, проведение экспериментальных исследований было ограничено возможностью создания лишь положительных температур навески угля, составляющих не менее +30 °С. В этой связи, для определения эффективных коэффициентов диффузии метана при более низких температурах предлагается использовать расчётный метод, основанный на уравнении Аррениуса (формула 2.4.3). Реализация данного подхода возможна при выполнении условия независимости энергии активации от температуры.

Так, например, для углей Осинниковского месторождения при температуре + 20 °С или 293 К обратное значение температуры  $1/T = 0,00341$ , предэкспоненциальный множитель  $D_0 = 1,16 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $E/R = 408$ , а коэффициент диффузии  $D_{\text{эфф}}$  составляет:  $2,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Аналогичные вычисления были осуществлены для всех навесок углей в интервале температур от +20 °С до - 20 °С. Результаты расчётов приведены в таблице 3.5.2.

Таблица 3.5.2 - Значения эффективных коэффициентов диффузии при разных температурах

Месторождение	Энергия активации	$D_{\text{эфф}}, 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$				
		20°С	10°С	0°С	-10°С	- 20°С
Осинниковское	13,32	2,2	1,4	1,1	0,8	0,6
Ленинское	11,51	4,7	4,2	3,6	3,3	2,9
	3,74	9,7	9,4	9,2	8,9	8,7
	2,82	9,9	9,5	9,2	8,8	8,5
	4,63	4,2	3,9	3,7	3,5	3,4
Нарыкско-Осташкинское	21,57	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5
	22,11	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
	25,21	2,4	2,1	1,9	1,7	1,5

Согласно полученным расчетам, изменение средней температуры транспортируемого или складированного угля с 20 °С до -20 °С, величина эффективного коэффициента диффузии метана может уменьшиться от 1,5 до 4 раз.

В этом случае, газоносность насыпного объема угля перед загрузкой на склад при прочих равных условиях в летний период времени будет ниже, чем в зимний период.

На основе вычисленных значений эффективных коэффициентов диффузии для температур  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  был построен график их зависимости от температуры угля (рисунок 3.5.1) на примере навески №1.

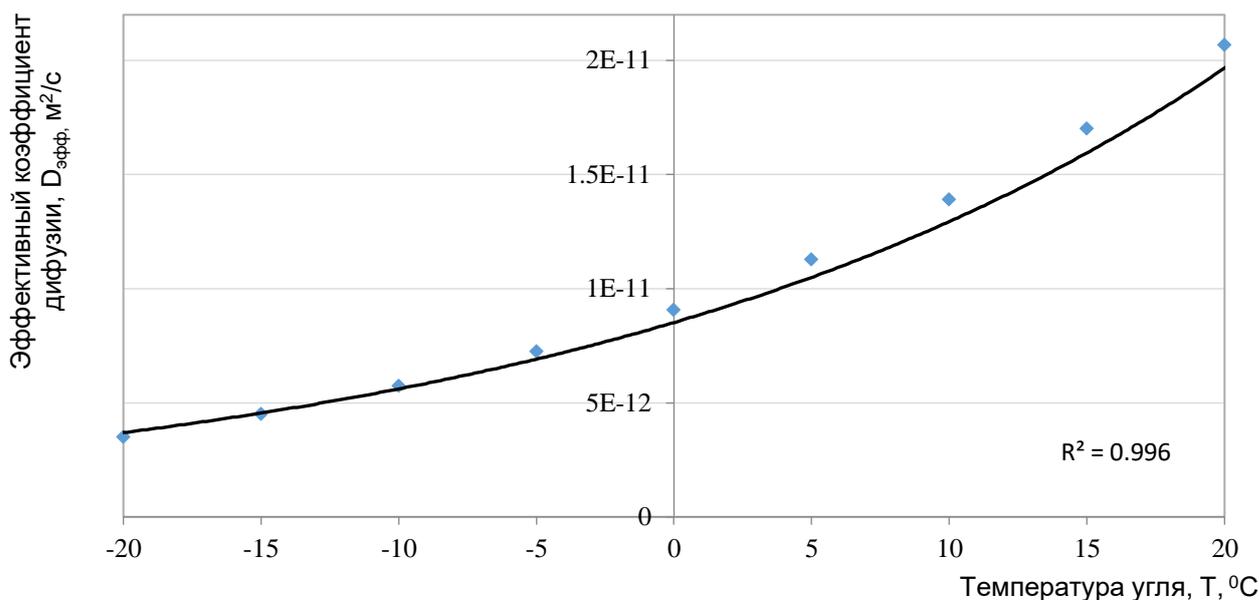


Рисунок. 3.5.1 - График зависимости изменения эффективного коэффициента диффузии метана от температуры окружающей среды для углей с энергией активации  $13,32\text{ кДж/моль}$

### 3.6 Выводы по главе 3

1. Показано, что эффективный коэффициент диффузии метана и энергия активации диффузионного процесса являются основными параметрами, определяющие процесс массопереноса метана в угольных отдельностях, величины которых необходимо устанавливать экспериментально. Наиболее рациональным для проведения экспериментальных исследований следует считать термогравиметрический метод анализа определения десорбции метана из пористой структуры ископаемых углей, позволяющий находить значения этих показателей в широком интервале температур.

2. Экспериментально установлено, что при среднем радиусе частиц угля  $1,25\text{ мм}$  значения эффективных коэффициентов диффузии метана изменяются в

диапазоне от  $4,61 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с до  $1,04 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с в зависимости от температуры. При этом, максимальные значения эффективных коэффициентов диффузии для исследуемых образцов угля зарегистрированы при температуре +70 °С, так как повышение температуры увеличивает кинетическую энергию молекул метана, способствуя их более быстрому выходу из угольной матрицы.

3. Согласно расчетам, основанным на данных ТГА, энергия активации диффузионного процесса для исследуемых образцов угля со средним радиусом частиц 1,25 мм находится в диапазоне от 2,8 до 25,2 кДж/моль. Разброс значений может быть объяснен различиями в геологических условиях образования угольных пластов, минеральном составе угля (марка угля), а также другими физико-химическими свойствами образцов. Более высокая энергия активации указывает на более прочные связи метана с угольной матрицей, что затрудняет его диффузию.

4. Экспериментально показано, что зависимость, описывающая связь между энергией активации и эффективным коэффициентом диффузии, имеет обратный характер, т.е. чем больше энергия связи метана с углём и энергия активации, тем меньше будет скорость диффузии метана и соответственно, меньше коэффициент диффузии.

## **ГЛАВА 4 АЭРОГАЗОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ И ХРАНЕНИИ КАМЕННОГО УГЛЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАКРЫТЫХ СКЛАДОВ**

### **4.1 Теоретические основы газовыделения метана из угольных штабелей**

После добычи и извлечения на поверхность уголь проходит несколько стадий транспортировки, прежде чем попасть к конечному потребителю. Истечение метана из угля начинается на этапе его добычи [13,107]. Известно, что природная метаноносность угольного пласта зависит от его сорбционной емкости, газопроницаемости и давления газа. Изначально, газоносные угольные пласты, находящиеся в нетронутом породном массиве, обладают высокой степенью непроницаемости (отсутствие массопереноса). Однако, при ведении горных работ, происходят значительные изменения в напряженно-деформированном состоянии угольного пласта, в частности разгрузка пласта от горного давления, что может привести к образованию проницаемых зон (трещин), способствующих перемещению метана. Эти трещины становятся основой для формирования системы фильтрационных каналов, которые связывают между собой отдельные поры угольного пласта. С этого момента начинается фильтрация и десорбция газа [18,41].

На каждом из этапов транспортировки, а также на складах для промежуточного размещения угольная продукция хранится в рыхлонасыпанном состоянии - штабелях различной формы, состоящих из отдельных угольных частиц (зерен), окруженных воздушным пространством, размер и распределение которых влияют на многие процессы, протекающие внутри штабеля, в том числе на дегазацию. После ликвидации места временного хранения или завершения времени транспортировки угольная масса перегружается или в места нового временного хранения или в другие транспортные средства.

В тех случаях, когда в процессе перемещения угольной массы от места его добычи до конечного пункта, дегазация метана, первоначально содержащегося в

угле, произошла лишь частично, то угольная масса будет иметь некоторую текущую газоносность [15].

Процесс дегазации при складировании угольной массы в штабелях осуществляется следующим образом. В начальный период сразу же после образования штабеля 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 растет, достигая некоторого асимптотического значения.

Если поверхность угольного штабеля омывается воздухом, то, одновременно с увеличением концентрации метана в глубине штабеля, происходит отток метана с его поверхности, то есть в зонах, прилегающих к поверхности штабеля, образуются зоны со сниженной, относительно областей, на которые влияние газообмена с поверхности еще не распространилось, концентраций метана [15].

В целом, может оказаться, что поток метана с поверхности штабеля вначале растет до некоторой величины, а затем монотонно падает.

Оценка концентрационных полей метана внутри насыпного объема угля на основе известных начальных условий (концентрация метана в угле) и параметров, характеризующих диффузию и адсорбцию метана в угле производится при допущении, что выделение метана в единицу объема угольной массы, где поверхность угольных отдельностей равна  $F_{\text{ед.об.}}$ , 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 [15].

Тогда, дифференциальное уравнение диффузии метана в каждой из угольной отдельности может быть представлено в виде (4.1.1):

$$\frac{\partial C}{\partial F_{O_{\text{уг}}}} = D_{\text{эфф}} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial R^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial R} \quad (4.1.1)$$

Начальные условия (4.1.2): (4.1.2)

$$C(R, 0) = C_0$$

Граничные условия (4.1.3) и (4.1.4): (4.1.3)

$$C(1, \tau) = C_\tau, \quad (4.1.4)$$

$$\frac{\partial C(0, Fo^{yg})}{\partial R} = 0$$

где  $C(R, Fo^{yg})$  – концентрация метана в угольной отдельности, кг/м<sup>3</sup>;

$C_\tau$  - концентрация метана в воздушном пространстве насыпного объема, кг/м<sup>3</sup>;

$C_0$  - начальная концентрация метана в угольной массе, кг/м<sup>3</sup>;

$R_{yg}$  - безразмерный радиус угольной отдельности, м,  $R_{yg} = r/r_{cp}$ ;

$r$  - текущий радиус угольных отдельностей слагающих насыпной объем, м;

$r_{cp}$  - средний радиус угольных отдельностей, слагающих насыпной объем, м.

Решение уравнения 4.1.1, представленное в общем виде даже при  $C_\tau = \text{const}$ , имеет сложный вид, что затрудняет его дальнейшее использования для вычисления динамики концентрации метана в воздушных пустотах. Поэтому для определения  $C(R, Fo^{yg})$  использовано асимптотическое представление общего решения при фактических значениях диффузионного числа Фурье, составляющего для рассматриваемых условий (4.1.5):

$$Fo^{yg} = \frac{D_{эфф} \cdot \tau}{r_{cp}^2} = \frac{(10^{-10} \div 10^{-11}) \cdot (0,1 \div 9)10^5}{0,03^2} = 0,001 \div 0,01 \quad (4.1.5)$$

Тогда величина диффузионного потока при этих величинах числа Фурье с высокой точностью может быть представлена в виде (4.1.6):

$$j(Fo^{yg}) = \frac{D_{эфф}}{r_{cp}} \cdot \left( -1 + \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot Fo^{yg}}} \right) \cdot (C_0 - C_\tau) \quad (4.1.6)$$

В случае изменения  $C_\tau$  по произвольному закону поток  $j_\tau(Fo^{yg})$  устанавливается на основе теоремы Дюамеля [14] согласно следующей зависимости (4.1.7):

$$j(Fo^{yg}) = \frac{D_{эКВ}}{r_{cp}} \frac{\partial}{\partial Fo^{yg}} \int_0^{Fo^{yg}} \left( -1 + \frac{1}{\sqrt{\pi \xi}} \right) \cdot [C_0 - C_\tau(Fo^{yg} - \xi)] d\xi \quad (4.1.7)$$

где  $\xi$  - переменная интегрирования.

Изменения концентрации метана в единице объёма воздушного пространства насыпного объёма может быть описано следующим уравнением (4.1.8):

$$m \frac{dC(Fo^{yT})}{dFo^{yT}} = (1 - m) \cdot F_{ед.об} \cdot j(Fo^{yT}) \quad (4.1.8)$$

Начальные условия  $C(Fo^{yT})|_{Fo^{yT}=0} = 0$ .

Решение уравнения 4.1.8, выполненное с помощью преобразования Лапласа, относительно концентрации метана в воздушном пространстве, может быть представлено в виде (4.1.9):

$$C(Fo^{yT}) = C_0 f(Z) \quad (4.1.9)$$

где  $f(Z)$  - табулированная функция, определяемая выражениями (4.1.10) и (4.1.11):

$$f(Z) = 1 - e^{k^2 \cdot Fo^{yT}} \cdot \operatorname{erfc}(k \cdot \sqrt{Fo^{yT}}), \quad (4.1.10)$$

$$\operatorname{erfc}(k \cdot \sqrt{Fo^{yT}}) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{k \cdot \sqrt{Fo^{yT}}} e^{-\xi^2} d\xi \quad (4.1.11)$$

где  $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{k \cdot \sqrt{Fo^{yT}}} e^{-\xi^2} d\xi$  - интеграл вероятности при  $k = \frac{r_{cp}}{m} F_{ед.об} (1 - m)$ ;

$F_{ед.об}$  - суммарная поверхность кусков угля в единице насыпного объёма угольной массы,  $m^2/m^3$ ;

$m$  - относительный объем, занимаемый воздухом в единице насыпного объёма угольной массы, доли ед.

Начальная концентрация метана в угольной массе  $C_0$  связана с газоносностью (метаноносностью) следующим соотношением (4.1.12) [71]:

$$C_0 = \rho_{мет} \cdot \rho_{уг} \cdot X_{мет} \quad (4.1.12)$$

где  $\rho_{мет}$  - плотность метана,  $кг/м^3$ ;

$\rho_{уг}$  - плотность угля,  $м^3/т$ ;

$X_{мет}$  - начальная метаноносность угля,  $м^3/т$ .

Одним из путей вычисления средней концентрации метана в воздушном пространстве насыпного объёма  $\overline{C(Fo^{yT})}$  является интегрирование выражения 4.1.9 с последующим усреднением по времени  $Fo^{yT}$ . Однако, при этом, выражение для вычисления  $C(Fo^{yT})$  получается достаточно громоздким, что делает его малоприменимым для дальнейших оценок [15].

Другой путь вычисления  $\overline{C(Fo^{yT})}$  состоит в использовании балансового уравнения, в основе которого лежит вычисление суммарного потока метана, поступающего в воздушное пространство насыпного объёма из угольных отделеностей за время  $Fo^{yT}$ , при условии постоянства средней концентрации метана за это время и с последующим расчётом приращения средней концентрации метана в воздушном пространстве относительно начальной величины, равной нулевому значению. Зависимость для определения  $\overline{C(Fo^{yT})}$  может быть представлена в виде (4.1.13):

$$\overline{C(Fo^{yT})} = \frac{C_0 \cdot k \cdot [2 \cdot \sqrt{\frac{Fo^{yT}}{\pi}} - Fo^{yT}]}{1 + 0,5k \cdot [2 \cdot \sqrt{\frac{Fo^{yT}}{\pi}} - Fo^{yT}]} \quad (4.1.13)$$

Полученные значения концентрации метана позволяют определить поток метана итеративным способом. Процесс расчёта повторяется до достижения сходимости, то есть до того момента, когда изменения расчетных величин становятся пренебрежимо малыми. Важно отметить, что точность результатов напрямую зависит от точности исходных данных, используемых в расчетах. В частности, значительное влияние оказывают характеристики самого угля, которые могут варьироваться в широком диапазоне. Поэтому для повышения точности прогнозов необходимо проводить детальное исследование свойств угля, используя методы лабораторного анализа, а также осуществлять регулярный мониторинг параметров в реальных условиях хранения и транспортировки.

Поток метана с поверхности каждой угольной отделености вычисляется при допущении, что она может быть представлена в форме шара радиуса  $r_{cp}$ , а поток метана с его поверхности определяется эффективным коэффициентом диффузии  $D_{эфф}$ . Принято допущение, что поток метана с поверхности насыпного объёма в воздушную среду за время  $\tau$  определяется величиной эквивалентного коэффициента диффузии, вычисляемого по формуле 2.3.16. Тогда величина потока метана с поверхности вагона может быть рассчитана по формуле (4.1.14), а поток метана с поверхности штабеля – по формуле (4.1.15):

$$J_{\text{ваг}} = \sqrt{\frac{D_{\text{ЭВК}}}{\pi \tau}} \cdot [\overline{C(Fo^{\text{уг}})} - C_{\text{возд}}], \quad (4.1.14)$$

$$J_{\text{штаб}} = \frac{D_{\text{ЭВК}}}{R_{\text{штаб}}} \cdot \left( -0,5 + \frac{1}{(\pi Fo_{\text{штаб}})^{0,5}} \right) \cdot [\overline{C(Fo^{\text{уг}})} - C_{\text{возд}}] \quad (4.1.15)$$

где  $Fo_{\text{штаб}}$  – диффузионное число Фурье для угольного штабеля;

$R_{\text{штаб}}$  – эквивалентный радиус штабеля, м.

## 4.2 Анализ снижения газоносности каменных углей перед погрузкой в вагоны и при транспортировании

В большинстве случаев, отбитый уголь доставляется на поверхность по системе ленточных конвейеров или по вертикальным стволам скиповыми подъёмниками. В течение всего времени с момента отбойки происходит непрерывная дегазация угля, интенсивность которой определяется физико-химическими свойствами угля, временем нахождения угля в выработке, а также длительностью транспортирования. Согласно литературным данным [2,16,86], после добычи и извлечения на поверхность угля его метаноносность значительно снижается по сравнению с метаноносностью в природных условиях.

С целью оценки динамики выхода метана из отбитого угля на этапе его нахождения в горных выработках были проведены расчёты на основе методических рекомендаций «Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт» [68]. По результатам расчетов построен график зависимости текущей газоносности отбитого угля в зависимости от времени его нахождения в горных выработках при различных значениях природной газоносности угля (рисунок 4.2.1).

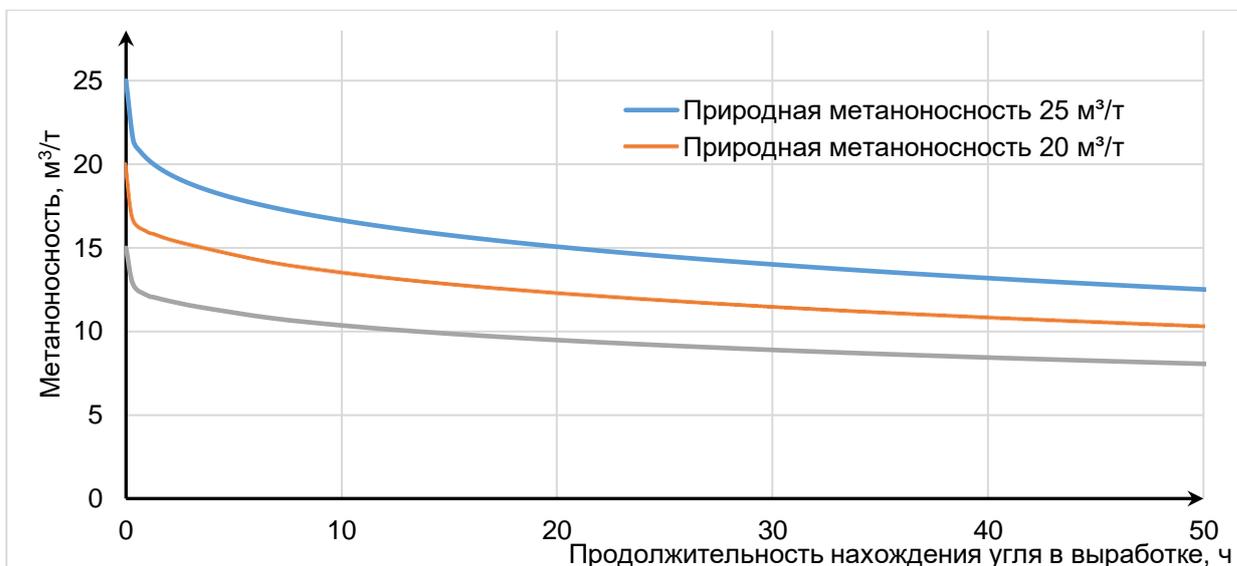


Рисунок 4.2.1 - Изменение метаноносности отбитого угля в зависимости от времени его нахождения в горных выработках

В приведенных оценках коэффициент эффективности заблаговременной дегазации не был учтен, поскольку это величина не определяется надежно.

Таким образом, при высокой начальной газоносности углей, даже после их извлечения на поверхность, содержание метана остаётся достаточно высоким. Например, при газоносности угольных пластов в природных условиях 20-25 м³/т, после их извлечения на поверхность, величина остаточной газоносности может быть равной 13-18 м³/т. В этом случае, процесс выделения метана из угля может продолжаться долгое время, в том числе, при транспортировке и размещении его на складах.

Большинство угольных складов для промежуточного хранения дислоцируются на значительном удалении от угольных месторождений, в связи с чем выделяется отдельный этап – транспортирование угольного сырья.

Доставка угля к местам временного размещения осуществляется преимущественно железнодорожным способом в специализированных открытых или закрытых вагонах, а также, с недавнего времени, в контейнерах типа OpenTop [6,92,106].

Динамика процесса эмиссии метана при транспортировке угля зависит от значения его остаточной метаноносности (в том числе его пористости), типа вагона и температуры окружающей среды, коэффициента разрыхления угля и др.

В том случае, если в структуре транспортируемого угля больше закрытых пор, то время выхода метана может быть больше времени транспортировки углей ввиду длительности протекания процесса диффузии. Более того, во время транспортировки угля в вагонах происходит уплотнение насыпи угля под действием транспортной вибрации, в ходе чего объем межкусковых пустот уменьшается, а площадь соприкосновения угольных кусков друг с другом – возрастает. Данный процесс, в определенной степени, влияет на снижение метановыделений.

Кроме того, в процессе транспортирования угольной массы в железнодорожных вагонах с учетом взаимодействия с наружным воздухом происходит изменение температуры угольной массы. В этой связи, для определения эквивалентного коэффициента диффузии следует использовать среднюю за период транспортировки температуру угольной массы. Для этого примем следующие допущения:

1. Неоднородная масса угля, загруженного в вагоны, заменяется однородной массой, характеризующаяся эффективными теплофизическими свойствами: коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{эфф.}}$ , удельной теплоёмкостью  $c_{\text{эфф.}}$ , насыпной плотностью  $\rho_{\text{эфф}}$  [20,40].

2. Сложная геометрическая форма вагона заменяется цилиндрической формой с эквивалентным радиусом  $R_{\text{ваг}}$  по формуле (4.2.1):

$$R_{\text{ваг}} = \frac{2 \cdot S_{\text{ваг}}}{P_{\text{ваг}}} \quad (4.2.1)$$

где  $S_{\text{ваг}}$  - площадь поперечного сечения вагона, м<sup>2</sup>;

$P_{\text{ваг}}$  - периметр вагона, м.

Эффективная удельная теплоёмкость угольной массы  $c_{\text{эфф.}}$  может быть рассчитана как сумма относительных удельных теплоёмкостей угольных отдельностей  $c_{\text{уг}}$  и пустот, заполненных воздухом  $c_{\text{возд}}$  по формуле (4.2.2)

$$c_{\text{эфф}} = \nu_{\text{уг}} \cdot c_{\text{уг}} + \nu_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}} \quad (4.2.2)$$

Величина коэффициента теплоотдачи  $a_{\text{н}}$  [42,106] может быть рассчитана по эмпирической формуле (4.2.3):

$$a_H = a_{H.л.} + \frac{0,81 \cdot (v + 15)}{L_{ваг}^{0,2}} \quad (4.2.3)$$

где  $a_{H.л.}$  – лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>°С) ( $a_{H.л.} = 9$  Вт/(м<sup>2</sup>°С));

$v$  - скорость поезда, км/ч;

$L_{ваг}$  - длина вагона, м.

Результаты вычислений  $a_H$ , свидетельствуют о том, что при скоростях поездов, более 50 км/ч, величина  $a_H$ , превышает 50 Вт/(м<sup>2</sup>°С). Это даёт основание считать, что интенсивность теплообмена между наружной поверхностью грузовых вагонов и атмосферным воздухом может вычисляться при граничных условиях первого рода.

Эффективную теплопроводность  $\lambda_{эфф.}$  предлагается определять в соответствии с методикой, предложенной в работе [51]. В основе этой методики лежит допущение о возможности рассмотрения угольной массы, в качестве двух бинарных смесей, одна из которых состоит из угольных отдельностей, окружённых пустотами, содержащими воздух, а другая, наоборот, из пустот с воздухом, которые окружены угольными отдельностями. В первом случае, эффективное значение теплопроводности рассчитывается по формуле (4.2.4), а во втором случае - по формуле (4.2.5).

$$\lambda_{эфф.1} = \lambda_{возд} \left( 1 + v_{уг} \cdot \frac{1 - \lambda_{возд} / \lambda_{уг}}{1 - \sqrt[3]{v_{уг}} \cdot 1 - \lambda_{возд} / \lambda_{уг}} \right) \quad (4.2.4)$$

$$\lambda_{эфф.2} = \lambda_{уг} \left( 1 + v_{возд} \cdot \frac{1 - \lambda_{уг} / \lambda_{возд}}{1 - \sqrt[3]{v_{возд}} \cdot 1 - \lambda_{уг} / \lambda_{возд}} \right) \quad (4.2.5)$$

где  $\lambda_{возд}$  – теплопроводность воздуха, Вт/(м·К);

$\lambda_{уг}$  – теплопроводность угля, Вт/(м·К).

При этом результирующая величина эффективной теплопроводности  $\lambda_{\text{эфф}}$  угольной массы устанавливается по следующей формуле (4.2.6):

$$\lambda_{\text{эфф}} = 0,3 \cdot \lambda_{\text{эфф.1}} + 0,7 \cdot \lambda_{\text{эфф.2}} \quad (4.2.6)$$

Насыпная плотность угольной массы  $\rho_{\text{эфф}}$  ориентировочно может быть установлена по значению плотности угля и коэффициенту разрыхления  $K_p$ , величина которого принимается равной 1,3.

Тогда, эффективная температуропроводность угольной массы  $\alpha_{\text{эфф}}$  вычисляется по известной формуле (4.2.7):

$$\alpha_{\text{эфф}} = \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{c_{\text{эфф}} \cdot \rho_{\text{эфф}}} \quad (4.2.7)$$

Решение задачи о теплообмене цилиндрического тела с эквивалентными теплофизическими свойствами, которое моделирует железнодорожный вагон, осуществлено приближенным способом, в основе которого лежит метод Бубнова-Галеркина [80,90].

Зависимость относительно средне интегральной температуры по сечению цилиндра  $\bar{\theta}$  имеет следующий вид (4.2.8):

$$\bar{\theta} = 0,693 \cdot e^{-5,78Fo_{\text{уг}}} + 0,197 \cdot e^{-36,88Fo_{\text{уг}}} \quad (4.2.8)$$

Среднюю температуру угольной массы за время её транспортировки до места временного хранения несложно вычислить из зависимости 4.2.8, используя соотношение (4.2.9):

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_{\text{ср}} = \frac{1}{Fo_{\text{уг}}} \int_0^{Fo_{\text{уг}}} \bar{\theta} dFo_{\text{уг}} = \frac{0,12}{Fo_{\text{уг}}} [1 - e^{-5,78Fo_{\text{уг}}}] + \\ + \frac{0,00534}{Fo_{\text{уг}}} [1 - e^{-36,88Fo_{\text{уг}}}] \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

По зависимости 4.2.9 для исходных данных (таблица 4.2.1), были осуществлены расчёты, в которых варьировались температуры окружающей и время транспортировки. Результаты расчётов представлены на рисунке 4.2.2.

Таблица 4.2.1 – Сводные данные теплофизических свойств угольной массы и ее составляющих

Теплопроводность, Вт/(м·К)		Теплоемкость, Дж/(кг·К)		Относительный объем		Насыпная плотность	Эффективные свойства бинарной смеси		
угля	воздуха	угля	воздуха	угля	воздуха		Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Температуропроводность, м <sup>2</sup> /с
0,25	0,031	1300	1005	0,7	0,3	920	0,145	1212	0,0000013

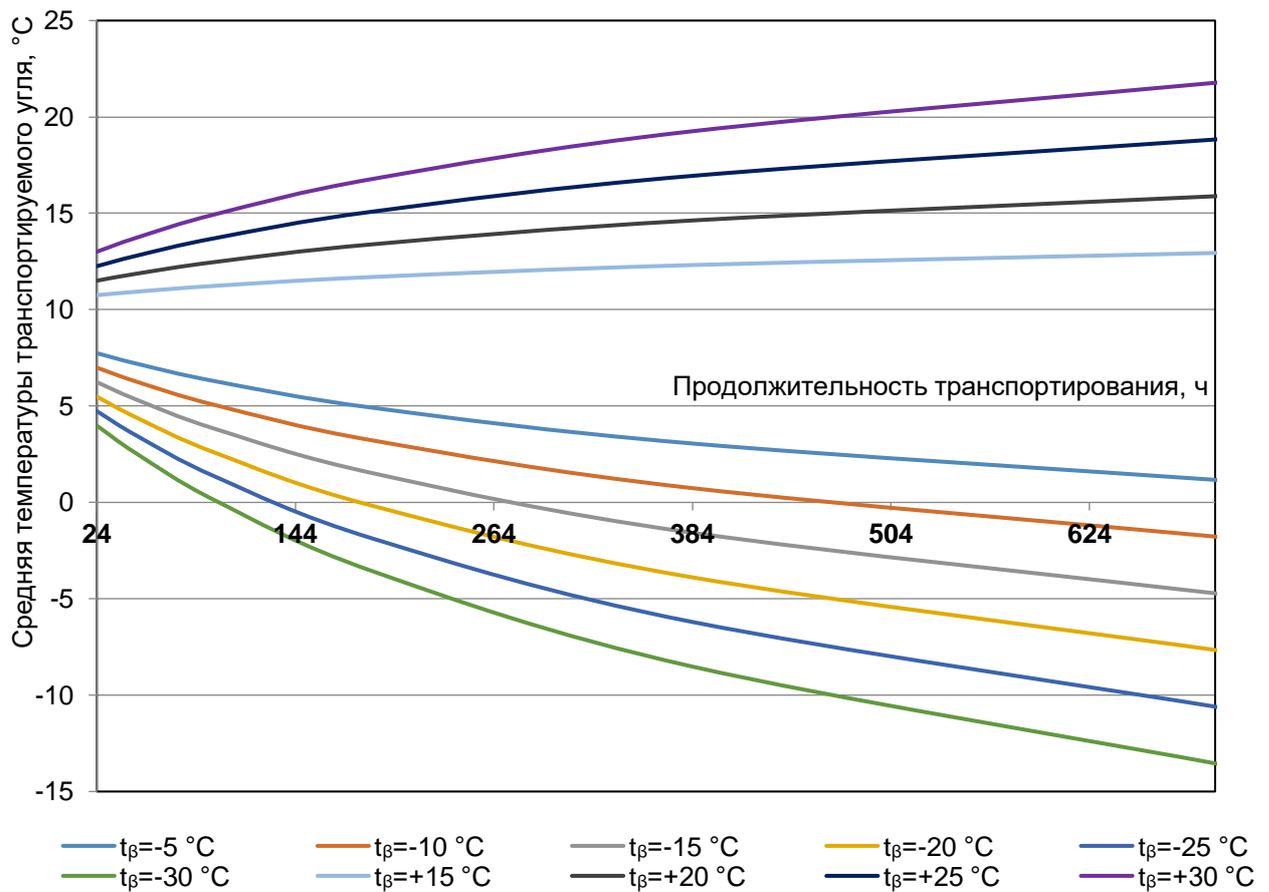


Рисунок 4.2.2 - Средняя температура угольной массы в зависимости от продолжительности транспортировки угля до мест временного хранения

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что с увеличением времени транспортировки угольной массы ее средняя по объему вагона температура может снижаться на 10-20 °C в зимний период и повышаться на 5-10 °C летом.

С учетом средней за период транспортирования температуры угольной массы по формуле 4.1.13 был построен график зависимости изменения концентрации метана в насыпном объеме от времени (рисунок 4.2.3).

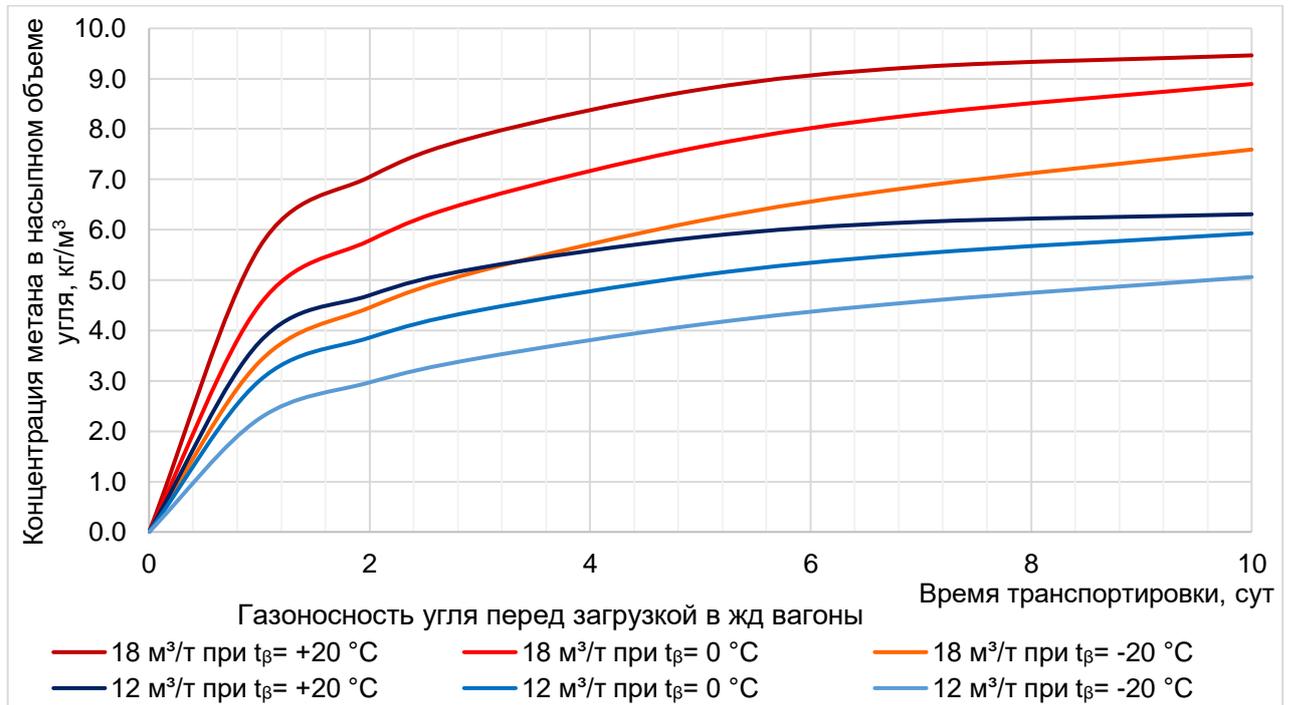


Рисунок 4.2.3 - График зависимости изменения концентрации метана в насыпном объеме угля от продолжительности его транспортирования при различных значениях газоносности угля

Изменение газоносности угольной массы  $X_t$ , находящейся в вагоне, относительно начального значения, равно разнице между начальной величиной  $X_0$  и величиной суммарного газовыделения (4.2.8):

$$X_t = X_0 - \frac{J_{\text{ваг}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{ваг}}}{\rho_{\text{мет}} \cdot M_{\text{ваг}}} \quad (4.2.8)$$

где  $F_{\text{пов}}^{\text{ваг}}$  – суммарная поверхность угля в вагоне, м<sup>2</sup>;

$M_{\text{ваг}}$  - грузоподъемность вагона, т.

По полученным данным был построен график зависимости изменения газоносности угля за время его транспортировки при различных значениях газоносности перед транспортировкой (рисунок 4.2.4).

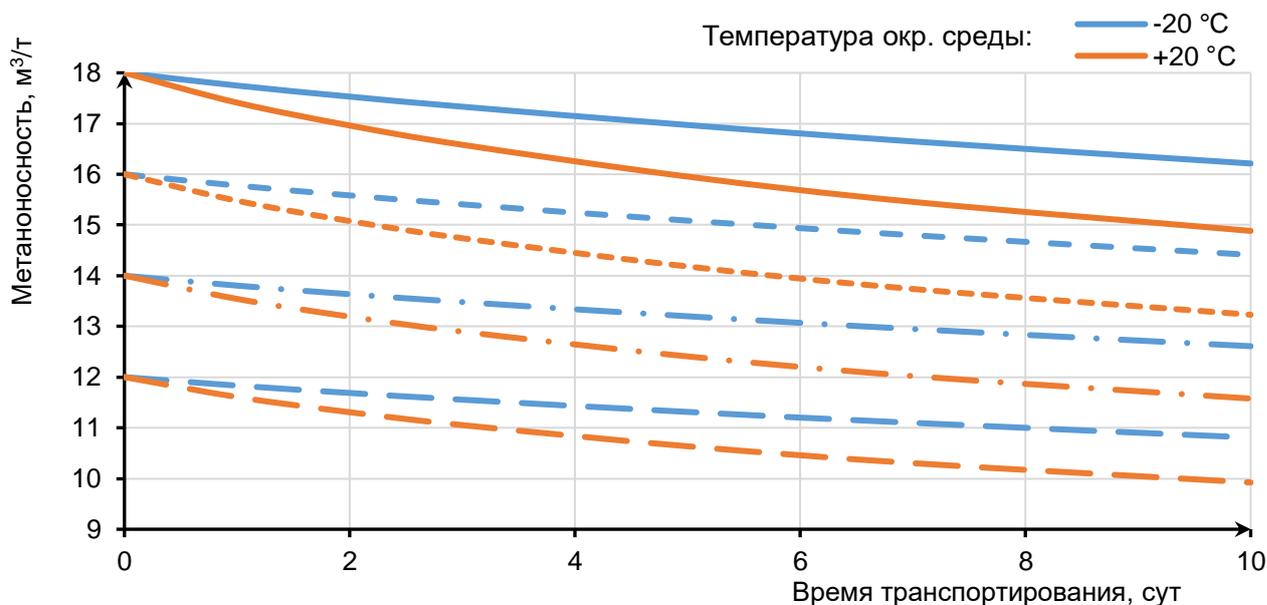


Рисунок 4.2.4 - График зависимости изменения метаноносности угля за время его транспортировки

Согласно полученным результатам, метаноносность угля после транспортировки продолжительностью 10 дней составит от 16 до 10 м<sup>3</sup>/т.

#### 4.3 Определение величины газовыделения с поверхности угольного штабеля при размещении угля в закрытом складе

Доставленный к месту хранения уголь может содержать некоторое количество метана, определение которого было описано ранее. При размещении в закрытом складе угля с некоторым содержанием метана создаётся градиент концентрации метана, при этом максимальная концентрация наблюдается в глубине штабеля, где доступ воздуха ограничен, а минимальная – на поверхности, где происходит активный газообмен с атмосферой. Этот газообмен подчиняется законам диффузии и конвекции. Диффузия – это постепенное перемещение метана из зон с высокой концентрацией в зоны с низкой концентрацией. Конвекция, вызванная температурными градиентами или скоростью движения воздуха, ускоряет этот процесс. Образуется зона сниженной концентрации метана вблизи поверхности штабеля, своего рода "защитный слой", толщина которого зависит от интенсивности вентиляции и скорости дегазации самого угля.

Согласно расчетам по формуле 4.1.13, в течение первого дня хранения угля на складе наблюдается интенсивный рост концентрации метана в объеме склада,

что особенно характерно для летнего периода, так как с увеличением температуры повышается значение эффективного коэффициента диффузии и, соответственно, скорость выхода метана [15]. На основе расчетов, построен график изменения концентрации метана в воздушном пространстве склада от продолжительности хранения угля (рисунок 4.3.1).

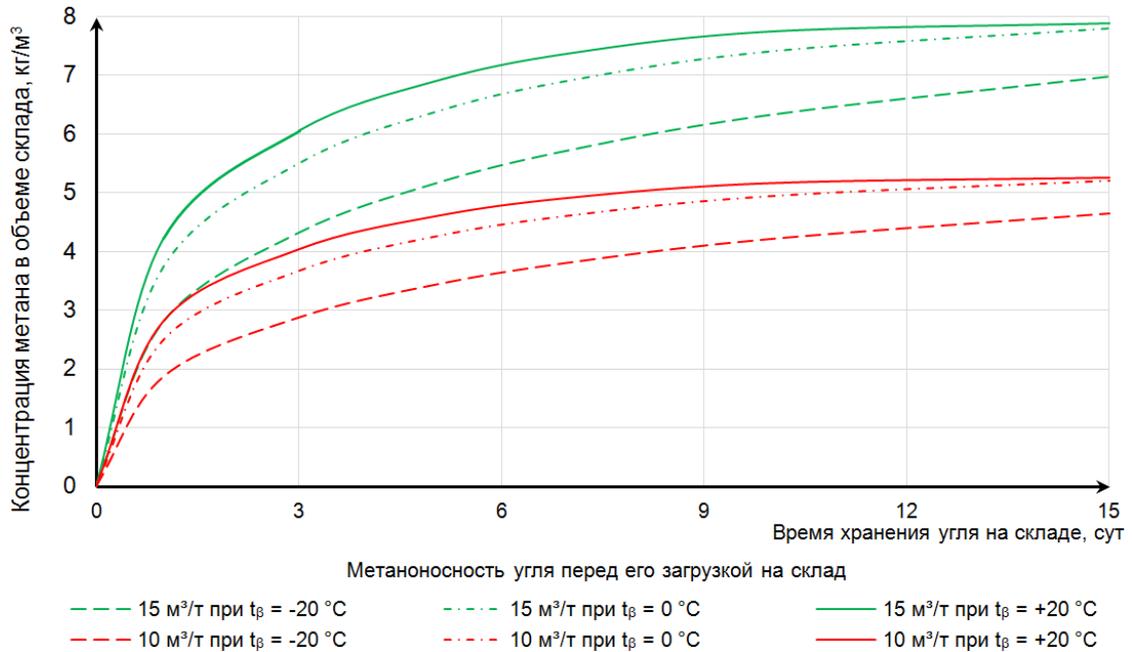


Рисунок 4.3.1 - График зависимости изменения концентрации метана в воздушном пространстве склада от продолжительности хранения угля

Как было отмечено ранее, концентрация метана в закрытых складах не должна превышать 1% от общего объема склада. В этой связи, необходимо определить расход воздуха, подаваемый в складскую зону, который сможет обеспечить непревышение установленного значения. Тогда, с учетом параметров угольного склада и угольного штабеля расход воздуха следует рассчитывать по следующей формуле (4.3.1):

$$Q = - \frac{J_{\text{штаб}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}}}{\ln \left( \frac{C_{\text{штаб}} - C_{\text{пр}}}{C_{\text{штаб}}} \right)} \quad (4.3.1)$$

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

$C_{\text{штаб}}$  – концентрация метана в угольном штабеле, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{пр}}$  – предельная концентрация метана, кг/м<sup>3</sup>.

При этом поток метана с поверхности штабеля, вычисленный по формуле 4.1.15, может демонстрировать нелинейное поведение (рисунок 4.3.2). Вместо монотонного снижения, часто наблюдается фаза роста, достигающая некоторого пика, после чего начинается постепенное убывание. Это объясняется несколькими факторами. Во-первых, в начальный период внутри штабеля еще сохраняется относительно высокая концентрация метана, накопленного в угле во время добычи и транспортировки. По мере того, как метан диффундирует из внутренних слоев к поверхности, его поток возрастает. Однако, одновременно с этим происходит процесс дегазации угля, и концентрация метана внутри постепенно уменьшается. В итоге скорость поступления метана на поверхность уменьшается, что приводит к снижению общего потока. Этот пик потока метана имеет важное практическое значение, поскольку он определяет максимальную концентрацию метана в воздухе, окружающем штабель, и, следовательно, риски взрыва или пожара.

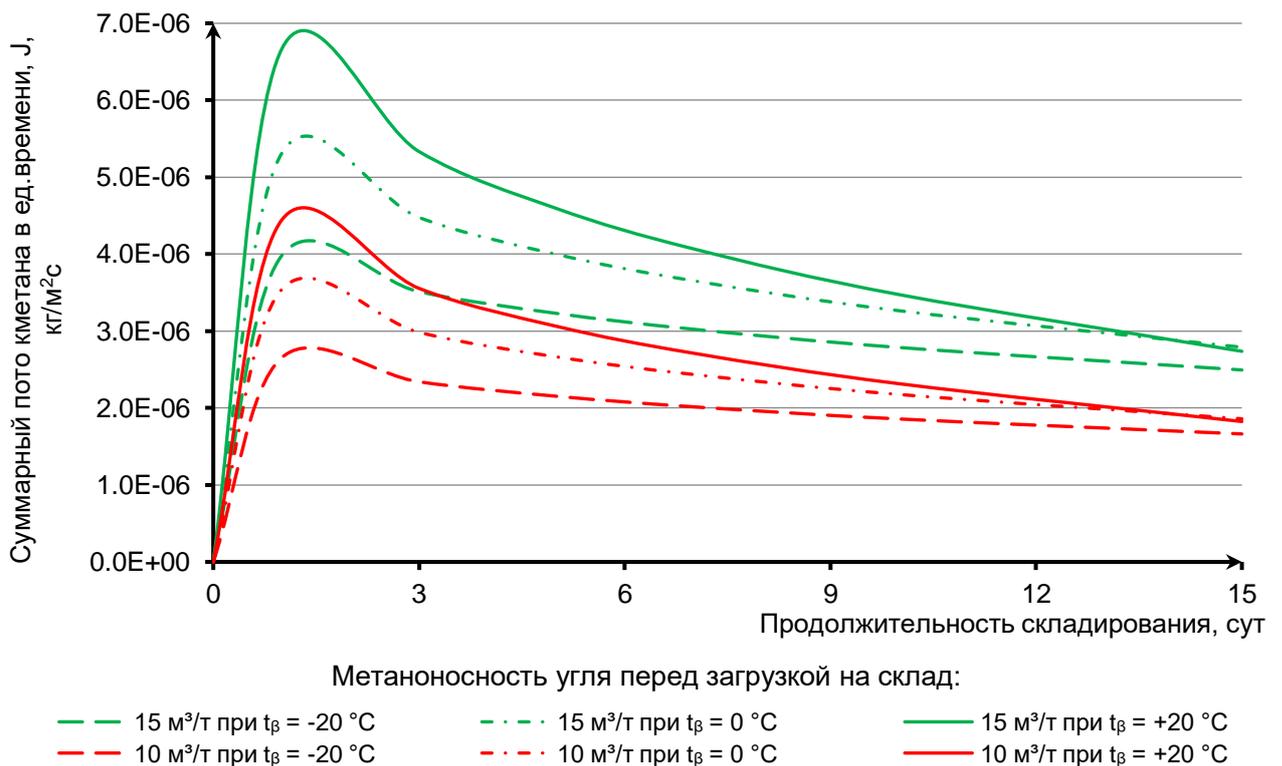


Рисунок 4.3.2 - Зависимость потока метана с открытой поверхности угольного штабеля от времени хранения угля при различной величине метаноносности

Максимальное значение потока метана будет соответствовать максимально требуемому значению расхода воздуха. Тогда, с учётом зависимости 4.3.2 для различной остаточной метаноносности угля перед загрузкой в склад расход воздуха

будет изменяться в пределах от 12 м<sup>3</sup>/с до 28 м<sup>3</sup>/с в зимний период (средняя температура окружающей среды - 20 °С) и от 16 м<sup>3</sup>/с до 48 м<sup>3</sup>/с в летний период (средняя температура окружающей среды + 20 °С).

В связи с нестационарным характером движения и сложной аэродинамикой воздушного потока необходимо уточнение величины расхода воздуха на основе компьютерного моделирования аэродинамики потока метана в объеме закрытого склада с помощью программы Flow Vision.

#### **4.4 Математическое моделирование аэрогазодинамических процессов в воздушном пространстве закрытого угольного склада**

Для подтверждения результатов вычислений расхода воздуха, выполненных по приближенной аналитической зависимости, проведено математическое моделирование аэрогазодинамических процессов при проветривании закрытого угольного склада с помощью программы Flow Vision.

При этом поток метана соответствовал потоку, принятому в приближенных расчётах (10<sup>-6</sup> кг/м<sup>2</sup>с), а геометрия склада типовым проектным решениям: высота угольного штабеля - 23 м, ширина его основания - 65 м, длина - 600 м, с размещением погрузо-разгрузочной техники, в частности, порталного реклаймера. Модель закрытого угольного склада представлена на рисунке 4.4.1.

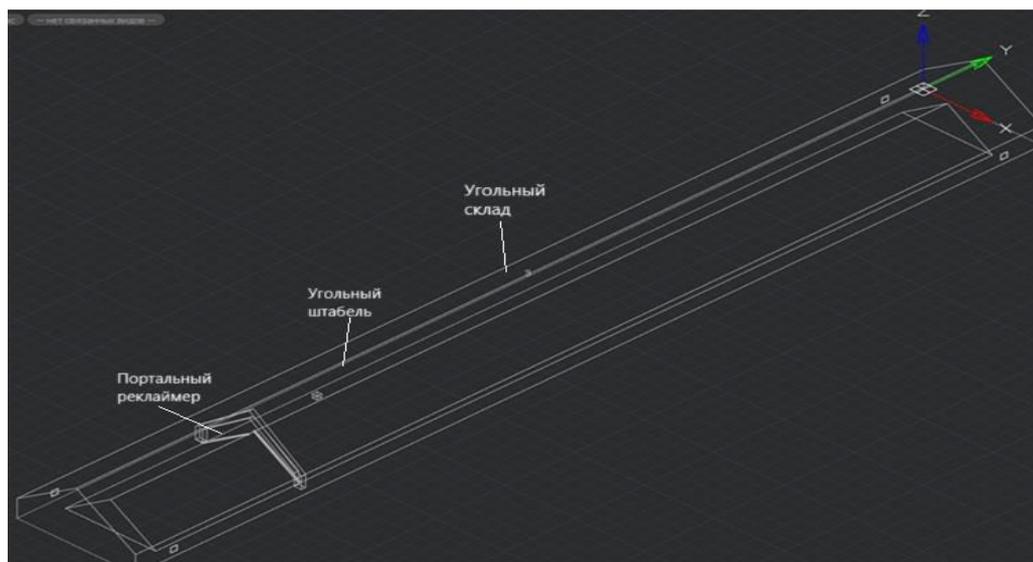


Рисунок 4.4.1 - Модель закрытого угольного склада хребтового типа, созданная в программе NanoCAD

Для организации вентиляции склада была выбрана схема, предполагающая подачу свежего воздуха через проемы, расположенные на боковых стенах в торцах помещения (рисунок 4.4.2). Это позволяет обеспечить поступление чистого воздуха и, как следствие, разбавление метановых скоплений с поверхности угольного штабеля. Входная поверхность задавалась как поверхность «входа» в модель с учетом фиксированной скорости на входе.

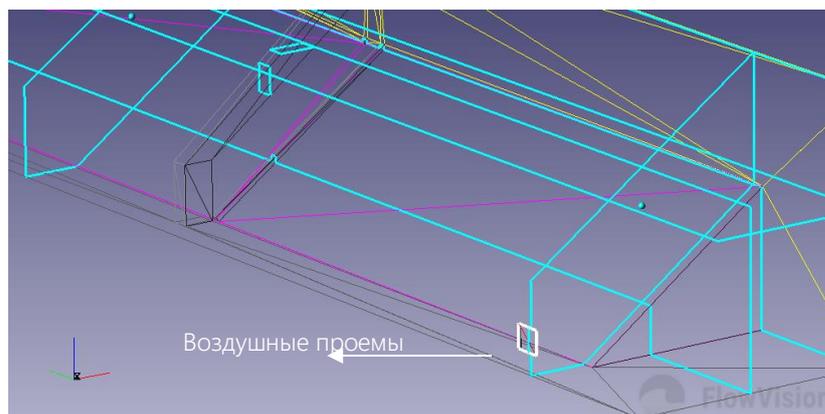


Рисунок 4.4.2 - Расположение воздушных проемов

Загрязненный воздух, содержащий метан и другие возможные примеси, отводится через вентиляционную трубу (рисунок 4.4.3), расположенную в центре склада.

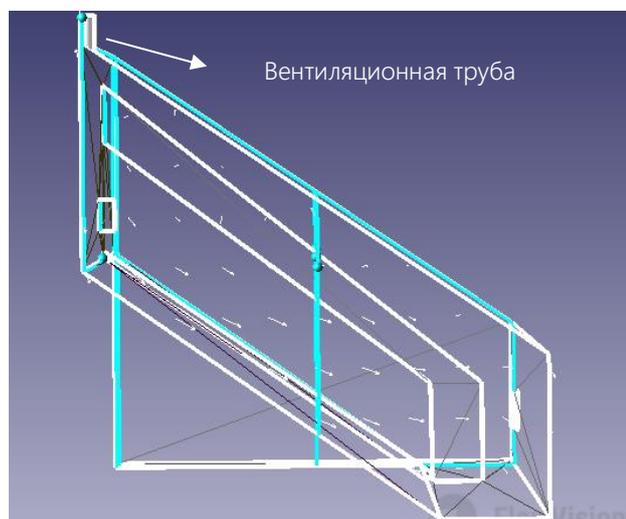


Рисунок 4.4.3 - Расположение вентиляционной трубы в разрезе

Приведенная схема проветривания была выбрана с учетом оптимизации воздушного потока, а также для обеспечения равномерного распределения свежего воздуха по всему объему склада и минимизации риска образования зон с высокой концентрацией метана.

С целью снижения количества расчетных блоков и увеличения точности моделирования расчетная область была разделена на 4 равные части путем отсечения продольной вертикальной плоскостью X, проходящей вдоль длинной стороны, перпендикулярной основанию штабеля и поперечной вертикальной плоскостью Y, проходящей по центру склада, поперёк длинной стороны. Все вычисления выполнялись для одной из этих частей (рисунок 4.4.4).

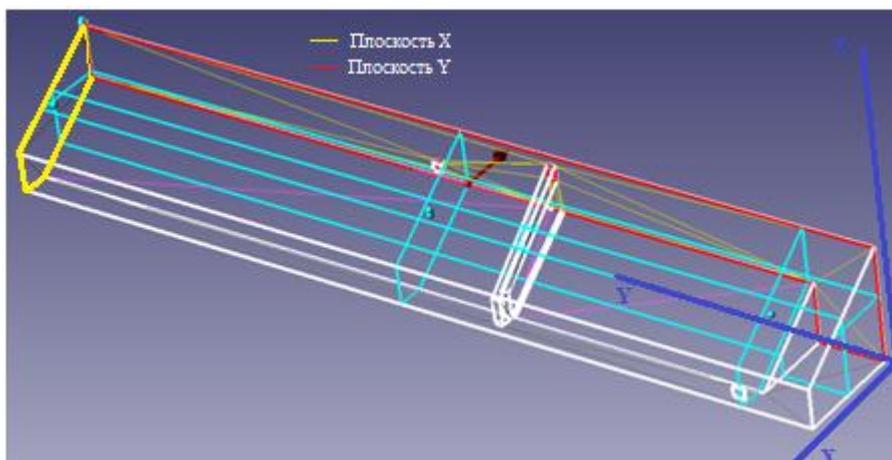


Рисунок 4.4.4 – Обозначение плоскостей X и Y, отсекающих четверть закрытого угольного склада

Расчетная сетка для полученной модели составляет примерно 14500 блоков (рисунок 4.4.5), при этом размер основного расчётного блока приблизительно 5x5x5 метров. Для более точного расчёта вблизи плоскостей расчетный блок принят 1x1x1 метр.

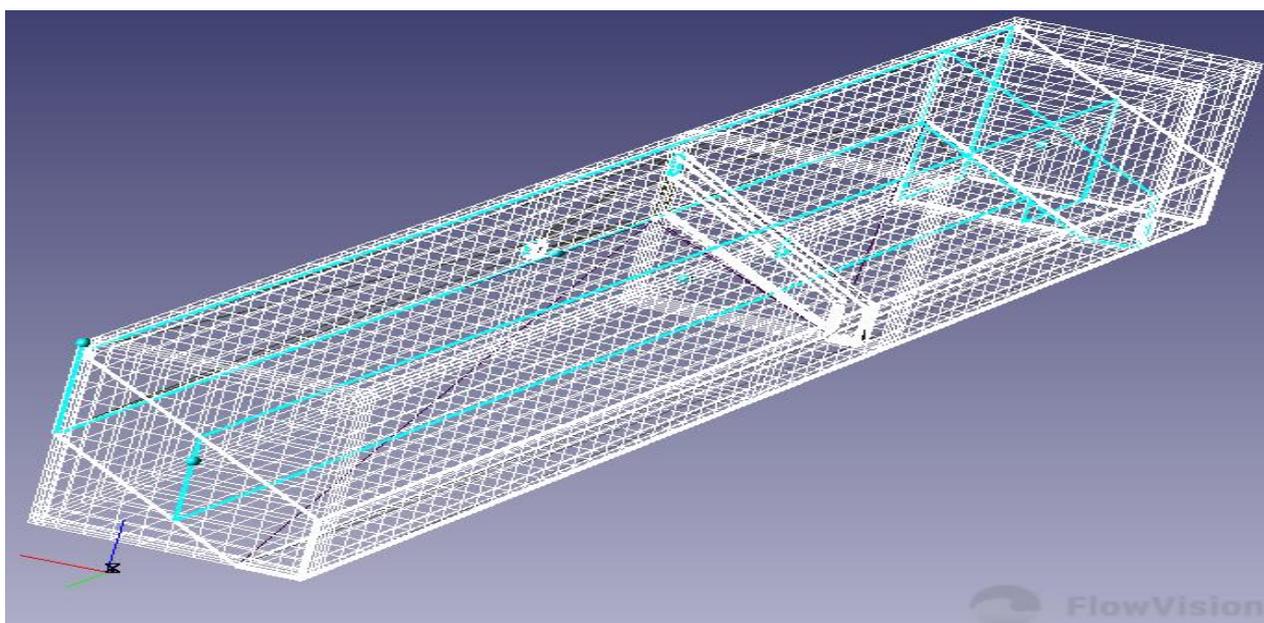


Рисунок 4.4.5 - Расчетная сетка четверти закрытого угольного склада

Программа FlowVision решает систему уравнений для каждого расчётного блока.

Давление воздуха определяется в общем виде с помощью системы уравнений Навье-Стокса (4.4.1):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_{\text{мет}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\text{мет}} \cdot V) = 0 \\ \frac{\partial \rho_{\text{мет}} \cdot V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\text{мет}} \cdot V \otimes V) = -\nabla P + \nabla \cdot \hat{\tau}_{eff} + S \end{cases} \quad (4.4.1)$$

где  $t$  - время моделирования, с;

$\nabla$  - оператор Набла;

$V$  - скорость (вектор), м/с;

$\otimes$  - тензорное произведение;

$P$  - давление, Па;

$\hat{\tau}_{eff}$  - тензор вязких напряжений, для ньютоновской жидкости рассчитывается по следующей зависимости (4.4.2):

$$\hat{\tau}_{eff} = (\mu - \mu_{\tau}) \left( 2\hat{e} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot V)\hat{I} \right) \quad (4.4.2)$$

где  $\mu$  - коэффициент молекулярной динамической вязкости, Па·с;

$\mu_{\tau}$  - коэффициент турбулентной молекулярной динамической вязкости, Па·с;

$\hat{I}$  – единичный тензор;

$\hat{e}$  – единичный тензор скоростей деформаций определяется также для каждой ячейки соотношением (4.4.3):

$$\hat{e} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.4.3)$$

$S$  - энтропия, Па(кг/м<sup>3</sup>)<sup>(-g)</sup>, определяется по следующей формуле (4.4.4):

$$S = (\rho - \rho_{hyd}) \cdot g + \rho \cdot B + F_{сопр} \quad (4.4.4)$$

где  $\rho$  – плотность метановоздушной смеси кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{hyd}$  – гидростатическая плотность кг/м<sup>3</sup>;

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

$B$  – сумма кориолисовой и центробежной сил во вращающейся системе координат,  $B = 0$ ;

$F_{\text{сопр}}$  - сила изотропного сопротивления, в нашем случае, для непористой среды.

Расчеты производились при температуре окружающей среды +20 °С, среднем значении потока метана с поверхности угольного штабеля  $6 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>2</sup>с и метаноносностью угля перед загрузкой на склад 15 м<sup>3</sup>/т.

Для этого в программе были заданы следующие параметры:

- моделирующие вещества – метан (состояние газ) и воздух (газ).
  - фазы - метан и воздух.
  - физические процессы: движение – модель Навье-Стокса; массоперенос – перемешивание, модель турбулентности SST (для малоскоростных процессов).
- Параметры веществ определяются FlowVision исходя из заданных опорных величин.

Для установления закономерностей распределения концентрации метана по объему склада были выбраны точки 0-10, расположенные через каждые 30 м от воздуховыводящей трубы по направлению к воздухоподающим проемам (рисунок 4.4.6). Координаты точек приведены в таблице 4.4.1.

Таблица 4.4.1 - Координаты точек замера концентрации метана

Координата	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11
X	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Y	-326	-256	-386	-416	-446	-476	-506	-536	-566	-596	-626
Z	46	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43

Моделирование процесса переноса газовой примеси для заданных параметров осуществлялось в течение 15 часов до момента стабилизации концентрации метана в объеме склада. Распределение массовых долей метана приведено на рисунке 4.4.6.

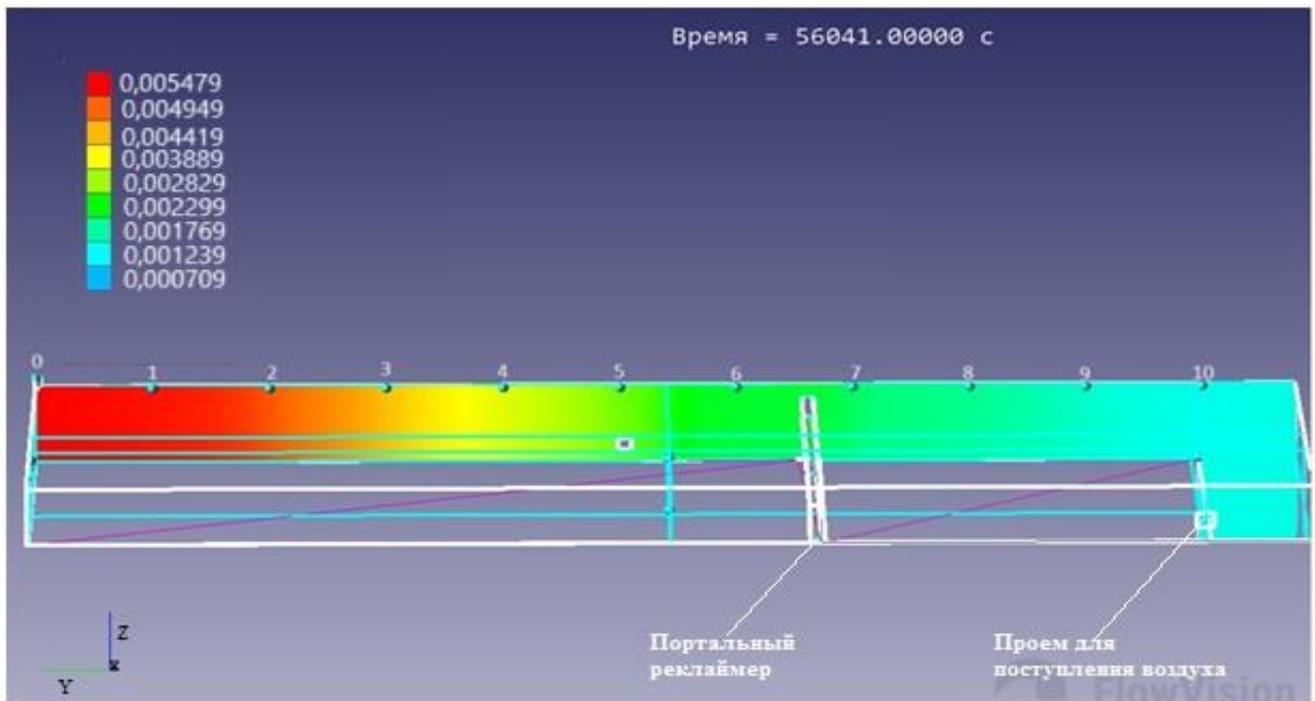


Рисунок 4.4.6 - Массовые доли метана и расположение точек замера

Максимальные значения концентрации метана 0,99 % (0,005479 по цветовой шкале), преобладающие вблизи воздуховыводящей трубы, объясняются постепенным накоплением метана при вращательном движении воздушных масс над поверхностью угля, выделяющей метан.

Несмотря на то, что концентрация метана на входе в свежей струе воздуха (точка 10) должна быть равной 0, значение в этой точке = 0,32 % объясняется возникновением вихрей воздуха, способствующих интенсивному переносу метана и перемешиванию метана с воздухом около входа воздушной струи. Более того, характер движения воздушного потока с учетом размещаемого угольного сырья и влияния погрузо-разгрузочной техники на траекторию движения – турбулентный. Распределение потоков движения воздушных масс представлено на рисунке 4.4.7.



Рисунок 4.4.7 - Распределение потоков движения воздушных масс

Согласно расчетам, рост концентрации метана до 0,99% происходит до ее выхода на квазистационарные значения в течение  $\sim 45000$  сек., что соответствует 12,5 часам хранения угля на складе [15].

График, иллюстрирующий изменения концентрации метана от времени в различных точках пространства закрытого склада, представлен на рисунке 4.4.8.

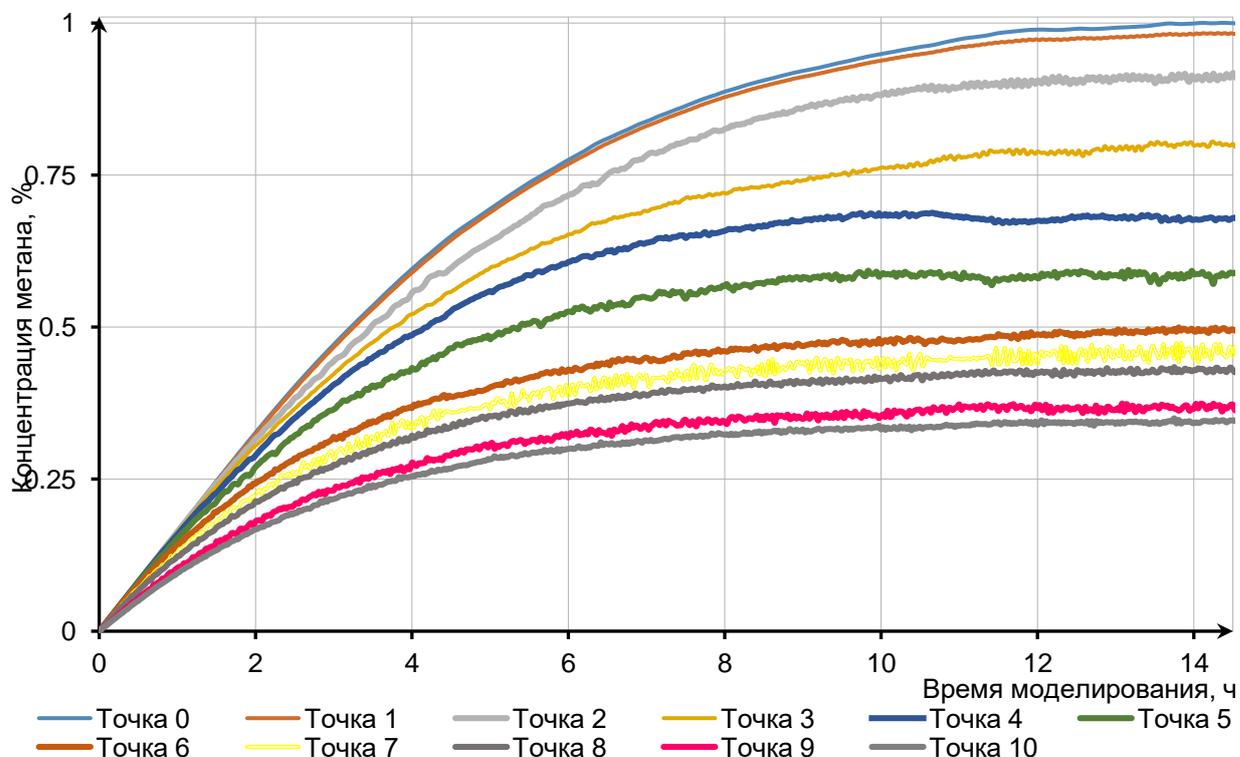


Рисунок 4.4.8 - График зависимости изменения концентрации метана в различных точках пространства закрытого склада от продолжительности моделирования

Таким образом, с учетом нестационарного характера движения и сложной аэродинамикой воздушного потока, расход воздуха, требуемый для обеспечения безопасности на складе закрытого типа по метановому фактору составит  $48 \text{ м}^3/\text{с}$ . Удовлетворительное совпадение данных аналитических расчетов с результатами математического моделирования (расхождение 6%), подтверждает правомерность использованных при разработке математической модели допущений.

#### 4.5 Методика расчета параметров системы вентиляции закрытого угольного склада

Обеспечение нормативных значений концентрации пыли и газов в объеме закрытого склада производится за счет их разбавления воздушным потоком, образующемся от работы вентиляции: естественной и искусственной. Согласно [66] в складах закрытого типа должен обеспечиваться постоянный естественный воздухообмен посредством устройства приточно-вытяжной вентиляции, обеспечивающей приток воздуха за счет специальных проемов. Создаваемая вследствие протекания процесса окисления угля и передачи тепла в воздушное пространство склада разность температур атмосферного воздуха  $t_{ат}$  и воздуха внутри склада  $t_k$  способствует естественной протяжке воздуха в объеме закрытого склада. Схематическое изображение закрытого угольного склада с направлением движения воздушных масс согласно модели приточно-вытяжной вентиляции, приведено на рисунке 4.5.1.

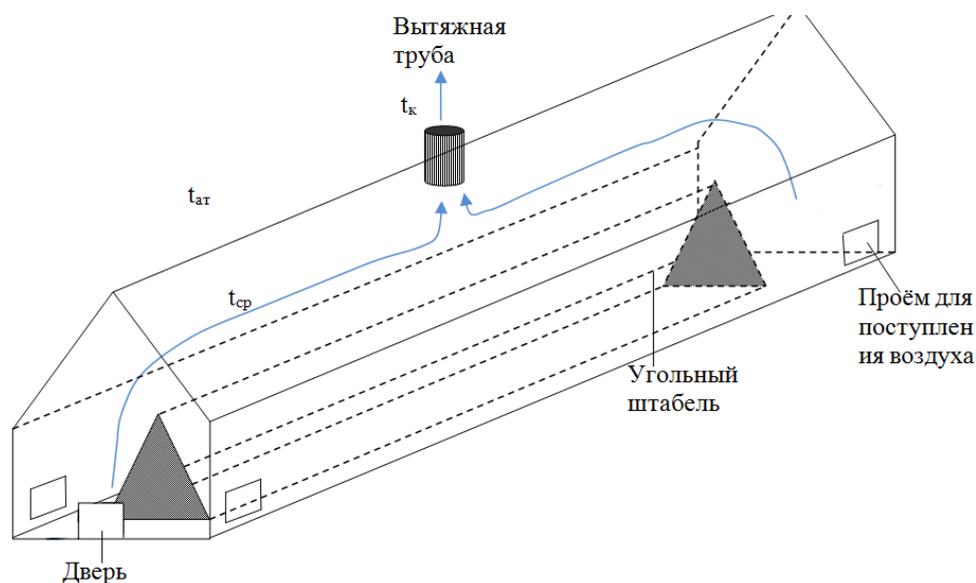


Рисунок 4.5.1 - Схематическое изображение закрытого угольного склада

Для определения значения воздухообмена за счет естественной тяги  $Q_0$  необходимо составить уравнение теплового баланса угля, складываемого в закрытом хранилище, которое может быть представлено в виде (4.5.1):

$$2 \cdot C_p \cdot Q_0 \cdot \rho_{\text{атм}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{ат}}) = q_{\text{ок}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}} + K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{ат}}) + K_{\tau} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{ат}}) \quad (4.5.1)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха, равная 1005 Дж/кг °С [30];

$\rho_{\text{атм}}$  – плотность атмосферного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$Q_0$  – расход воздуха за счет естественной тяги, м<sup>3</sup>/с;

$t_{\text{ср}}$  – средняя температура воздуха в закрытом складе, °С;

$t_{\text{ат}}$  – температура атмосферного воздуха, °С;

$q_{\text{ок}}$  – интенсивность тепловыделения от окисления угля, 3,5-4,5 Вт/м<sup>2</sup> [30];

$K_{\text{теп}}$  – коэффициент теплопередачи от воздуха в складе к атмосферному воздуху, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$S_{\text{бок}}$  – боковая поверхность закрытого склада, м<sup>2</sup>;

$K_{\tau}$  – коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$t_{\text{уг}}$  – температура угля после транспортировки, °С.

Средняя температура воздуха в закрытом складе ориентировочно определяется как средняя между температурой атмосферного воздуха и температурой на выходе из трубы склада. Тогда, из уравнения 4.5.1 выразим среднюю температуру воздуха внутри склада и получим (4.5.2):

$$t_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{ок}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}} + 2 \cdot Q_0 \cdot \rho_{\text{атм}} C_p \cdot t_{\text{ат}} - K_{\tau} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}} \cdot t_{\text{уг}} + K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}} \cdot t_{\text{ат}}}{2C_p \cdot \rho_{\text{атм}} \cdot Q_0 + K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}} - K_{\tau} \cdot F_{\text{пов}}} \quad (4.5.2)$$

С другой стороны, среднюю температуру можно определить из выражения естественной тяги (формула 4.5.3), величина которой будет, с одной стороны, определяться разностью плотностей наружного воздуха и воздуха в складе, а с другой – количеством воздуха и сопротивлением сети.

$$h_e = g \cdot h \cdot (\rho_{\text{ср}} - \rho_{\text{ат}}) = R_{\text{скл}} \cdot Q_0^2 \quad (4.5.3)$$

где  $h$  – высота от проема, в который поступает воздух до конца трубы, м;

$\rho_{\text{ср}}$  – средняя плотность воздуха внутри склада, кг/м<sup>3</sup>.

$R_{\text{скл}}$  - общее сопротивление сети в складе, определяемое соотношением (4.5.4):

$$R_{\text{скл}} = 0,25 \cdot R_{\text{пр}} + 4 \cdot R_{\text{тр}} \quad (4.5.4)$$

где  $R_{\text{пр}}$  – общее сопротивление воздуха проема,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ ;

$R_{\text{тр}}$  – общее сопротивление воздуха вентиляционной трубы,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ .

Подставив в уравнение 4.5.3 формулу для определения средней плотности воздуха, получим следующее уравнение (4.5.5):

$$t_{\text{ср}} = \frac{0,461 \cdot P_6 \cdot g \cdot h}{\rho_{\text{ат}} \cdot g \cdot h - R_{\text{скл}} \cdot Q_0^2} - 273 \quad (4.5.5)$$

где  $P_6$  – давление, мм.рт.ст.

Приравняв части уравнения 4.5.2 и уравнения 4.5.5 получим следующее уравнение (4.5.6):

$$\begin{aligned} Q_0^3 + \left( \frac{q_{\text{ок}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}} + K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}} \cdot T_{\text{ат}}}{2C_p \cdot \rho_{\text{атм}} \cdot T_{\text{ат}}} \right) \cdot Q_0^2 + \\ + \left( \frac{2 \cdot \rho_{\text{ат}} \cdot g \cdot h \cdot T_{\text{ат}} - 0,93 \cdot P_6 \cdot g \cdot h}{2 \cdot R_{\text{скл}} \cdot T_{\text{ат}}} \right) \cdot Q_0 + \\ + \frac{q_{\text{ок}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}} \cdot \rho_{\text{ат}} \cdot g \cdot h + -0,461 \cdot P_6 \cdot g \cdot h \cdot K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}}}{2 \cdot R_{\text{скл}} \cdot T_{\text{ат}}} + \\ + \frac{\rho_{\text{ат}} \cdot g \cdot h \cdot K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}} \cdot T_{\text{ат}}}{2 \cdot R_{\text{скл}} \cdot T_{\text{ат}}} = 0 \end{aligned} \quad (4.5.6)$$

где  $T_{\text{ат}} = t_{\text{ат}} + 273$

Для упрощения вычислений введем следующие переменные (4.5.7), (4.5.8) и (4.5.9):

$$a = \frac{q_{\text{ок}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}} + K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}} \cdot T_{\text{ат}}}{2C_p \cdot \rho_{\text{атм}} \cdot T_{\text{ат}}}, \quad (4.5.7)$$

$$b = \frac{2 \cdot \rho_{\text{ат}} \cdot g \cdot h \cdot T_{\text{ат}} - 0,93 \cdot P_6 \cdot g \cdot h}{2 \cdot R_{\text{скл}} \cdot T_{\text{ат}}}, \quad (4.5.8)$$

$$\begin{aligned} c = \frac{q_{\text{ок}} \cdot F_{\text{пов}}^{\text{штаб}} \cdot \rho_{\text{ат}} \cdot g \cdot h + -0,461 \cdot P_6 \cdot g \cdot h \cdot K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}}}{2 \cdot R_{\text{скл}} \cdot T_{\text{ат}}} + \\ + \frac{\rho_{\text{ат}} \cdot g \cdot h \cdot K_{\text{теп}} \cdot S_{\text{бок}} \cdot T_{\text{ат}}}{2 \cdot R_{\text{скл}} \cdot T_{\text{ат}}} \end{aligned} \quad (4.5.9)$$

Тогда уравнение 4.5.6 будет иметь следующий вид (4.5.10):

$$Q_0^3 + a \cdot Q_0^2 + b \cdot Q_0 + c = 0 \quad (4.5.10)$$

Следовательно, определение значение расхода воздуха за счет естественной тяги сводится к решению кубического уравнения методом Кардано (4.5.11):

$$Q_0 = \sqrt[3]{-0,5q + \sqrt{F}} + \sqrt[3]{-0,5q - \sqrt{F}} \quad (4.5.11)$$

Согласно результатам расчетов, количество воздуха, поступающее за счет естественного проветривания, будет в диапазоне от 8,9 до 11,2 м<sup>3</sup>/с в зависимости от величины окисления угля и температуры окружающей среды (рисунок 4.5.2).

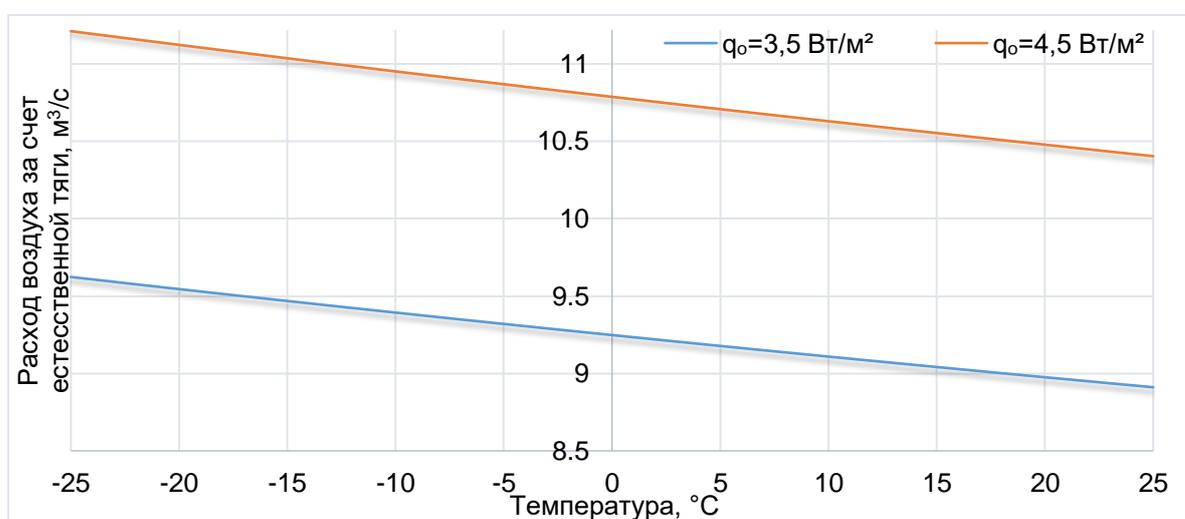


Рисунок 4.5.2 – График зависимости расхода воздуха за счет естественной тяги от величины окисления угля и температуры окружающей среды

Таким образом, обеспечение нормативных значений только за счет естественной вентиляции не представляется возможным. Для достижения требуемых параметров воздухообмена и обеспечения безопасности персонала и самого склада, необходимо применение систем искусственной вентиляции.

Для оценки влияния метановыделений из угля на количество воздуха, необходимо для подачи в закрытый угольный построен график зависимости требуемого расхода воздуха с учетом естественной вентиляции от величины метаноносности угля перед загрузкой на склад (рисунок 4.5.3).

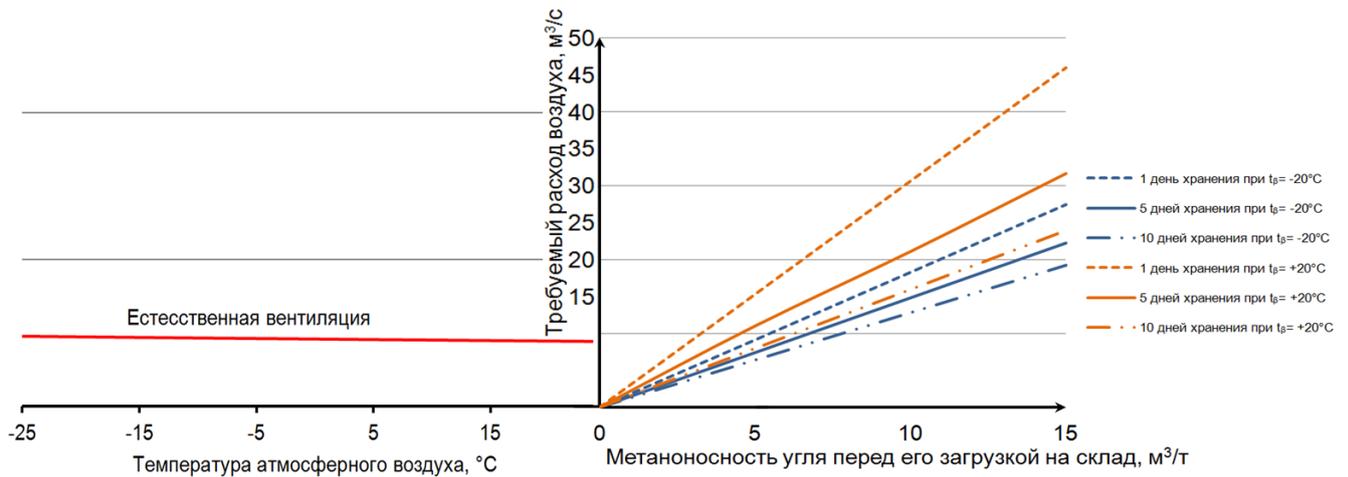


Рисунок 4.5.3 – Влияние метановыделений из угля на количество воздуха, необходимого для подачи в закрытый угольный склад

Выбор оптимального решения зависит от размеров склада, его конструкции, климатических условий региона и объема размещаемого угля. В случае крупных угольных складов, более целесообразно применение сложных систем вентиляции, включающих механическое перемешивание воздуха. Это позволит предотвратить образование зон застоя, где может скапливаться газ. Такие системы могут включать в себя сеть воздуховодов, распределённых по всему объёму склада, и мощные вентиляторы, обеспечивающие равномерное распределение воздуха. Для эффективного перемешивания и предотвращения образования "мёртвых зон", могут использоваться специальные аэродинамические элементы, например, дефлекторы или распределители потока.

С учетом известного расхода воздуха в складе, можно определить концентрацию угольной пыли по известной формуле. Для рассматриваемого объема склада и штабеля угля движение воздушного потока в объеме закрытого склада, вызванное работой комбинированной системы вентиляции, обеспечивающая расход 48 м³/с, происходит со скоростью менее 1 м/с, что не приводит к значительному пылению с поверхности угольного штабеля.

Для оценки распределения концентрации пыли в объеме склада было выполнено 2D моделирование суммарного рассеивания угольной пыли со скоростью движения воздуха внутри склада 1 м/с на различной высоте. Для

удобства вычислений и лучшей визуализации угольный склад был разделен пополам на две равные части. Полученные данные приведены на рисунке 4.5.4.

Согласно полученным данным, концентрация угольной пыли в воздушном пространстве склада не будет превышать предельно-допустимые значения. Также можно отметить, что концентрация угольной пыли в воздухе рабочей зоны (2 м от пола) будет снижаться с увеличением высоты угольного штабеля. Это можно объяснить тем, что с увеличением объема угольного штабеля уменьшается объем воздуха на складе, не занятый углем. В то же время, витающая в воздухе пыль будет быстрее оседать на поверхности угольного штабеля ввиду увеличения его высоты.

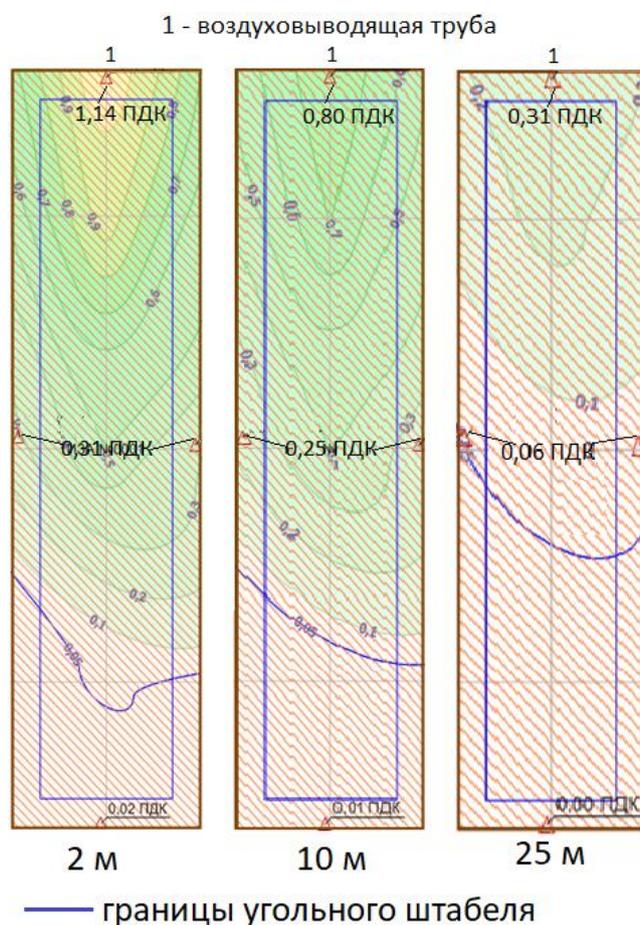


Рисунок 4.5.4 – Результаты моделирования по распределению концентрации угольной пыли в объеме закрытого склада

В случае более высокой скорости потока, это явление – так называемое ветровое (или воздушное) выветривание может усилиться многократно, повышая концентрацию взвешенной угольной пыли в воздушном объеме закрытого склада.

Тогда, для обеспечения безопасности персонала, необходимо использовать системы пылеулавливания с последующей очисткой воздуха перед его выбросом в атмосферу. Эти системы могут включать в себя циклоны, рукавные фильтры, электрофильтры и другие устройства, выбор которых зависит от концентрации и дисперсного состава пыли. Без таких систем, экологическое воздействие закрытого склада будет сопоставимо, а иногда, и превосходить воздействие открытых складов.

#### 4.6 Выводы по главе 4

1. Интенсивность выхода метана в период транспортирования угля до складов промежуточного хранения в значительной степени связана с эффективным коэффициентом диффузии метана, который, в свою очередь, зависит от температуры угольной массы. Так по результатам исследований с повышением температуры угля скорость десорбции метана из угольных отдельностей будет также увеличиваться, что приведет к более быстрому дегазированию угольной массы при ее транспортировке в летний период по сравнению с зимним периодом примерно в 1,7 раз.

2. Метановая обстановка в воздухе закрытого угольного склада будет зависеть от продолжительности складирования и метаноносности угля после транспортировки.

3. Величина расхода воздуха, необходимого для разбавления концентрации метана в закрытом складе до 1%, связана со значением метаноносности угля перед его погрузкой на склад. Так, для поддержания нормативной концентрации метана в воздухе в течение 5 дней при остаточной газоносности 15 м<sup>3</sup>/т необходимый расход воздуха для зимнего периода составит 15 м<sup>3</sup>/с, а летом – 20 м<sup>3</sup>/с.

4. Результаты математического моделирования процессов распространения метана в замкнутом объеме, учитывающие сложную аэродинамику потока, сопоставимы с данными аналитической методики расчета (расхождение 6%).

5. Снижение концентрации метана в воздушной среде склада до безопасных значений должно осуществляться на как основе естественной вентиляции (за счет

специальных проемов с торцевой части склада), так и с применением вынужденной вентиляции.

6. 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. При этом концентрация угольной пыли в воздухе рабочей зоны (2 м от пола) будет снижаться с увеличением высоты угольного штабеля.

## 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. На основе экспериментальных и теоретических исследований выполнено компьютерное моделирование аэрогазодинамических процессов в воздушном пространстве закрытого угольного склада, позволяющее определить значение расхода воздуха, требуемого для обеспечения безопасности закрытого угольного склада. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности размещения угольной продукции в складах закрытого типа даже в случае сохранения некоторого значения газоносности угля.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Размещение угольной продукции в закрытых складах следует считать кардинальным способом предотвращения негативного аэротехногенного воздействия на окружающую среду.

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

3. 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.

4. Удовлетворительное совпадение данных аналитических расчётов с результатами математического моделирования (расхождение относительно

расхода воздуха не превышает 6%) подтверждает правомерность допущений, использованных при выводе приближенной зависимости.

5. 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.

6. При выборе способов вентиляции закрытого склада следует определять возможности проветривания за счёт естественной тяги и совместного использования естественной и искусственной вентиляции.

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 в воздушном пространстве закрытого склада метана, в зависимости от начальной газоносности угля, время транспортировки, температуры окружающей среды, геометрических параметров склада.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адельсон, С.В. Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии М.: Госопттехиздат. - 1963. - 311 с.
2. Активация диффузии метана в угле под воздействием изменяющихся механических и термодинамических параметров пласта / Г.П. Стариков, В.М. Юрченко, Т.Н. Мельник [и др.] // Физика и техника высоких давлений. - 2019. - № 3. - С. 122-130.
3. Алексеев, А.Д. Десорбция метана из угля в замкнутый объем / А.Д. Алексеев, Э.П. Фельдман, Т.А. Василенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - № 13. - С. 42–53.
4. Алексеев, А.Д. Оценка энергии связи молекул метана с угольным веществом в твердом растворе / А.Д. Алексеев, Т.А. Василенко, Э.П. Фельдман // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2000. - № 7. - С. 206-209.
5. Алексеев, А.Д. Физическое состояние метана в ископаемом угле в аспекте его извлечения / А.Д. Алексеев, А.Н. Молчанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - № 12. - С. 112-121.
6. Астафуров, Н.А. Транспортировка угля в России / Н.А. Астафуров // Научный форум. Сибирь. (Тюмень, декабрь 2015) - 2015. - №. 1. - С. 84-85.
7. Виниченко, Е.В. Влияние открытых угольных складов и станций углепогрузки на окружающую среду. Пути решения / Е.В. Виниченко // Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. - 2024. - № 4. - С. 61-64. DOI: 10.25558/VOSTNIИ.2024.53.33.009
8. Влияние термообработки на механические и физико-химические свойства углей разных генотипов / С.А. Эпштейн, В.Г. Нестерова, В.И. Минаев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - №5.- С. 371-375.
9. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока / Смирняков В.В., Родионов В. А., Смирнякова В. В. [и др.] // Записки Горного института. - 2022. - Т. 253. - С. 71-81. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

10. Ворошилов, Я. С. Обзор состояния условий труда на угольных предприятиях и совершенствование методов определения запыленности воздуха для снижения уровня профессионального риска / Я. С. Ворошилов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2018: Материалы XVII Международной научно-практической конференции, Кемерово, 22–23 ноября 2018 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2018. – С. 106.1-106.6. – EDN YYZGSD.
11. Восточно-уральский терминал [Электронный ресурс]. – 2024. URL: <https://portvut.ru/perevalka-gruzov> (дата обращения 07.02.2025)
12. Гайдаров, Б.А. Обзор основных характеристик экспериментальных методов измерения коэффициента диффузии метана угольных пластов / Б.А. Гайдаров // Труды института геологии дагестанского научного центра РАН. – 2022. - № 4 (91). - С. 24-31. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-24-31.
13. Гендлер, С.Г. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях / С.Г. Гендлер, Т.А. Василенко, **А.Ю. Степанцова** // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 9-1. - С. 135 – 148. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_135
14. 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
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. Гончаров, Е.В. Геодинамические методы оценки распределения метана в каменноугольных месторождениях и мероприятия по интенсификации метанопритоков при скважинных методах дегазации / Е.В. Гончаров, С.В. Цирель // Записки Горного института. - 2016. - Т. 222. - С. 803-808. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.803

19. ГОСТ 11014-2001 «Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы»; введен 01.01.2003.

20. Грибовский, Г.В. Обзор методик по определению коэффициента теплообмена для различных поверхностей в условиях ММГ / Г.В. Грибовский, М.Ю. Шупляков // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. Под редакцией Р.Г. Мотенко. М., "Добросвет". - 2022. - С. 595-599.

21. Гусев, Ю.И. Конструирование и расчет машин химических производств: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Химическое машиностроение и аппаратостроение» / Ю.И. Гусев, И.Н. Карасев, Э.Э. Кольман-Иванов - М.: Машиностроение, 1985. - 408 с.

22. Демченко, В.Б. Исследования гравитационного расслоения метано-воздушной смеси / В.Б. Демченко, В.Г. Колесников // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2001. - № 1. - С. 101-103.

23. Департамент угольной промышленности министерства энергетики Российской Федерации: Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля. – Пермь, 2003. 115 с.

24. Забурдяев, В.С. Шахтный метан и угольная пыль: формирование взрывоопасных ситуаций / В.С. Забурдяев, С.Н. Подображин, В.В. Скатов // Безопасность труда в промышленности. - 2016. - № 2. - С. 42-46.

25. Зависимость формы зерен и физико-технических свойств щебня от способа дезинтеграции [Электронный ресурс] – URL: [http://www.tempspb.su/sites/default/files/zavisimost\\_fizicheskikh\\_svoystv\\_shchebnya\\_ot\\_sposoba\\_drobleniya.pdf](http://www.tempspb.su/sites/default/files/zavisimost_fizicheskikh_svoystv_shchebnya_ot_sposoba_drobleniya.pdf) (дата обращения 07.02.2025)

26. Ильин, В.В. Обоснование методики выбора крытых заглубленных складов и основной перегрузочной машины на балкерных терминалах / В.В. Ильин // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 04 апреля 2019 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. – С. 86-89.

27. Исследование иерархической структуры пор ископаемых углей неразрушающими методами / Т.А. Василенко, А.Х. Исламов, А.К. Кириллов, [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № S 49. - С. 33-48. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-33-48

28. Исследование содержания метана в почвенном воздухе в области выхода под наносы геологических нарушений / Т.А. Василенко, Н.И. Волошина, И.Е. Кольчик [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2016. - № 7. - С. 159-166.

29. Исследование физико-химических свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности в угольных шахтах / А.В. Корнев, А.А. Спицын, Л.А. Займенцева [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 9-1. - С. 180-198. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_180.

30. Источники тепла в подземных выработках [Электронный ресурс] - 2015. URL: <https://helpiks.org/4-36579.html> (дата обращения 07.02.2025)

31. Калугина, Н.А. Взаимное влияние диффузии и фильтрации в процессе истечения метана из угольного массива / Н.А. Калугина // Физика и техника высоких давлений. - 2010. - Т.20, № 3. - С. 140-149.

32. Карта угольных бассейнов России [Электронный ресурс]. - 2024. URL: <https://darminaopel.ru/library/karta-ugolnyh-bassejnov-rossii.html> (дата обращения 07.02.2025)
33. Клейн, Г.К. Строительная механика сыпучих тел. М.: Изд. 2-е, Стройиздат. - 1977. - 256 с.
34. Корнев, А.В. Роль пылевого фактора в вопросах обеспечения промышленной безопасности и охраны труда на предприятиях угледобывающей отрасли / А.В. Корнев, М.В. Корнева, А.М. Сафина // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - № S60-2. - С. 322-334.
35. Коршунов, Г.И. Исследование и анализ источников выделения респираторной фракции пыли на угольных разрезах / Г.И. Коршунов, А.М. Сафина, А.М. Каримов // Безопасность труда в промышленности. - 2021. - № 10. - С. 65-70. DOI:10.24000/0409-2961-2021-10-65-70
36. Коршунов, Г.И. Разработка способа снижения выделения респираторной фракции пыли в атмосферу разреза за счет рекультивации пылящих источников / Г.И. Коршунов, А.А. Спицын, В.А. Баженова // Безопасность труда в промышленности. - 2022. - №6. - С. 27-32. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-27-32.
37. Костюничев, Д.Н. Оценка работоспособности сетчатых экранов по снижению пылевых выбросов сыпучих грузов с открытых складов портов / Д.Н. Костюничев, Н.С. Отделкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2024. – Т 16. – №. 1. – С. 55-63. DOI:10.21821/2309-5180-2024-16-1-55-63
38. Кривенко, С.В. Дискретная модель слоя сыпучего материала из зерен любых форм / С.В. Кривенко, О.В. Кривенко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: технические науки. - 2004. №14. - С. 1-4.
39. Кривопишина, М.Е. Рациональное оснащение терминала морского порта для экспортного угля / М.Е. Кривопишина // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. - 2021. - № 1. - С. 86-90.
40. Кудряков, О.В. Инженерно-физический метод определения

теплопроводности объектов микрометрической толщины со сложной структурой / О.В. Кудряков, В.Н. Варавка, Л.П. Арефьева // Безопасность техногенных и природных систем. - 2023. - № 2. - С. 80-89. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-80-89

41. Кузнецов, С.В. Основные положения и характерные особенности фильтрации газа в угольных пластах / С.В. Кузнецов, В.А. Трофимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2000. - №8. - С. 79-84.

42. Лехнер, М.В. Способ определения объемного коэффициента теплоотдачи пористых материалов в теплообменных каналах / М.В. Лехнер, А.А. Добров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2023. - №. 1 (140). - С. 53-59. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_1\_53

43. Литвишков, Ю.Н. О физическом смысле параметров уравнения Аррениуса / Ю.Н. Литвишков // Kimya Problemleri. - 2019. - Т. 17, № 3. - С. 456-464. DOI 10.32737/2221-8688-2019-3-456-464. – EDN ENPOUU.

44. Мазуренко, О.И. Методика Расчета показателей работы проектируемых морских экспортных угольных терминалов на основе имитационной модели / О.И. Мазуренко, И.А. Русинов, С.С. Павленко // Транспортное дело России. - 2022. - № 4. - С. 181-188. – DOI 10.52375/20728689\_2022\_4\_181.

45. Майорова, Л.П. Моделирование распространения взвеси угольной пыли при хранении и погрузочно-разгрузочных работах в портах (на примере порта Ванино) / Л.П. Майорова, А.И. Лукьянов, Е.В. Дахова // Инновации и инвестиции. - 2021. - №7. - С. 89-94.

46. Массоперенос метана в угле, обусловленный совместной фильтрацией и диффузией / А.Д. Алексеев, Э.П. Фельдман, Т.А. Василенко [и др.] // Физика и техника высоких давлений. - 2004. - Т. 14, № 3. - С. 107-118.

47. Математическая модель поведения воздушных потоков на территории открытых угольных складов / С.Н. Сикарев, Е.И. Адамов, С.Г. Смирнов, [и др.] // Научные проблемы водного транспорта. - 2020. - № 62. - С. 20-26. DOI: 10.37890/jwt.vi62.37

48. Методика исследования аэродинамических свойств каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных выработках / В.А. Родионов, В.Д. Цыганков, С.Я. Жихарев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - № 10. - С. 69-79. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_69.
49. Методика оценки ветровой эрозии и пыления угольного штабеля ТЭС РД 153-34.0-02.107-98 [Утверждена Первым заместителем начальника Департамента стратегии развития и научно-технической политики РАО "ЕЭС России" А.П. Берсеневым 15.12.1998 г.] - 1998. - 4 с.
50. Мешков, Г.Б. Итоги работы угольной промышленности России за январь-июнь 2024 года / Г.Б. Мешков, И.Е. Петренко, Д.А. Губанов // Уголь. - 2024. - № 9. С. 5-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-6-5-13>
51. Миснар А. Теплопроводность твёрдых тел, жидкостей газов и их композиций. М.: «Мир». - 1968. - 459 с.
52. Михиев, М.А. Основы теплопередачи / Михиев М.А., Михиева И.М // М.: Энергия. - 1973. - 320 с.
53. Молотилов, С.Г. Интенсификация погрузочно-транспортных работ на угольных складах / С.Г. Молотилов, О.Б. Кортелев, В.К. Норри // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2005. - № 2. - С. 197-200.
54. Московская, И.В. Анализ эффективности применения ветропылезащитных экранов на открытых складах угольных терминалов / И.В. Московская, Л.П. Лазарева // Евразийский Союз Ученых. - 2015. - № 6-2 (15). - С. 140-144.
55. Новак, А.В. ТЭК России сегодня и завтра: итоги и задачи / А.В. Новак // Энергетическая политика. - 2024. - № 1(192). - С. 6-13. DOI 10.46920/2409-5516\_2024\_1192\_6
56. Носенко, В.Д. Проблема исключения взрывов метана и угольной пыли в шахтах / В.Д. Носенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2016. - № 7. - С. 274-286.

57. О петрографическом методе определения сорбционной способности углей / Х.У. Ли, И.Д. Мащенко, Л.П. Белавенцев, [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. - 2012. - № 1. - С. 31-44.

58. Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции / А.В. Корнев, А.А. Спицын, Г.И. Коршунов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 3. - С. 133-149. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_133.

59. Обоганительной фабрике "Бачатская-Энергетическая" исполнилось 20 лет [Электронный ресурс]. – 2024. URL: <https://profile.ru/news/dk/kru/obogatitelnoj-fabriке-bachatskaya-energeticheskaya-ispolnilos-20-let-1214046/> (дата обращения 07.02.2025)

60. Перминов, В.Ю. Внедрение крытых заглубленных складов на угольных терминалах морских портов Тамань, Ванино, Лавна для повышения экономической рентабельности и экологической безопасности / В.Ю. Перминов, Е.И. Фомин // Социально-экономические аспекты принятия управленческих решений: Материалы пятого научного семинара, Москва, 26 февраля 2021 года. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2021. - С. 22-29.

61. Перспективы применения инфракрасных термогравиметрических влагомеров для определения общей влаги твердого минерального топлива / О.С. Голынец, А.С. Сергеева, Т.А. Никонова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - № S60-2. - С. 118-129.

62. Пожар на крупнейшем в России угольном терминале в порту Тамань [электронный ресурс] <https://www.kuban.kp.ru/daily/27361/4542807/>

63. Портола, В. А. Анализ условий, способствующих развитию процесса самовозгорания в штабелях угля / В.А. Портола, А.Н. Жданов, А.А. Бобровникова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - № 6 (1). - С. 187-197. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_187.

64. Потокина, Р.Р. Исследование взаимосвязей сорбции метана углями печорского угольного бассейна с их физико-химическими свойствами авторефера

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Потокина Роза Равильевна. - Новокузнецк, 2015. - 156 с.

65. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17.04.2019 № 835 «ИТС 46-2019. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сокращение выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ при хранении и складировании товаров (грузов)»

66. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28.10.2020 г. № 428 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при переработке, обогащении и брикетировании углей»: зарегистрировано в Минюсте России 21.12.2020 г.

67. Романченко, С.Б. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок / С.Б. Романченко, Ю.К. Нагановский, А.В. Корнев // Записки Горного института. - 2021. - Т.250. - С. 927-936. DOI:10.31897/PMI.2021.6.14

68. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт [Утверждено Министерством угольной промышленности СССР 15.08.1989 г.] Макеевка-Донбасс- 1989. - 319 с.

69. Руш, Е.А. Перспективные мероприятия, направленные на экологическую защиту при работе с углем на производственных участках терминально-складского комплекса / Е.А. Руш, Н.В. Власова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2023. - №. 2 (78). - С. 20-32. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).20-32

70. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», введен 01.02.2021.

71. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684677 Российская Федерация. Программа для выбора параметров системы вентиляции закрытых угольных складов, обеспечивающих их безопасную

эксплуатацию: № 2023682679: заявл. 01.11.2023: опублик. 17.11.2023 / С.Г. Гендлер, **А.Ю. Степанцова**, А.С. Серегин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – EDN PDDAJI.

72. Скейлинговое представление процесса десорбции метана из природного сорбента / Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, Я.В. Шажко [и др.] // Физика и техника высоких давлений. - 2007. - Т. 17. - № 4. С. - 91-99.

73. Следственное управление следственного комитета [Электронный ресурс] – 2023. URL: <https://kuzbass.sledcom.ru/news/item/1824347> (дата обращения: 13.10.2024)

74. Смирнякова В.В. Оценка условий труда работников угольной промышленности / В.В. Смирнякова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. - 2015. - № 6-4. - С. 98-100.

75. Снижение аэротехногенного воздействия респираторной фракции пыли на персонал карьера при проведении массовых взрывов / Г.И. Коршунов, А.М. Каримов, Г.С. Магомедов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 7. - С. 132-144. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_7\_0\_132.

76. **Степанцова, А. Ю.** Закрытые склады как безопасный способ временного складирования угля / А. Ю. Степанцова // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 453-455. – EDN HSTXUI.

77. **Степанцова, А. Ю.** Исследование динамики остаточной метаноносности каменных углей / А. Ю. Степанцова // Промышленная безопасность и охрана труда: Тезисы докладов I всероссийской научной конференции (с международным участием), Санкт-Петербург, 13–15 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. – С. 128-130. – EDN VSLEMW.

78. **Степанцова, А. Ю.** Исследование параметров массопереноса в каменных углях при изменении температуры окружающей среды / А.Ю. Степанцова // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–27 мая 2023 года / Санкт-Петербургский горный университет. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 225-228. – EDN NMTSRX.

79. **Степанцова, А. Ю.** Определение параметров массопереноса метана в каменных углях / А. Ю. Степанцова // 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. 13. – EDN MDJJMB.

80. Сухотерин, М.В. Устойчивость прямоугольных элементов судовых конструкций при чистом сдвиге / М.В. Сухотерин, А.А. Сосновская, Н.Ф. Пижурина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. - 2024. - № 15. - С. 1054-1065. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1054-1065

81. **Танков, А.М.** Оценка влияния на экологию условий хранения угля в открытых и закрытых угольных складах Кузбасса / А.М. Танков, В.А. Салихов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022: Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, Кемерово, 23–24 ноября 2022 года / Редколлегия: А.А. Хорешок (отв. редактор), А.И. Фомин [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. - С. 116.1-116.5. EDN DZPLFS.

82. Угольная пыль или новые технологии: история вопроса [Электронный ресурс] - 2018. <https://primamedia.ru/news/699003/> (дата обращения 05.04.2024)

83. Угольный терминал [Электронный ресурс]. – 2022. <https://upkprimorsk.com/terminaly/ugolnyj-terminal/> (дата обращения: 13.10.2024)

84. Фейт, Г.Н. Геолого-физические критерии прогноза перспективности дегазации угольных пластов для промышленного извлечения метана / Г.Н. Фейт, О.Н. Малинникова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2001. - № 5. - С. 80-84.
85. Фельдман, Э.П. Фазовые состояния метана в угле и газоносность угольного массива / Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, О.Н. Малинникова // Физико-технические проблемы горного производства. - 2010. - № 13. - С. 74-78.
86. Фельдман, Э.П. Физическая кинетика системы угольный пласт – метан: массоперенос, предвыбросные явления / Э.П. Фельдман, Т.А. Василенко, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2014. - № 3 - С. 46-65.
87. Физика пласта: Учебное пособие / Авт.-сост. Т.Б. Кочина, В.Н. Спиридонова, Н.Н. Родионцев, И.А. Круглов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2017. - 214 с
88. Хохолов, Ю.А. Математическое моделирование теплообменных процессов хранения мерзлого угля на открытых складах / Ю.А. Хохолов, В.Л. Гаврилов, В.И. Федоров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2019. - № 6. - С. 172-182. DOI: 10.15372/FTPRPI20190617
89. Хронология аварий на ТЭЦ, приведших к крупным перебоям теплоснабжения [Электронный ресурс] – 2024. URL: <https://tass.ru/info/20169313> (дата обращения: 07.02.2025)
90. Цой, П.В. Методы расчёта отдельных задач тепломассопереноса. М.: Энергия. - 1971. - 383 с.
91. Черепанов, Р.Ю. Экологическая безопасность на угольном терминале в порту Ванино / Р.Ю. Черепанов, А.С. Соловьев // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: Материалы X Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей, Волгоград, 24–29 апреля 2023 года / Под общей редакцией Н.Ю. Ермиловой, И.Е. Степановой. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет - 2023. - С. 319-320.

92. Чурашѐв, В.Н. Перспективы развития транспортировки угля сибирских месторождений / В.Н. Чурашѐв // ЭКО. - 2015. - №5. - С - 82-98.
93. Шапошник, В.А. Энергии активации ионообменных процессов / В.А. Шапошник // Сорбционные и хроматографические процессы. - 2022. - Т. 22, № 5. - С. 622-629. DOI.org/10.17308/sorp-chrom.2022.22/10683
94. Энергия активации диффузионного процесса метана – характеристика геомеханического состояния угольных пластов / Г.П. Стариков, Т.А. Василенко, Н.И. Волошина [и др.] // Физика и техника высоких давлений. - 2003. - Т. 13, № 4. - С. 107-113.
95. Эттингер, И.Л. Сорбционные свойства ископаемых углей и их роль в процессах газовой выделения в угольных шахтах: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. / Эттингер Иосиф Львович. - Москва, 1969. - 37 с.
96. ЯМР-исследование соотношения свободного и сорбированного метана в порках ископаемых углей / Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, А.Н. Молчанов [и др.] // Химия твердого топлива. - 2018. - № 6. - С. 21-29 DOI: 10.1134/S0023117718050092
97. «Ростерминалуголь» - крупнейший угольный терминал в Европейской части России [Электронный ресурс]. – 2019. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/126996/> (дата обращения 07.02.2025)
98. Afanasev, P.I. Assessment of the Parameters of a Shock Wave on the Wall of an Explosion Cavity with the Refraction of a Detonation Wave of Emulsion Explosives / P.I. Afanasev, K.F. Makhmudov // Applied Sciences. - 2021. - Vol. 9. - № 11. - pp. 1-11. DOI:10.3390/app11093976
99. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia / V.V. Smirnyakov, V.V. Smirnyakova et al. // International Journal of Civil Engineering and Technology. - 2019. - Vol. 10. - pp. 1917-1929.
100. Baltic Coal terminal [Электронный ресурс]. – 2024. URL: <http://www.balticcoal.com/index.php?sid=3&lan=ru> (дата обращения 07.02.2025)

101. Borowski, G. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry / G. Borowski, Y. Smirnov, A. Ivanov, A. Danilov // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. - 2020. - Vol. 1. - pp. 1-13. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177
102. Development of fire safety measures aimed at preventing and responding to spontaneous combustion in brown coal mines / E.B. Gridina, S.V. Kovshov, et al. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2021. - Vol. 6. - pp. 96-101. DOI: 10.33271/nvngu/2020-6/096
103. Dwivedi, K.K. Pyrolysis characteristics and kinetics of Indian low rank coal using thermogravimetric analysis / K.K. Dwivedi, P.K. Chatterjee, M.K. Karmakar, A.K. Pramanick // *International Journal of Coal Science & Technology*. - 2019. - Vol. 6. - pp. 102-112. DOI:10.1007/s40789-019-0236-7
104. Effect of temperature on safety and stability of gas hydrate during coal mine gas storage and transportation / Qiang Wu, Yang Yu, et al. // *Safety Science*. - 2019. - Vol. 118. - pp. 264-272. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.04.034.
105. Experimental study of methane diffusion kinetics in three typical metamorphic coals / Song H., Lin B., et al. // *Fuel*. - 2022. Vol. 311. - pp. 16-23. DOI.org/101016/j/fuel.2021.122601
106. 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*. - 2024. - Vol. 8. - №. 2. - pp. 188-194.
107. Overland, I. The Russian coal industry in an uncertain world: Finally pivoting to Asia? / I. Overland, J. Loginova // *Energy research and Social science*. - 2023. - Vol. 120. pp. 1-9. DOI: org/10.1016/j.erss.2023.103150
108. Permeability of a coal seam with respect to fractal features of pore space of fossil coals / Vasilenko T., Kirillov A., et al. // *Fuel*. - 2022. - № 329 (1). pp. 259-271. DOI:10.1016/j.fuel.2022.125113
109. Thermokinetic characteristics of coal spontaneous combustion based on thermogravimetric analysis /Qing-Wei Li, Yang Xiao, et al. // *Fuel*. - 2019. - Vol. 250. - pp. 235-244. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.003.

110. Unintended mitigation benefits of China's coal de-capacity policies on methane emissions / Jinling Guo, Junlian Gao, et al. / *Energy Policy*. - 2023. - Vol. 181. - pp. 1-12. DOI:10.1016/j.enpol.2023.113718

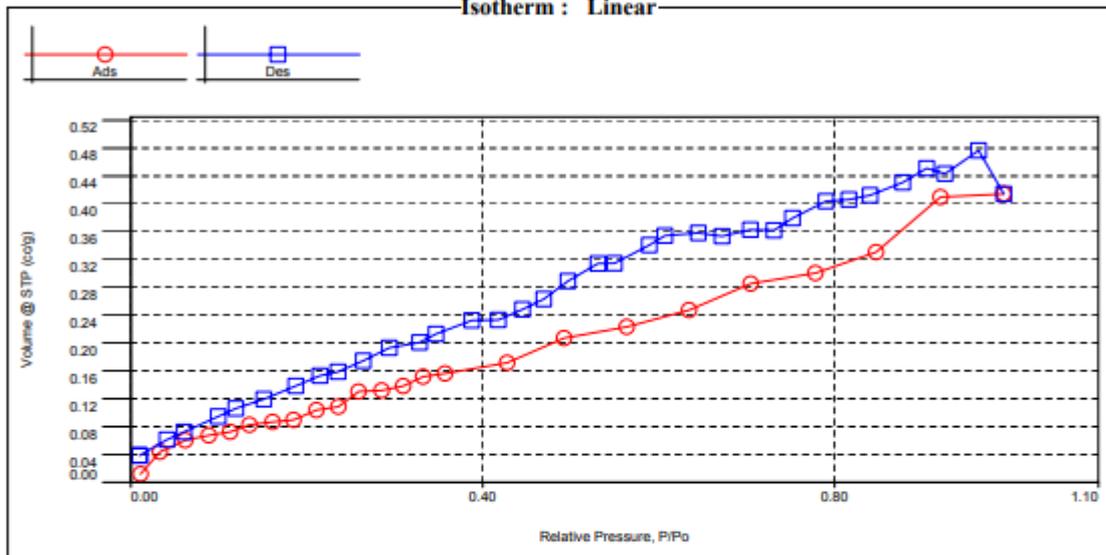
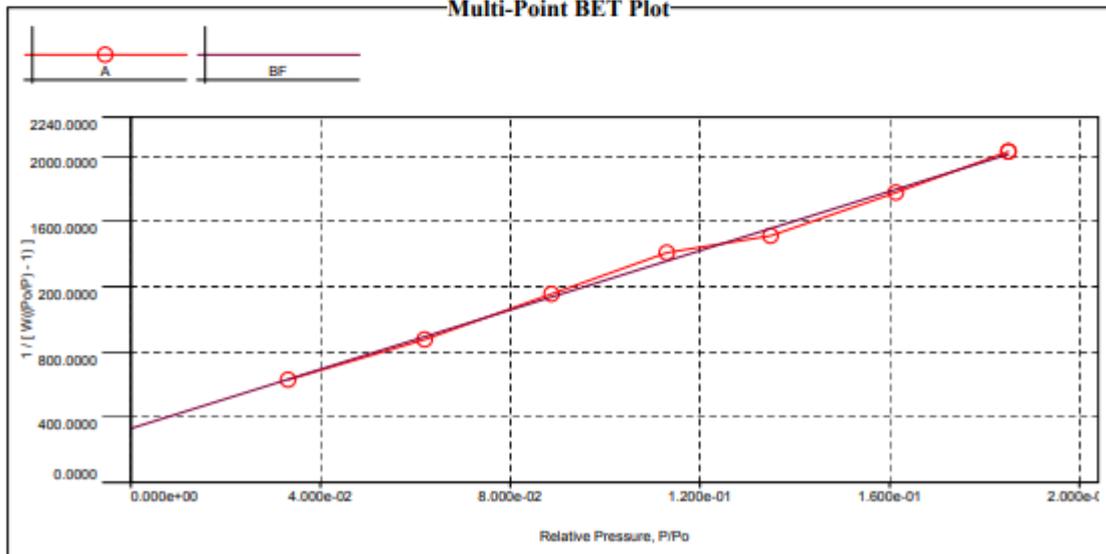
# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Отчет о результатах исследований

**СПб Горный Университет**  
Quantachrome NovaWin ©1994-2013, Quantachrome Instruments v11.03

**Analysis**

**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Спецов  
**Sample Desc:** анализ  
**Sample weight:** 4.1252 g  
**Outgas Time:** 0.0 hrs  
**Analysis gas:** Nitrogen  
**Press. Tolerance:** 0.100/0.100 (ads/des)  
**Analysis Time:** 237.5 min  
**Cell ID:** 3

**Date:** 2023/02/28**Filename:****Comment:****Sample Volume:** 1.05774 cc**Outgas Temp:** 0.0 C**Bath Temp:** 273.0 K**Equil time:** 120/120 sec (ads/des)**End of run:****Report****Operator:** quantachrome**Date:** 2023/03/01**Filename:** Степанцова, уголь (руда).qps**Equil timeout:** 240/240 sec (ads/des)**Instrument:** Nova Station A**Isotherm : Linear****Multi-Point BET Plot**



**Analysis**

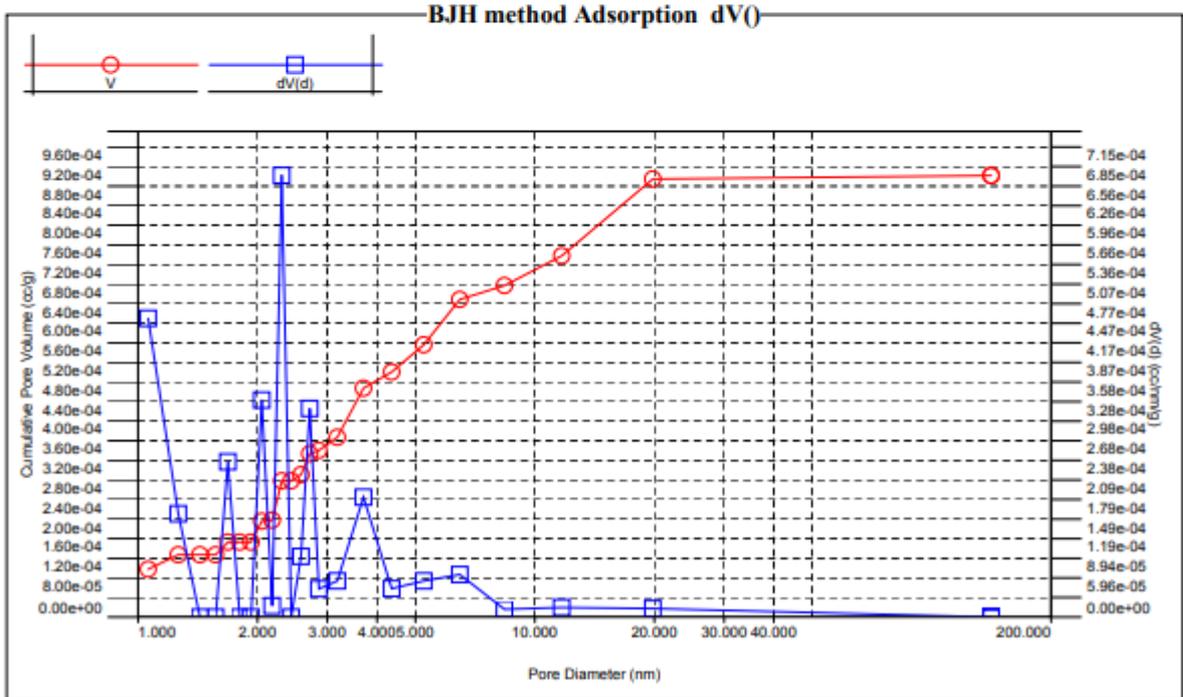
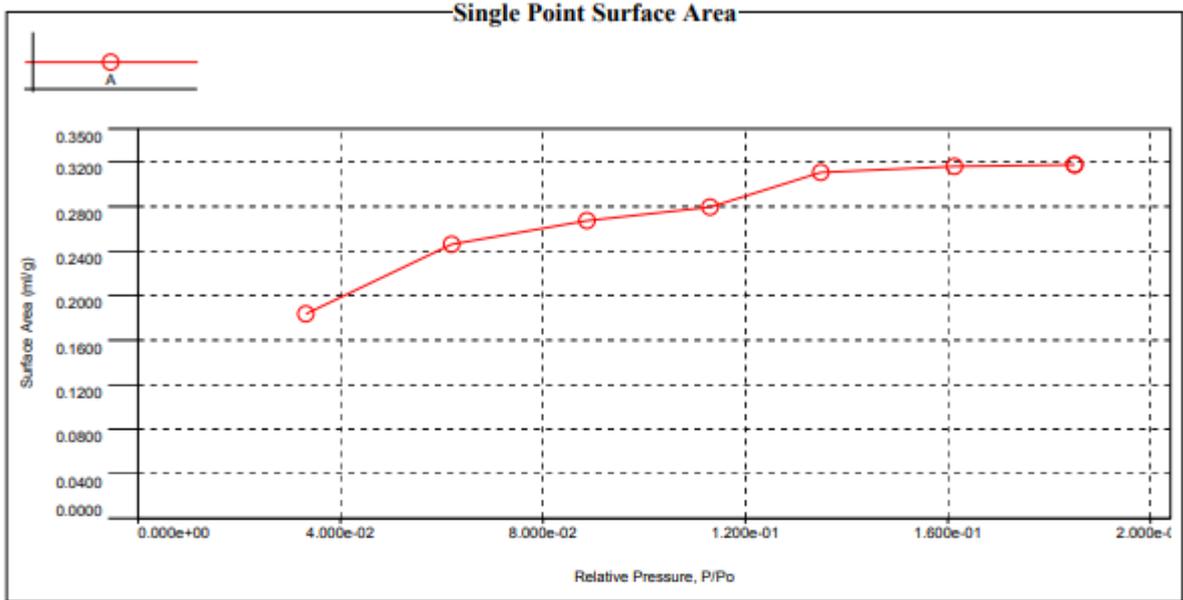
**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Спецов

**Date:** 2023/02/28  
**Filename:**

**Report**

**Operator:** quantachrome  
**Stepanova, уголь (руда).qps**

**Date:** 2023/03/01





**Analysis**

**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Спецов

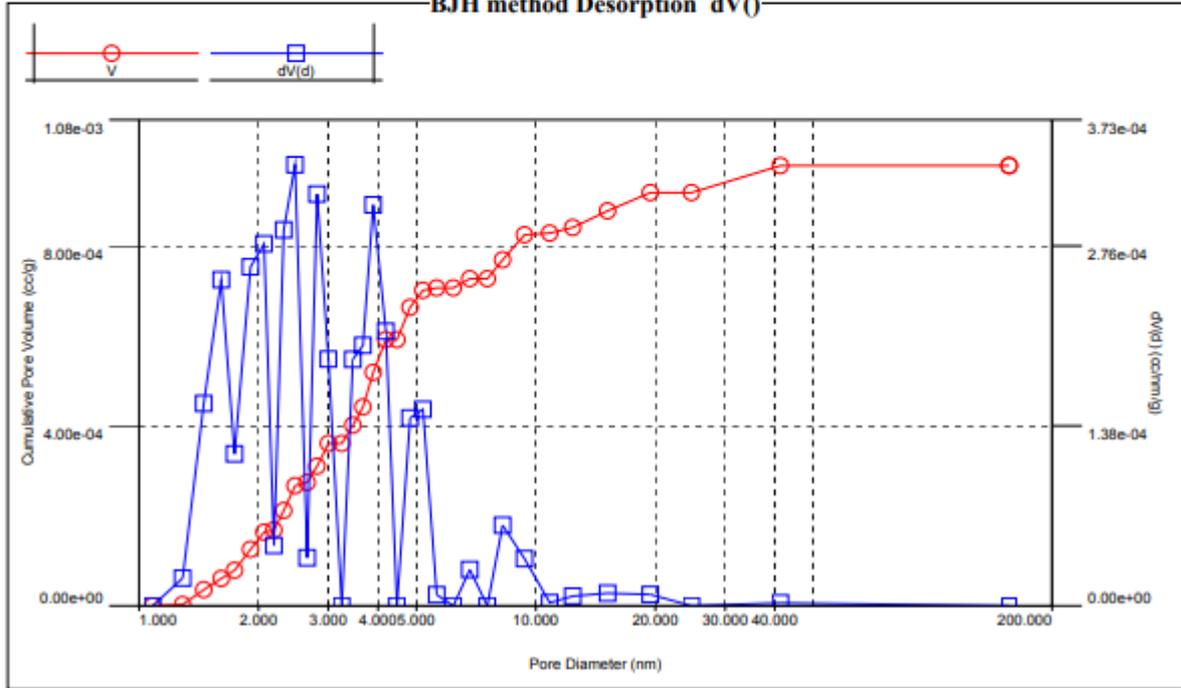
**Date:** 2023/02/28  
**Filename:**

**Report**

**Operator:** quantachrome  
**Stepanova, уголь (руда).qps**

**Date:** 2023/03/01

**BJH method Desorption dV()**



**Isotherm**

Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]	Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]	Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]
1.10370e-02	0.0119	5.63959e-01	0.2233	6.72105e-01	0.3535
3.31750e-02	0.0436	6.34641e-01	0.2474	6.45226e-01	0.3582
6.19620e-02	0.0603	7.04671e-01	0.2853	6.07282e-01	0.3544
8.87110e-02	0.0674	7.78171e-01	0.3005	5.89575e-01	0.3408
1.13030e-01	0.0724	8.47147e-01	0.3306	5.49824e-01	0.3147
1.34889e-01	0.0825	9.20439e-01	0.4098	5.31113e-01	0.3143
1.61308e-01	0.0866	9.92477e-01	0.4143	4.96977e-01	0.2890
1.85032e-01	0.0895	9.63784e-01	0.4768	4.69518e-01	0.2632
2.11079e-01	0.1036	9.25725e-01	0.4433	4.45364e-01	0.2484
2.36057e-01	0.1085	9.04820e-01	0.4510	4.17876e-01	0.2332
2.58841e-01	0.1303	8.77539e-01	0.4307	3.87763e-01	0.2325
2.85282e-01	0.1319	8.40413e-01	0.4124	3.46964e-01	0.2131
3.09694e-01	0.1383	8.16395e-01	0.4061	3.28404e-01	0.2009
3.32413e-01	0.1517	7.90277e-01	0.4037	2.93988e-01	0.1931
3.57226e-01	0.1563	7.52304e-01	0.3794	2.64277e-01	0.1745
4.27693e-01	0.1717	7.31212e-01	0.3619	2.35641e-01	0.1587
4.92552e-01	0.2070	7.04463e-01	0.3629	2.15059e-01	0.1531

Continued on next page

**Analysis**

**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Спецов

**Date:** 2023/02/28  
**Filename:**

**Report**

**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Степанцова, уголь (руда).qps

**Date:** 2023/03/01

## Isotherm continued

Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]	Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]	Relative Pressure	Volume @ STP [cc/g]
1.87606e-01	0.1385	9.95400e-02	0.0945	9.97600e-03	0.0386
1.51261e-01	0.1193	6.07350e-02	0.0724		
1.19362e-01	0.1060	4.12000e-02	0.0612		

## Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP1 / [ W((Po/P) - 1) ] [cc/g]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP1 / [ W((Po/P) - 1) ] [cc/g]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP1 / [ W((Po/P) - 1) ] [cc/g]
3.31750e-02	0.0436	6.2924e+02	1.34889e-01	0.0825	1.5121e+03
6.19620e-02	0.0603	8.7659e+02	1.61308e-01	0.0866	1.7769e+03
8.87110e-02	0.0674	1.1556e+03	1.85032e-01	0.0895	2.0292e+03
1.13030e-01	0.0724	1.4085e+03			

## Adsorption

Diameter [nm]	Pore Volume [cc/g]	Pore Surf Area [m <sup>2</sup> /g]	dV(d) [cc/nm/g]	dS(d) [m <sup>2</sup> /nm/g]	dV(logd) [cc/g]	dS(logd) [cc/g]
1.0610	9.7616e-05	3.6801e-01	4.5441e-04	1.7131e+00	1.1063e-03	4.1709e+00
1.2629	1.2733e-04	4.6212e-01	1.5721e-04	4.9792e-01	4.5632e-04	1.4453e+00
1.4315	1.2733e-04	4.6212e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
1.5682	1.2733e-04	4.6212e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
1.6851	1.5301e-04	5.2307e-01	2.3626e-04	5.6084e-01	9.1637e-04	2.1753e+00
1.8042	1.5301e-04	5.2307e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
1.9272	1.5301e-04	5.2307e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2.0501	1.9575e-04	6.0647e-01	3.3001e-04	6.4387e-01	1.5573e-03	3.0385e+00
2.1785	1.9792e-04	6.1046e-01	1.7077e-05	3.1355e-02	8.5634e-05	1.5724e-01
2.3017	2.7807e-04	7.4975e-01	6.7180e-04	1.1675e+00	3.5596e-03	6.1861e+00
2.4331	2.7807e-04	7.4975e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2.5740	2.9083e-04	7.6958e-01	9.2235e-05	1.4333e-01	5.4654e-04	8.4932e-01
2.7105	3.3355e-04	8.3261e-01	3.1720e-04	4.6810e-01	1.9793e-03	2.9209e+00
2.8552	3.4016e-04	8.4188e-01	4.2796e-05	5.9956e-02	2.8128e-04	3.9407e-01
3.1790	3.6721e-04	8.7592e-01	5.4866e-05	6.9036e-02	4.0080e-04	5.0432e-01
3.7002	4.6739e-04	9.8421e-01	1.8233e-04	1.9710e-01	1.5505e-03	1.6762e+00
4.3568	5.0041e-04	1.0145e+00	4.3240e-05	3.9699e-02	4.3266e-04	3.9723e-01
5.2453	5.5601e-04	1.0569e+00	5.4865e-05	4.1840e-02	6.6058e-04	5.0375e-01
6.4693	6.4863e-04	1.1142e+00	6.4557e-05	3.9916e-02	9.5769e-04	5.9215e-01
8.3871	6.7693e-04	1.1277e+00	1.1787e-05	5.6214e-03	2.2606e-04	1.0781e-01

Continued on next page

**Analysis**

**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Спецов

**Date:** 2023/02/28  
**Filename:**

**Report**

**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Степанцова, уголь (руда).qps

**Date:** 2023/03/01

## —Adsorption continued—

Diameter [nm]	Pore Volume [cc/g]	Pore Surf Area [mL/g]	dV(d) [cc/nm/g]	dS(d) [mL/nm/g]	dV(logd) [cc/g]	dS(logd) [cc/g]
11.6947	7.3773e-04	1.1485e+00	1.4428e-05	4.9349e-03	3.8427e-04	1.3144e-01
19.8241	8.9444e-04	1.1801e+00	1.3011e-05	2.6253e-03	5.7518e-04	1.1606e-01
141.2194	9.0162e-04	1.1803e+00	3.1104e-08	8.8101e-07	7.1998e-06	2.0393e-04

## —Desorption—

Diameter [nm]	Pore Volume [cc/g]	Pore Surf Area [mL/g]	dV(d) [cc/nm/g]	dS(d) [mL/nm/g]	dV(logd) [cc/g]	dS(logd) [cc/g]
1.0824	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
1.2883	2.6338e-06	8.1778e-03	2.1261e-05	6.6016e-02	6.3020e-05	1.9567e-01
1.4562	3.5550e-05	9.8598e-02	1.5535e-04	4.2673e-01	5.1994e-04	1.4283e+00
1.6123	6.0658e-05	1.6089e-01	2.5021e-04	6.2077e-01	9.2858e-04	2.3038e+00
1.7411	7.9004e-05	2.0304e-01	1.1662e-04	2.6793e-01	4.6722e-04	1.0734e+00
1.9089	1.2540e-04	3.0025e-01	2.6015e-04	5.4512e-01	1.1426e-03	2.3943e+00
2.0665	1.6342e-04	3.7385e-01	2.7782e-04	5.3777e-01	1.3215e-03	2.5579e+00
2.1874	1.6828e-04	3.8274e-01	4.6321e-05	8.4704e-02	2.3326e-04	4.2655e-01
2.3151	2.1169e-04	4.5775e-01	2.8851e-04	4.9849e-01	1.5374e-03	2.6564e+00
2.4719	2.6692e-04	5.4711e-01	3.3850e-04	5.4775e-01	1.9260e-03	3.1166e+00
2.6536	2.7429e-04	5.5822e-01	3.6831e-05	5.5519e-02	2.2493e-04	3.3906e-01
2.8106	3.1027e-04	6.0943e-01	3.1601e-04	4.4975e-01	2.0448e-03	2.9102e+00
3.0014	3.6098e-04	6.7701e-01	1.8936e-04	2.5236e-01	1.3078e-03	1.7429e+00
3.2432	3.6098e-04	6.7701e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
3.4578	4.0133e-04	7.2369e-01	1.8918e-04	2.1884e-01	1.5057e-03	1.7418e+00
3.6657	4.4179e-04	7.6783e-01	1.9990e-04	2.1813e-01	1.6869e-03	1.8407e+00
3.8918	5.1866e-04	8.4684e-01	3.0772e-04	3.1627e-01	2.7566e-03	2.8332e+00
4.1894	5.9143e-04	9.1633e-01	2.1075e-04	2.0122e-01	2.0318e-03	1.9400e+00
4.4663	5.9143e-04	9.1633e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
4.8200	6.6334e-04	9.7601e-01	1.4418e-04	1.1965e-01	1.5987e-03	1.3268e+00
5.1950	7.0123e-04	1.0052e+00	1.5084e-04	1.1614e-01	1.8040e-03	1.3890e+00
5.6278	7.0647e-04	1.0089e+00	8.5271e-06	6.0607e-03	1.1039e-04	7.8459e-02
6.1919	7.0647e-04	1.0089e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
6.8151	7.2685e-04	1.0209e+00	2.7815e-05	1.6325e-02	4.3606e-04	2.5594e-01
7.5460	7.2685e-04	1.0209e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
8.2500	7.6886e-04	1.0412e+00	6.1885e-05	3.0005e-02	1.1749e-03	5.6966e-01
9.3621	8.2475e-04	1.0651e+00	3.6165e-05	1.5452e-02	7.7784e-04	3.3234e-01
10.8416	8.2823e-04	1.0664e+00	2.4615e-06	9.0818e-04	6.1362e-05	2.2639e-02
12.3927	8.4071e-04	1.0704e+00	7.3917e-06	2.3858e-03	2.1060e-04	6.7975e-02
15.1646	8.7782e-04	1.0802e+00	9.6268e-06	2.5393e-03	3.3433e-04	8.8186e-02
19.4302	9.1838e-04	1.0886e+00	8.6721e-06	1.7853e-03	3.8611e-04	7.9486e-02
24.6872	9.1838e-04	1.0886e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Continued on next page

**Analysis**

**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Спецов

**Date:** 2023/02/28  
**Filename:**

**Report**

**Operator:** quantachrome  
**Stepanova, уголь (руда).qps**

**Date:** 2023/03/01

## —Desorption continued—

Diameter [nm]	Pore Volume [cc/g]	Pore Surf Area [m <sup>2</sup> /g]	dV(d) [cc/nm/g]	dS(d) [m <sup>2</sup> /nm/g]	dV(logd) [cc/g]	dS(logd) [cc/g]
41.3426	9.7824e-04	1.0944e+00	2.1790e-06	2.1083e-04	1.9956e-04	1.9308e-02
155.8358	9.7824e-04	1.0944e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

## —Data Reduction Parameters—

<b>t-Method</b>	Calc. method: de Boer		
<b>BJH/DH method</b>	Moving pt. avg.: off		
<b>Adsorbate</b>	Nitrogen	<b>Temperature</b>	77.350K
	Molec. Wt.: 28.013	<b>Cross Section:</b>	16.200 Å <sup>2</sup>
		<b>Liquid Density:</b>	0.808 g/cc

## —MBET summary—

<b>Slope =</b>	9085.261
<b>Intercept =</b>	3.312e+02
<b>Correlation coefficient, r =</b>	0.997980
<b>C constant =</b>	28.427
<b>Surface Area =</b>	0.370 m <sup>2</sup> /g

## —BJH desorption summary—

<b>Surface Area =</b>	1.094 m <sup>2</sup> /g
<b>Pore Volume =</b>	0.001 cc/g
<b>Pore Diameter Dv(d) =</b>	2.472 nm

**Analysis**

**Operator:** quantachrome  
**Sample ID:** Спецов

**Date:**2023/02/28  
**Filename:**

**Report**

**Operator:** quantachrome  
**Stepанцова, уголь (руда).qps**

**Date:**2023/03/01

**Volume/Area summary****Surface Area Data**

SinglePoint BET.....	3.176e-01 ml/g
MultiPoint BET.....	3.698e-01 ml/g
Langmuir surface area.....	3.644e+00 ml/g
BJH method cumulative adsorption surface area.....	1.180e+00 ml/g
BJH method cumulative desorption surface area.....	1.094e+00 ml/g
DH method cumulative adsorption surface area.....	1.305e+00 ml/g
DH method cumulative desorption surface area.....	1.146e+00 ml/g
t-method external surface area.....	3.698e-01 ml/g
DR method micropore area.....	1.154e+00 ml/g
DFT cumulative surface area.....	3.347e-01 ml/g

**Pore Volume Data**

BJH method cumulative adsorption pore volume.....	9.016e-04 cc/g
BJH method cumulative desorption pore volume.....	9.782e-04 cc/g
DH method cumulative adsorption pore volume.....	9.170e-04 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume.....	9.792e-04 cc/g
DR method micropore volume.....	4.101e-04 cc/g
HK method micropore volume.....	1.318e-04 cc/g
SF method micropore volume.....	4.519e-05 cc/g
DFT method cumulative pore volume.....	6.974e-04 cc/g

**Pore Size Data**

BJH method adsorption pore Diameter (Mode Dv(d)).....	2.302e+00 nm
BJH method desorption pore Diameter (Mode Dv(d)).....	2.472e+00 nm
DH method adsorption pore Diameter (Mode Dv(d)).....	2.302e+00 nm
DH method desorption pore Diameter (Mode Dv(d)).....	2.472e+00 nm
DR method micropore Pore width.....	5.171e+00 nm
DA method pore Diameter (Mode).....	2.700e+00 nm
HK method pore Diameter (Mode).....	1.122e+00 nm
SF method pore Diameter (Mode).....	2.030e+00 nm
DFT pore Diameter (Mode).....	2.769e+00 nm

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт внедрения



АО «Гипроцветмет»  
Звездный бульвар, д. 23, стр. 10, эт. 2, пом. 1  
Москва, а/я 25, 129075  
Тел.: +7 (495) 600-32-00, e-mail: office@giprocm.ru  
ОКПО 00198404, ОГРН 1137746314640  
ИНН/КПП 7717750345/771701001

Утверждаю

Управляющий директор

А.Д. Куранов

Дата « 18 » августа 2024 г.



#### АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации аспиранта Санкт-Петербургского горного университета, Степанцовой Анастасии Юрьевны, обучающейся по научной специальности 2.10.3 «Безопасность труда»

Рабочая комиссия в составе: председателя комиссии - директора по авторскому надзору, промышленной безопасности и охране труда Тимохина Вадима Анатольевича, а также членов комиссии – начальника отдела горных работ Гордымова Александра Николаевича, главного инженера проектов Черепанова Андрея Владимировича - составила настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование безопасных условий эксплуатации закрытых угольных складов по газовому и пылевому факторам», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, приняты к использованию при ведении проектной и экспертной работы в деятельности АО «Гипроцветмет». Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению при проработке технических решений в части выбора параметров систем нормализации газового и пылевого режимов закрытых угольных складов при необходимости промежуточного хранения в них угольного сырья с высокой остаточной газоносностью.

Использование выявленных на основе проведённых в диссертации исследований закономерностей газообменных и пылевых процессов позволяет усовершенствовать конструкцию закрытого угольного склада при необходимости

размещения в нем угольного сырья с высокой остаточной газоносностью, что приводит к повышению качества угля за счёт минимизации негативного воздействия метеорологических факторов.

**Председатель комиссии**

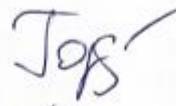
Директор по авторскому надзору,  
промышленной безопасности и охране труда



Тимохин В. А.

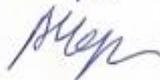
**Члены комиссии:**

Начальник отдела горных работ



Гордымов А.Н.

Главный инженер проектов



Черепанов А. В.

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2023684677**

**Программа для выбора параметров системы  
вентиляции закрытых угольных складов,  
обеспечивающих их безопасную эксплуатацию**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Гендлер Семен Григорьевич (RU), Степанцова  
Анастасия Юрьевна (RU), Серегин Александр Сергеевич  
(RU)*

Заявка № **2023682679**

Дата поступления **01 ноября 2023 г.**

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **17 ноября 2023 г.**



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов