

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»**

На правах рукописи

ЗАВИЗИОН ЮЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЛИГОНА
ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ
КАК ЭЛЕМЕНТА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология (строительство и ЖКХ)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Слюсарь Наталья Николаевна

Пермь – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПОЛИГОН ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ КАК ЭЛЕМЕНТ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СИСТЕМЫ.....	10
1.1. Определение полигона захоронения твердых коммунальных отходов как элемента природно-техногенной системы	10
1.2. Международный и российский опыт захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах	15
1.3. Оценка состояния полигона захоронения твердых коммунальных отходов и его воздействия на окружающую среду	22
1.3.1. Анализ процессов разложения и стабилизации твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла полигона	22
1.3.2. Оценка воздействия полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на окружающую среду	30
1.4. Оценка стабильности твердых коммунальных отходов в массиве полигона	34
1.5. Характеристика современных технических мероприятий по снижению эмиссий полигонов захоронения твердых коммунальных отходов	40
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА ПОЛИГОНАХ.....	54
2.1. Общая характеристика объектов исследования.....	54
2.2. Объем и программа исследования	56
2.3. Методы проведения исследований по оценке стабильности и моделированию процессов разложения твердых коммунальных отходов	60
2.3.1. Физико-химические и биохимические методы исследований.....	60
2.3.2. Термические методы исследований.....	61
2.3.3. Лабораторное моделирование процессов разложения твердых коммунальных отходов	63
ГЛАВА 3. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЛИГОНА ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ	68

3.1. Определение фракционного и морфологического состава твердых коммунальных отходов	68
3.2. Исследование физико-химических и биохимических параметров твердых коммунальных отходов	70
3.3. Оценка термических параметров твердых коммунальных отходов.....	78
3.4. Результаты лабораторного моделирования процессов разложения твердых коммунальных отходов	96
3.5. Оценка стабильности твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла полигона	109
ГЛАВА 4. ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОГО УРОВНЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНА ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ.....	117
4.1. Установление критериев выбора комплекса технических мероприятий по снижению эмиссий полигона.....	118
4.2. Эколого-экономическая оценка технических мероприятий по минимизации воздействия твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла полигона	126
4.2.1. Оценка объемов образования эмиссий биогаза и фильтрата на полигонах захоронения твердых коммунальных отходов.....	126
4.2.2. Расчет предотвращенного экологического ущерба от загрязнения объектов окружающей среды	135
4.2.3. Расчет платы за негативное воздействие полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на объекты окружающей среды.....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В России практически весь объем образуемых твердых коммунальных отходов (ТКО) (96%) захоранивается на полигонах, санкционированных и нелегальных свалках, которые в совокупности с компонентами прилегающей геосреды рассматриваются как сложные природно-техногенные системы (ПТС). В массиве полигона протекают процессы биохимического и химического разложения отходов, формирующие эмиссии загрязняющих веществ (в виде биогаза и фильтрата), оказывающих негативное воздействие на геосферные оболочки, как на этапе эксплуатации объекта, так и после его закрытия и рекультивации.

На протяжении этапов жизненного цикла полигона происходят процессы стабилизации отходов, снижается воздействие массива захоронения отходов на компоненты геосреды. От совокупности форм и состояния взаимодействия полигона (техногенная составляющая) с природной системой на этапах жизненного цикла зависит функционирование ПТС. Несомненный интерес и большое практическое значение имеет оценка стабильности отходов в массиве захоронения на разных этапах жизненного цикла и оценка состояния полигонов захоронения ТКО как элементов ПТС. Под стабильными отходами понимаются такие отходы, при разложении которых эмиссии загрязняющих веществ не оказывают негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Уровень воздействия полигона захоронения отходов на геосферные оболочки зависит от многих факторов, в том числе от компонентного состава и влажности отходов, климатических условий, технологий эксплуатации полигона, качественных и количественных параметров эмиссий, наличия применяемых природоохранных сооружений и т.д. Это обуславливает актуальность выбора технических мероприятий по обеспечению безопасного уровня геоэкологического воздействия объектов захоронения ТКО.

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 25.00.36 Геоэкология (строительство и ЖКХ), пункту 5.14 «Теория, методы, технологии и средства оценки состояния, защиты, восстановления и управления

природно-техногенными системами, включая агроландшафты на основе осуществления строительной, хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ».

Степень разработанности темы исследований. Большой вклад в развитие методов оценки состояния полигонов захоронения ТКО, в изучение физико-химических и биохимических процессов деструкции отходов, эмиссий загрязняющих веществ в компоненты геосреды внесли работы российских и зарубежных ученых: Я.И. Вайсмана, Н.Ф. Абрамова, В.Н. Коротаева, Л.В. Рудаковой, И.С. Глушанковой, М.П. Федорова, А.В. Черемисина, А.Н. Чусова, P. Brunner, M. Barlaz, R. Stegmann, D. Laner, M. Huber-Humer и др.

Несмотря на значительный объем научных исследований, проводимых в России и зарубежных странах, сложной задачей, до сих пор нерешенной однозначно, является определение физико-химических и биохимических параметров отходов разного срока захоронения и установление параметров достижения стабильности отходов в массиве захоронения. Разработанные методы оценки состояния полигона захоронения ТКО как элемента ПТС являются трудоемкими и длительными.

Комплексная оценка состояния полигона и выбор технических мероприятий по обеспечению безопасного уровня его геоэкологического воздействия должны проводиться на основании результатов оценки стабильности отходов в массиве захоронения с учетом климатических условий территории расположения полигона, технологии захоронения отходов, результатов мониторинга компонентов окружающей среды, оценки текущих и прогнозирования долгосрочных эмиссий полигона и т.д.

Работа является обобщением результатов исследований, выполненных на кафедре «Охрана окружающей среды» ПНИПУ в рамках совместного научного проекта международных исследовательских групп ученых на базе ПНИПУ «Научные основы ресурсосберегающих технологий снижения парниковых газов на этапах жизненного цикла полигонов захоронения отходов» (грант Министерства образования Пермского края №С-26/623, 2012 г.) и

государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия «Инициативные научные проекты» (код заявки 5.9729.2017/8.9).

Цель: Геоэкологическая оценка состояния полигонов захоронения твердых коммунальных отходов для обеспечения их безопасного функционирования как элементов природно-техногенных систем.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выявить закономерности протекания процессов стабилизации отходов и формирования эмиссий полигона захоронения ТКО на этапах жизненного цикла.

2. Установить зависимости термических параметров отходов разного срока захоронения от их физико-химических и биохимических параметров для установления индикаторных показателей, позволяющих оценить классы стабильности отходов.

3. Разработать методику комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения, предназначенную для геоэкологической оценки состояния полигонов захоронения ТКО как элементов природно-техногенных систем.

4. Обосновать выбор технических мероприятий по обеспечению безопасного уровня геоэкологического воздействия полигонов захоронения ТКО с учетом этапа жизненного цикла и класса стабильности отходов.

Научная новизна:

1. Установлены индикаторные показатели для оценки класса стабильности отходов, позволяющие определять уровень воздействия полигона захоронения отходов на геосферные оболочки.

2. Впервые предложено оценивать стабильность отходов в массиве полигона по ряду термических параметров отходов: величине тепловых эффектов, температуре пиков тепловыделения, скорости потери массы, отношению удельных энтальпий сухого вещества и органического сухого вещества. Выявлены логистические зависимости отношения удельных энтальпий сухого вещества и органического сухого вещества от показателя дыхательной

активности, потенциала газообразования отходов, ХПК, БПК₅; экспоненциальные зависимости - от содержания общего и органического углерода в отходах.

3. Впервые разработана методика комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения, основанная на использовании метода синхронного термического анализа, предназначенная для геоэкологической оценки состояния полигонов захоронения ТКО как элементов природно-техногенных систем и обоснования выбора технических мероприятий по снижению эмиссий.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты научных исследований и теоретические положения диссертационной работы использованы для разработки методики комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения. Методика может быть использована для оценки состояния полигона захоронения ТКО на этапах жизненного цикла, проведения инженерно-экологических изысканий и разработки технических решений по обеспечению безопасного уровня геоэкологического воздействия полигона.

Практическая ценность работы заключалась в использовании разработанной методики при проведении комплексных инженерно-экологических изысканий на объектах захоронения отходов Пермского края и разработке технических решений по минимизации воздействия закрытой свалки ТБО г.Краснокамска на объекты окружающей среды.

Результаты проведенных исследований использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Техносферная безопасность» на кафедре «Охрана окружающей среды» ФГБОУ ВО ПНИПУ.

Методология и методы исследования. При выполнении работы проводились полевые и лабораторные исследования образцов отходов с использованием физико-химических методов, биохимических методов (исследование газового потенциала и анаэробного разложения отходов в лабораторных реакторах), метода синхронного термического анализа, по результатам которых устанавливались эмпирические зависимости. Для обработки результатов исследований использовались методы статистического анализа.

Экспериментальные исследования проводились на базе лабораторий кафедры «Охрана окружающей среды» ПНИПУ, лабораторий Университета природных ресурсов и прикладных естественных наук г. Вена (ABF-BOKU) и Технического университета г. Гамбург (ТУНН).

Степень достоверности результатов подтверждается применением общепринятых и научно-апробированных методов при проведении полевых и лабораторных исследований, удовлетворительной сходимостью полученных результатов экспериментальных исследований, применением статистических методов обработки экспериментальных данных с оценкой тесноты корреляционной связи получаемых зависимостей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установленные индикаторные показатели для оценки класса стабильности отходов, позволяющие определять уровень воздействия полигона захоронения отходов на геосферные оболочки.

2. Научно обоснованные термические параметры оценки стабильности отходов в массиве полигона: величина тепловых эффектов, температура пиков тепловыделения, скорость потери массы, отношение удельных энтальпий сухого вещества и органического сухого вещества.

3. Методика комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения с использованием метода синхронного термического анализа, предназначенная для геоэкологической оценки состояния полигонов захоронения ТКО как элементов природно-техногенных систем и обоснования выбора технических мероприятий по снижению эмиссий.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на XII, XIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика» (Пермь, 2014 г., 2015 г.), Международной конференции «Системы управления в обращении с ТБО: правовые, финансовые и технические решения» (Москва, 2015 г., 2017 г.), II, III Международной научной конференции «От обращения с отходами к управлению ресурсами» (Пермь, 2015

г., 2017 г.), Международной конференции «Berliner Jungerkonferenz Klima- und Umweltschutz, Energiequellen, Abfallwirtschaft» (Берлин, 2015 г.), Международной научно-практической конференции «Экологическое строительство и устойчивое развитие. Зеленые кампусы и школы – элементы устойчивого развития городов» (Пермь, 2016 г.), Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Химия. Экология. Урбанистика» (Пермь, 2017 г.), VIII Евразийском экономическом форуме молодежи (Екатеринбург, 2017 г.), Международной конференции «Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса» (Санкт-Петербург, 2018 г.).

Публикации по результатам исследований. По теме диссертации опубликовано 16 работ, из которых 4 работы опубликованы в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных изданий и 2 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах: Scopus, GeoRef.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 168 страницах машинописного текста, включает 37 таблиц, 53 рисунка. Список использованной литературы содержит 150 источников.

ГЛАВА 1. ПОЛИГОН ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ КАК ЭЛЕМЕНТ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СИСТЕМЫ

1.1. Определение полигона захоронения твердых коммунальных отходов как элемента природно-техногенной системы

В результате строительно-хозяйственной деятельности человека, в основном за последние 50-100 лет, на Земле сформировались системы, в которых большую роль помимо естественных процессов занимают техногенные процессы. Такие системы называют природно-техногенными [1-6].

Под природно-техногенной системой понимается совокупность взаимодействующих техногенных образований, образующихся в результате строительства и эксплуатации инженерных и иных сооружений, и нарушаемой геологической среды [2,7,8].

Рост и развитие городов привели к образованию обширных территорий, занятых размещением ТКО, данные объекты являются техногенными и в совокупности с компонентами геосреды образуют ПТС, развивающуюся в пространстве и во времени как единое целое. Процессы, происходящие в техногенных образованиях, сопровождаются изменением состава и свойств компонентов геосреды, таким образом, геосреда из природной превращается в нарушенную [2,9].

Геоэкологическая стабильность ПТС может быть определена тремя группами параметров - природно-ресурсным потенциалом, антропогенной нагрузкой и последствиями воздействия геологических процессов [1,10].

В местах размещения объектов захоронения отходов наблюдаются геодинамические, геофизические, геохимические изменения компонентов геосреды. Геодинамические процессы в массиве захоронения отходов характеризуются нарушением рельефа местности, снижением устойчивости откосов массива, изменением уровня подземных вод и т.д. Геофизическое воздействие полигонов характеризуется изменением тепловых процессов, состоянием грунтов, поверхностных и подземных вод. Геохимическое воздействие проявляется при негативном влиянии на состояние подстилающих

грунтов и состава подземных вод в результате поступления в них фильтрата через массив захоронения отходов [8,11].

Нарушенная воздействием полигонов захоронения отходов геосреда может также негативно влиять на техногенное образование в результате формирования в нем фрагментов неоднородной структуры, изменения состава и свойств отходов, нарушения устойчивости массива, обводнения прилегающей территории и т.д. [2,8].

Аналитический обзор научно-технической информации [2,7,12] показал, что зона воздействия объектов захоронения отходов на геосреду в основном зависит от количества и компонентного состава размещенных отходов, возраста отходов, состояния и качества природнозащитных объектов.

Изучение хронологических и пространственных составляющих полигона захоронения отходов как части ПТС путем оценки состояния техногенного образования на этапах жизненного цикла позволит определить масштабы его воздействия на компоненты геосреды [2,8,13].

Изучение состояния ПТС должно осуществляется на всех этапах жизненного цикла. Методологические основы исследования, оценки и восстановления природно-техногенных систем представлены в работах М.В. Графкиной, А.Н. Гулькова, И.И. Мазура, А.А. Соловьева, О.В. Тупицыной, Л.М. Фалейчик, Е.В. Щербины, М.Г. Ясовеева и др. [2,7,8,14-17].

Жизненный цикл полигона захоронения отходов (рисунок 1.1) [18] является элементом жизненного цикла техногенных отходов и охватывает весь период функционирования объекта. Под периодом функционирования полигона понимается отрезок времени, на протяжении которого складированные в массиве полигона отходы обладают потенциальной опасностью [19]. Анализ жизненного цикла объекта захоронения отходов позволил выделить семь основных этапов существования полигона (таблице 1.1).

Продолжительность жизненного цикла составляет сотни и тысячи лет [18,20]. Окончанием жизненного цикла является ассимиляция захороненных отходов окружающей средой [18,21].

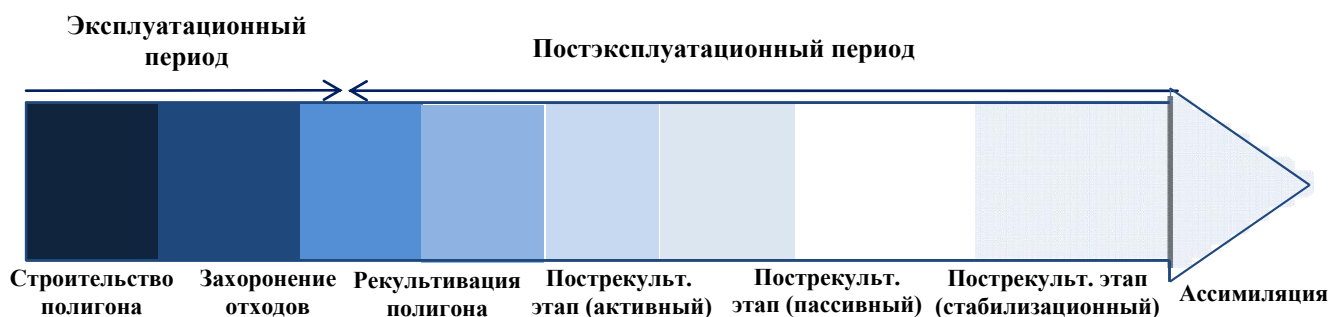


Рисунок 1.1 - Жизненный цикл полигона захоронения отходов [18]

Этапы жизненного цикла полигона характеризуют состояние полигона (тип поверхности, температуру в массиве отходов, протекающие процессы биологического разложения, эмиссии в геосреду). Каждый этап определяет закономерности формирования количественных и качественных характеристик биогаза и фильтрата, возможность их проникновения объекты окружающей среды. Анализ закономерностей формирования эмиссии загрязняющих веществ полигонов необходимо осуществлять с учетом его жизненного цикла [2,8,19,22].

Захороненные отходы должны достигнуть качества «окончательного хранения» примерно через 30 лет после складирования их на полигоне. Массив полигона захоронения отходов должен достигнуть «инертного» состояния, чтобы эмиссии такого полигона не оказывали негативного воздействия на объекты окружающей среды в течение длительного периода времени [23].

В настоящее время возникла необходимость создания управляемых ПТС, позволяющих поддерживать и регулировать состояние компонентов геосреды, не допуская их ухудшения до уровня, оказывающего негативное воздействие на жизнедеятельность человека и других организмов.

Управляемый полигон захоронения как часть ПТС может выполнять задачи, направленные на предупреждение или предотвращение негативного воздействия на состояние основных компонентов геосреды [3,4,8].

Авторами [2,4,7,8] установлено, что попытка управления отдельными частями ПТС, игнорируя состояния других, не могут обеспечить устойчивого состояния ПТС как единого целого.

Таблица 1.1 - Характеристика этапов жизненного цикла полигона захоронения отходов

Годы	Этап жизненного цикла	Использование объекта	Техническая деятельность	Требования к этапу	Воздействие на ОС
0-5	Инвестиционный	Отвод площадки. Строительство объекта	Изыскания. Проектные работы. Строительно-монтажные работы	Должны быть разработаны все необходимые мероприятия, инженерные и технологические решения, связанные с безопасной для окружающей среды эксплуатацией полигона (противофильтрационной защита, промежуточная и окончательная изоляция слоев укладываемых отходов, эффективная дегазация массива отходов, рекультивация поверхности полигона после его закрытия, организация мониторинга и т.д.)	Воздействие на ОС происходит при осуществлении строительно-монтажных работ на площадке строительства.
5-30	Эксплуатационный	Полигон	Работы по формированию массива отходов: прием, складирование, изоляция отходов. Мониторинг окружающей среды в зоне возможного влияния полигона; технологический контроль элементов инфраструктуры полигона. Управление эмиссиями и рабочим телом полигона (геометрия, просадки и провалы).	Необходимо строго соблюдать правила эксплуатации полигонов, вовремя выявлять нарушения и устранять последствия несоблюдения инструкций.	Протекание процессов деструкции отходов, связанные с выделением различных загрязняющих веществ, максимальная интегральная эмиссия этих веществ (к 30 годам ЖЦ полигона) в окружающую среду.
30-40	Рекультивационный	Полигон	Выбор направления рекультивации. Техническая и биологическая рекультивация. Проведение мероприятий по мониторингу окружающей среды в зоне возможного влияния полигона. Управление эмиссиями и рабочим телом полигона.	Необходимо реализовывать контроль функционирования системы сбора, отведения и очистки фильтрата, системы дегазации полигона.	Эмиссия загрязняющих веществ с полигона размещения отходов в окружающую среду к 40 годам ЖЦ полигона начинает медленно снижаться.

Годы	Этап жизненного цикла	Использование объекта	Техническая деятельность	Требования к этапу	Воздействие на ОС
40-50	Пострекультивационный. Активный	Рекреационное (закрытый полигон)	Мониторинг. Управление эмиссиями и рабочим телом полигона	Осуществление контроля процессов сбора, очистки и отведения фильтрата, контроль процесса дегазации полигона, наблюдение за процессом оседания свалочного тела, контроль за состоянием инженерных сооружений в теле полигона. Организация мероприятия по устранению выявленных нарушений (восстановление целостности покрытия полигона при возникновении процесса оседания свалочного тела, ремонт элементов инфраструктуры полигона).	Постепенное снижение эмиссий загрязняющих веществ с полигона размещения отходов в окружающую среду
50-200	Пострекультивационный. Пассивный	Рекреационное	Мониторинг. Пассивная эксплуатация	Осуществление наблюдения за процессом оседания свалочного тела, контроль за состоянием инженерных сооружений в теле полигона.	Постепенное снижение эмиссий загрязняющих веществ с полигона размещения отходов в окружающую среду
200-1000	Пострекультивационный. Стабилизационный	Рекреационное	Мониторинг. Возможная эксплуатация		Соответствие эмиссий загрязняющих веществ нормативным показателям
1000-10000	Вечное захоронение (Ассимиляционный)	Народно-хозяйственное	Мониторинг. Эксплуатация площадки		Интегральная эмиссия загрязняющих веществ с полигона размещения отходов в окружающую среду ниже нормативных и достигает фоновых показателей

Таким образом, необходимо управлять не только эмиссиями, оказывающими негативное воздействие на компоненты геосреды, но и состоянием полигона [8,10]. Геоэкологическая оценка состояния полигонов и стабильности отходов на этапах жизненного цикла позволит подобрать соответствующие технических мероприятия для минимизации эмиссий загрязняющих веществ в объекты окружающей среды.

1.2. Международный и российский опыт захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах

Ежегодно, в мире образуется около 720 млрд. тонн отходов производства и потребления, что негативно сказывается на экологической ситуации населенных территорий [24].

Проблема утилизации отходов на сегодняшний день является достаточно острой во всём мире, в особенности в крупных городах. Один среднестатистический житель крупного города производит не менее 1 кг отходов в сутки. Ориентировочная норма накопления в России - 330 кг на душу населения, что значительно меньше, чем в Европе с соответствующим показателем в 510 кг [25].

Захоронение ТКО на полигонах и свалках является самым распространенным методом обращения с отходами в Российской Федерации. Практически весь объем образуемых отходов (около 96%) размещается на полигонах или свалках [26].

В мировой практике известно более 20 способов обезвреживания и утилизации ТКО. Наибольшее распространение получили следующие технологии: захоронение на полигоне (свалке), сжигание, вторичное использование, компостирование [27,28].

Для сравнения по данным [29] за 2011 г. в странах Европейского союза захоранивалось без обработки только 23 % всех образующихся отходов, сжигалось около 38 %, утилизировалось около 25 % и компостировалось около 14 %. Обращение с ТКО в разных странах осуществляется в соответствии с

экономическими возможностями, требованиями законодательства и т.д. (рисунок 1.2) [30].

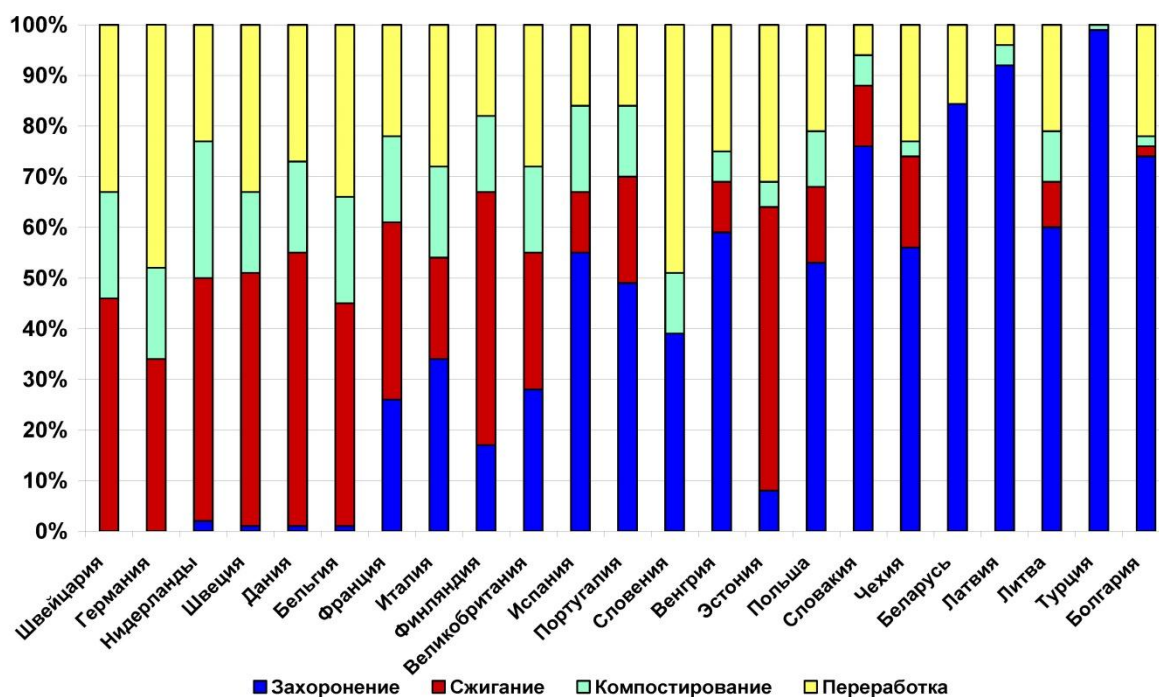


Рисунок 1.2 – Методы обращения с ТКО в разных странах [30]

Наибольший процент утилизируемых ТКО в Словении около 50,0%, в Дании 55,0% ТКО подвергается сжиганию. В Нидерландах, Бельгии, Швейцарии, Германии, Великобритании компостирование биоразлагаемых ТКО составляет 15,0-28,5%. Доля ТКО, вывозимых на полигоны, изменяется от 99,0% в Турции до 2,5% в Швейцарии.

Количество специально обустроенных мест для захоронения отходов в РФ составляет около 1,4 тысяч, что в разы меньше, чем санкционированных свалок (более 7 тысяч). Количество несанкционированных свалок захоронения отходов составляет более 17,5 тысяч. [26].

Под полигоны и свалки захоронения отходов ежегодно отчуждается более 10 тыс. га земель, следовательно, происходит увеличение земельных площадей для захоронения [31].

Многие свалки и полигоны были открыты более 30 лет назад, значительная часть этих объектов не отвечают санитарным и экологическим нормам. Большинство полигонов расположено вблизи населенных пунктов, на

территориях водоохранных зон поверхностных и подземных водных источников, а также на землях сельскохозяйственного назначения.

Под полигонами понимают комплексы природоохранных сооружений, предназначенные для складирования, изоляции и обезвреживания ТКО, обеспечивающие защиту от загрязнения атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, почвы, препятствующие распространению грызунов, насекомых и болезнетворных микроорганизмов [32-34].

Современные полигоны захоронения ТКО оборудованы так, чтобы не допустить контакта отходов с окружающей средой (изоляция полигона противодиффузионными материалами, промежуточная изоляция), вследствие чего значительно затрудняется разложение отходов, т.к. из-за недостатка кислорода органические отходы подвергаются анаэробному брожению, приводящего к формированию биогаза [35]. Такая эксплуатация полигона характерна для полигонов-биореакторов.

Полигоны захоронения ТКО различаются по климатическим и географическим условиям, возрасту объекта, объему отходов, компонентному составу и периоду воздействия эмиссий. В настоящее время объекты захоронения ТКО классифицируются по форме (карьерные, отвальные, резервуарные захоронения) [36], по годовому объему принимаемых ТКО (10,20,30,60,120 и т.д. до 3000 тыс.м³/год); мощности захоронения (высоконагруженные полигоны общей высотой более 20 м и нагрузкой 10 т/м²) [32].

В России проектирование, эксплуатация и рекультивация полигонов захоронения ТКО осуществляется в соответствии с законодательными, директивными и нормативными документами [37-43].

На полигоны захоронения ТКО принимаются отходы потребления, строительный мусор и некоторые виды твердых промышленных отходов III и IV класса опасности. При захоронении отходов на полигоне должны выполняться следующие требования: отходы не должны быть взрывоопасными, пожароопасными и самовозгорающимися; влажность отходов должна быть не

более 65%; суммарное количество отходов III и IV класса не должно превышать 30% общей массы ТКО [42].

Наибольший опыт в обеспечении безопасного захоронения отходов накоплен в странах Европы (Германия, Австрия, Швейцария). Законодательные требования по эксплуатации и закрытию полигонов в ЕС регулируются требованиями Директивы Совета Европейского Союза 1999/31/ЕС от 26 апреля 1999 г. по полигонам захоронения отходов [44]. Согласно Директиве 1999/31/ЕС полигоны захоронения отходов делятся на три класса [44]:

- полигоны захоронения опасных отходов (1-й класс);
- полигоны захоронения неопасных отходов (2-й класс);
- полигоны захоронения инертных отходов (в том числе незагрязненных отходов строителей и сноса зданий) (3-й класс).

Согласно требованиям Директивы 1999/31/ЕС [44] все отходы, поступающие на захоронение, должны быть предварительно обработаны. Обработка отходов, направленная на снижение доли биоразлагаемых компонентов в массиве захоронения отходов, позволяет снизить объем генерации биогаза и управлять качеством фильтрата. Директивой 1999/31/ЕС установлены требования по снижению массы биоразлагаемых отходов к захоронению до 75 %, 50 % и 35 % до 2006 г., 2009 г. 2016 г. соответственно.

В отличие от требований РФ европейское законодательство устанавливает весьма жесткие требования к процедуре закрытия и постэксплуатационному обслуживанию объектов захоронения отходов. Согласно Директиве 1999/31/ЕС после закрытия полигона оператор несет ответственность за его обслуживание, осуществление контроля и мониторинга «так долго, как может быть потребовано уполномоченными органами, принимая во внимание время, в течение которого полигон может представлять опасность». Учитывая, что срок постэксплуатационного обслуживания полигона составляет десятки лет, основная задача оператора полигона не только обеспечить безопасную эксплуатацию объекта в период приема отходов, но и сократить период формирования эмиссий за счет ускорения стабилизации отходов.

Техническое обустройство и оснащение современных объектов захоронения ТКО создавалось в соответствии с изменениями в стратегии захоронения отходов. Существующие объекты захоронения ТКО можно разделить на три основные категории [45]:

- 1 категория – открытые (стихийные) свалки;
- 2 категория – контролируемые свалки;
- 3 категория – санитарные полигоны.

Общие характеристики для разных категорий объектов захоронения отходов представлены в таблице 1.2.

1. Открытые свалки

Характеризуются отсутствием инженерно-экологических изысканий для территории, отведенной под захоронение отходов, и минимальными затратами на этапах жизненного цикла объекта, отходы на объекте размещены насыпью без уплотнения и изоляции [34,45].

2. Контролируемые свалки

Контролируемые свалки открывались в связи с необходимостью закрытия открытых свалок и заменой на улучшенные объекты размещения отходов [46]. Контролируемые свалки вводятся в эксплуатацию с учетом нормативов размещения объекта по санитарным и гидрогеологическим критериям [45].

3. Санитарные полигоны

Санитарный полигон для захоронения отходов спроектирован, построен и эксплуатируется таким образом, чтобы свести к минимуму воздействие на здоровье населения и окружающую среду. Санитарные полигоны проходят тщательное планирование, начиная с выбора площадки до управления эмиссиями загрязняющих веществ после закрытия. Полигоны в РФ строят по проектам в соответствии со СНиП 2.01.28-85 [47].

Таблица 1.2 – Общие характеристики для разных категорий объектов захоронения отходов

Критерий	Открытая свалка	Контролируемая свалка	Санитарный полигон
Местоположение объекта	объект не запланирован и расположен ненадлежащим образом	для объекта рассчитываются гидрогеологические параметры	участок, выбран на основе факторов воздействия на окружающую среду и стоимостных характеристик строительства полигона
Вместимость (емкость)	емкость площадки не известна	проектная мощность	проектная мощность
Планирование участка	- незапланированный участок; - отходы беспорядочно захораниваются; - процесс захоронения отходов и территория не контролируется	нет планировки участка, но рабочая поверхность/область захоронения сведена к минимуму	захоронение только в специально отведенных местах
Подготовка площадки	практически не подготовлена или вообще неподготовленная площадка	- подготовка основания участка захоронения; - дренаж и контроль поверхностных вод вдоль периферии участка захоронения	комплексная подготовка площадки
Управление фильтратом	нет управления фильтратом	частичное управление фильтратом	полное управление фильтратом
Управление биогазом	нет управления биогазом	нет или частичное управление биогазом	полное управление биогазом
Применение почвенного покрова	покрытие применяется редко или покрытие отсутствует	покрытие отходов осуществляются на регулярной основе, но не является обязательным	ежедневное покрытие, применяется промежуточная и окончательная почвенная изоляция
Уплотнение отходов	нет уплотнения отходов	уплотнение в некоторых случаях	отходы уплотняются
Техническое обслуживание подъездных дорог	нет надлежащего технического обслуживания подъездных дорог	ограниченное обслуживание подъездных дорог	строительство и обслуживание подъездных дорог
Ограждение	нет ограждения	с ограждением	безопасное ограждение с воротами

Критерий	Открытая свалка	Контролируемая свалка	Санитарный полигон
Входной контроль отходов	нет контроля над количеством и / или составом поступающих отходов	частичный контроль или отсутствие контроля количества отходов	постоянный контроль количества и состава поступающих отходов
Ведение учета отходов	нет ведения учета отходов	базовый учет отходов	полный учет объема отходов, видов, источников и деятельности/ мероприятий
Закрытие объекта	нет надлежащего закрытия участка после прекращения операций по захоронению	закрытие объекта ограничивается покрытием рыхлой или частично уплотненной почвой и посадкой растительности	управление окончательным закрытием объекта и его мониторинг после закрытия
Стоимость	низкая первоначальная стоимость, высокая стоимость в долгосрочной перспективе	стоимость от низкой до умеренной первоначальной стоимости, высокая стоимость в долгосрочной перспективе	высокие первоначальные, операционные и эксплуатационные расходы, умеренная стоимость в долгосрочной перспективе
Воздействие на окружающую среду и здоровье населения	высокий риск возникновения пожаров и высокий потенциал негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения	меньший риск неблагоприятных экологических последствий по сравнению с открытой свалкой	минимальный риск неблагоприятного воздействия на окружающую среду и здоровье населения

Стратегия санитарного захоронения ТКО направлена на создание полигонов, оказывающих минимальное воздействие на объекты окружающей среды и здоровье населения. Для этого необходимо выполнение следующих основных требований и мер [28,35,48,49]:

- рациональное использование рабочего объема полигона;
- контроль компонентного состава и объема отходов, поступающих на захоронение;
- обеспечение ежедневного покрытия складироваемых отходов для предотвращения разноса отходов;
- сбор образовавшегося биогаза из тела полигона и далее его целевое использование;
- отвод и очистку фильтрата через системы дренажа;
- минимизация негативного влияния полигона на геосреду;
- мониторинг воздействия полигона на компоненты геосреды;
- непрерывность действия природоохранных систем полигона.

Таким образом, полигоны захоронения ТКО, соответствующие принципам устойчивого развития, т.е. отвечающие требованиям природоохранного законодательства на которых реализуются организационно-технические мероприятия, обеспечивают защиту объектов геосреды от воздействия загрязняющих веществ.

1.3. Оценка состояния полигона захоронения твердых коммунальных отходов и его воздействия на окружающую среду

1.3.1. Анализ процессов разложения и стабилизации твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла полигона

Негативное воздействие полигонов захоронения ТКО связано с интенсивным протеканием в толще отходов физико-химических и биохимических процессов, результатом чего является разложение сложных органических веществ и образование эмиссии загрязняющих веществ [50,51]. Долговременная опасность

полигона обусловлена отрезком времени, на протяжении которого отходы, захороненные в массиве полигона, обладают потенциальной опасностью [19].

Фазы процессов, происходящих в массиве полигона захоронения отходов, представлены на рисунке 1.3 [52].

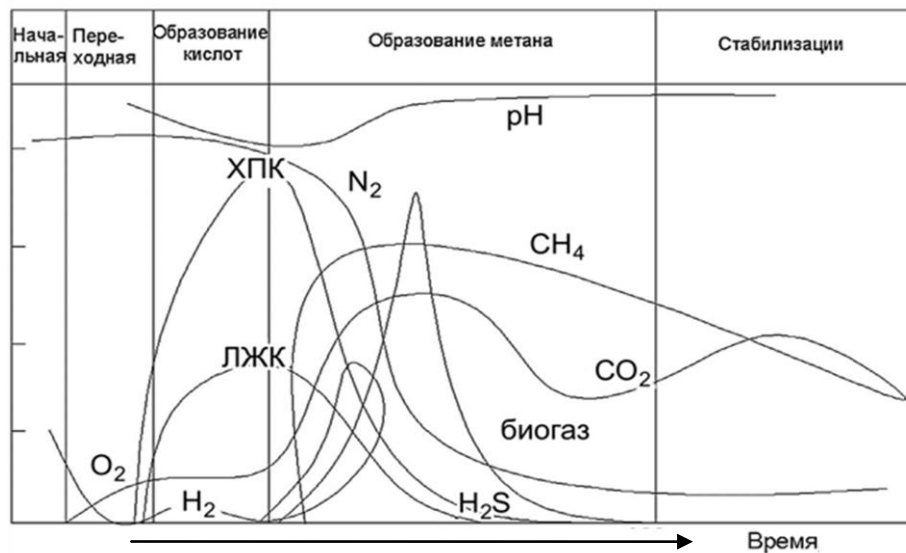


Рисунок 1.3 – Фазы процессов, происходящих в массиве полигона [52]

Процессы разложения захороненных отходов происходят последовательно в аэробных и анаэробных условиях. Принципиальные процессы разложения органических веществ при захоронении отходов на полигонах представлены на рисунке 1.4 [53].

На ранних стадиях эксплуатации полигона (до 1 года) отходы подвергаются аэробной биодеструкции. Длительность аэробной фазы зависит от предварительной обработки и способа захоронения ТКО [28]. Аэробные процессы обычно протекают быстрее, сопровождаются большим количеством выделяемого тепла [45,52,54]. В аэробных условиях (на глубине до 50 – 80 см) достаточно быстро протекает гидролиз и окисление пищевых отходов, содержащих жиры, белки, протеины [34,52,55,56]. По мере использования запасов кислорода активность аэробных процессов снижается и в захороненных ТКО начинают преобладать анаэробные процессы, вызываемые деятельностью анаэробных микроорганизмов. Основными продуктами аэробных процессов являются диоксид углерода и вода [34,52].

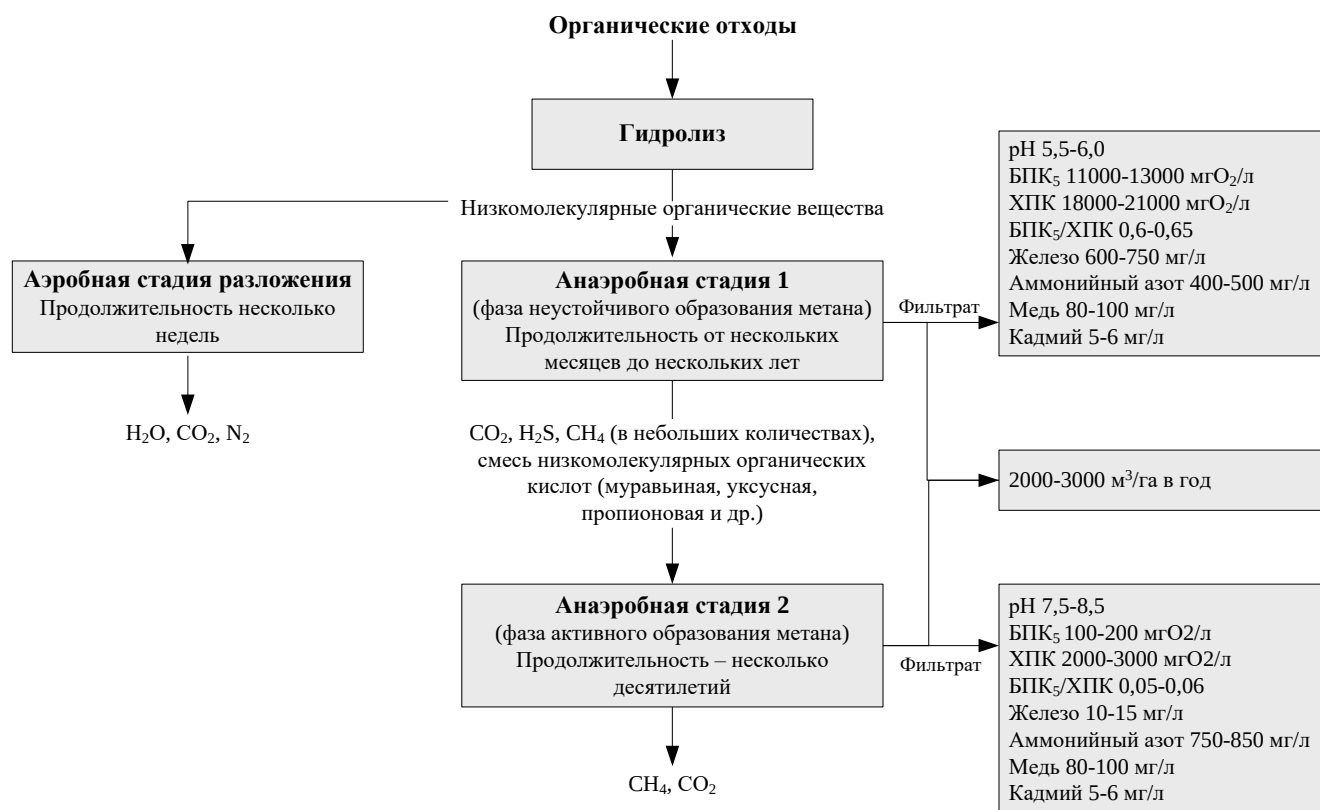


Рисунок 1.4 – Принципиальные процессы разложения органических веществ при захоронении отходов на полигоне [53]

В результате уплотнения и увеличения количества отходов в массиве полигона начинаются анаэробные процессы, которые могут длиться десятки и сотни лет, и создающие основные эмиссии загрязняющих веществ. Анаэробные процессы протекают значительно медленнее, сопровождаются на порядок меньшим выделением тепла, чем при аэробных процессах на полигоне [54]. Основными стадиями биодеструкции отходов на полигонах в анаэробных условиях являются:

- гидролиз,
- ацетогенез,
- активный метаногенез,
- стабильная фаза метаногенеза,
- полная ассимиляция [52,55,57-63].

Стадии анаэробной биодеструкции совпадают с основными этапами жизненного цикла полигона: активной эксплуатации, рекультивации и ассимиляции [55,57-59].

В фазе гидролиза ($pH = 6,5 - 7,2$), длящейся несколько месяцев, под действием ферментов протекает биодеструкция легкоразлагаемых фракций ТКО с образованием длинноцепных и разветвленных жирных кислот, аминокислот, глицерина, полисахаров, аммиака. При протекании этих процессов в теле полигона отмечается повышение температуры [34,54,57].

В ацетогенной, или кислой фазе, продолжающейся несколько лет, происходит дальнейшее разложение биоразлагаемой фракции отходов, основными продуктами которого являются уксусная и пропионовая кислоты, углекислый газ, вода, приводящие к снижению величины pH от 6,5 до 5,6. Фильтрат характеризуется высокими значениями ХПК (500-60000 мг $O_2/л$) и БПК₅ (200-40000 мг $O_2/л$) [57,60,61].

Далее происходит метаногенная стадия, где под действием метаногенных бактерий происходит дальнейшее разложение отходов. Выделяют две фазы метаногенеза: активную, продолжающуюся 10–30 лет и стабильную, длящуюся до 100 лет [34,52,57].

В активной фазе метаногенеза протекает ферментативное разложение образованных в ацетогенной фазе кислот, сопровождающееся значительным выделением газов (метан, углекислый газ, аммиак и др.) и приводящее к повышению pH среды (7,2–8,6) [45]. На данной стадии происходит разложение 50-70 % целлюлозы и гемицеллюлозы с образованием биогаза и соединений гумусовой природы, полифенолов и др. В фильтрате снижается содержание органических веществ (ХПК = 3000-4000 мг $O_2/л$, БПК₅ = 100-400 мг $O_2/л$) [52,55,58-60].

Стабильная стадия метаногенеза лимитирует общую скорость разложения органических веществ в теле полигона. Признаком наступления данной фазы является наличие более 50 % метана в пробах биогаза [45,63]. На стабильной стадии метаногенеза происходит снижение содержания питательных веществ,

ингибирующие примеси приводят к замедлению и стабилизации биохимических процессов, рН отходов находится на уровне 7,5-8,0 [52]. На данной стадии протекают ферментативный гидролиз лигнина с образованием ароматических и жирных кислот, дальнейшая биodeградация целлюлозы и химическая деструкция трудно разлагаемых фракций отходов (полимерных материалов) [55,59].

В стабильной фазе снижаются скорость и объем эмиссий метана, при этом основным источником загрязнения окружающей среды становятся фильтрат, характеризующиеся высоким содержанием биорезистентных компонентов, повышенной минерализацией (до 7000 мг/л) [22,28,52], снижением значений ХПК=100-2000 мг O_2 /л и БПК₅= 50-200 мг O_2 /л [57].

Стадия ассимиляции наступает постепенно в течение 50-100 лет на пострекультивационном этапе жизненного цикла объекта захоронения. В фильтрате закрытых объектов возможны резкие повышения концентраций ионов тяжелых металлов, токсичных органических соединений (фенолов, крезолов, хлорорганических веществ) [34,63]. На этом этапе происходит затухание всех процессов [52,57].

Скорость анаэробного разложения отходов зависит от метаболической активности метановых бактерий, которая, в свою очередь зависит от:

- температуры (оптимум при $t = 33-54\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- отношения C/N (оптимум в диапазоне 10-16);
- величины рН (оптимум около 6,5) и других внешних условий (наличия в ТКО солей тяжелых металлов, аммиака, нитратов, сульфатов и др.).

На процессы разложения отходов оказывают влияние такие факторы как присутствие кислорода, водорода, питательных веществ, ингибиторов, показателя реакции среды, щелочности, компонентного состава отходов, температуры, влажности. Многие факторы существенно влияют на скорость и глубину разложения ТКО, расход и состав фильтрата и биогаза в зависимости от количества и качества захороненных отходов [54,57,64].

Факторы, влияющие на процессы биодеструкции отходов

Состав отходов

Состав захороняемых отходов, является важным фактором, влияющим на процессы биодеструкции отходов. В настоящее время синтетические органические материалы, такие как полиэтиленовые пакеты, составляют значительную часть коммунальных и промышленных отходов. Исследования [65] показали, что полимерные материалы являются биологически деградирующими, но скорость их биодеструкции достаточно мала, что полимерные компоненты не учитываются при оценке потенциальной генерации метана [51].

В зависимости от скорости и полноты разложения компоненты ТКО разделяют на группы [66]:

- быстроразлагаемые: пищевые отходы, бумажная посуда, журнальная бумага;
- среднеразлагаемые: полиэтиленовая пленка, офисная бумага, растительные отходы;
- медленноразлагаемые: гофрированный картон, газеты, дерево.

Время разложения, необходимое для полной минерализации биоразлагаемых фракций ТКО зависит от условий ферментации [67-69]. Авторы [67] говорят, что длительность процесса биodeградации отходов составляет от 12 до 20 лет.

Определение степени разложения отходов и фактора биоразложения для компонентов отходов B_f (формула 1.1), исходя из содержания в них лигнина L_c , как наименее разлагаемого компонента, представлены в работах [67-69] (таблица 1.3).

$$B_f = 0.83 - 0.28 \times L_c \quad (1.1)$$

Для других компонентов отходов, не представленных в таблице 1.3, принимается значение фактора биоразложения равное 0,83. Однако значение фактора биоразлагаемости для таких отходов как резина, кожа, пластик, текстиль должно быть ниже, чем для пищевых и растительных отходов, а инертные компоненты не должны учитываться. Снижение количества легкоразлагаемых

компонентов в ТКО может привести к торможению процесса метаногенеза, к неполной биodeградации отходов [69].

Таблица 1.3 – Время полураспада и фактор биоразложения различных типов отходов [67,68]

Тип отходов	Наименование отходов	Время полураспада при условиях разложения			Фактор биоразложения
		влажные	средние	сухие	
Быстроразлагаемые	Пищевые отходы, одноразовая бумажная посуда, журнальная бумага	3 года	7 лет	15 лет	0,83
Средне­раз­лагаемые	Полимерная пленка, полимерная упаковка, офисная бумага, растительные отходы	7 лет	15 лет	25лет	0,6 0,72
Медленно­раз­лагаемые	Гофрированный картон, газетная бумага, древесина	15 лет	25 лет	50 лет	0,22

Убывание разлагаемых компонентов ТКО по массе может быть описано формулой 1.2 [52]:

$$m = m_0 \left(1 - e^{\frac{\ln 2 \Delta t}{T_{0,5}}}\right), \quad (1.2)$$

где m - количество оставшейся массы на момент времени t ; m_0 – исходно количество массы на момент времени, t_0 , кг; $T_{0,5}$ – время полуразложения, лет; Δt – время складирования, лет.

Содержание влаги

Содержание влаги в ТКО является чрезвычайно важным показателем, поскольку он оказывает влияние на разложение отходов в массиве полигона.

Для большинства ТКО содержание влаги колеблется от 15 до 40%, в зависимости от состава отходов, сезон года, а также погодных условий [68]. Вода в массиве захоронения ТКО выполняет функцию перемещения питательных веществ, разбавляет ингибиторы и распределяет микрофлору между отдельными частицами отходов [34,57,58].

Кроме того, некоторые исследователи отмечают, что увеличение содержания влаги может увеличить скорость образования метана на полигонах

[59,70,71]. Авторы [72,73] экспериментально установили, что выход метана увеличивается при повышении влажности от 20 до 60 % [57]. Содержание влаги в массиве захоронения отходов зависит от исходного содержания влаги в отходах, количество осадков, прошедших через полигон во время периода эксплуатации. Способность абсорбировать влагу из различных видов отходов различны, что в первую очередь зависит от предела насыщенности отходов. Бумага и текстильные отходы могут поглощать примерно в 4 раза больше влаги, чем растительные отходы (в расчете на сухую массу). Следовательно, влияние содержания влаги на разложение каждого компонента отходов зависит от его предела насыщения [40].

pH

pH является показателем определения стадии разложения ТКО, было определено, что значения pH находятся в диапазоне от 6 до 9. Оптимальный диапазон pH для анаэробных систем колеблется в пределах от 6,5 до 7,6 [74,75]. pH фильтрата для обычных свалок находится в диапазоне от 4,7-8,8, и pH 5,4-8,6 для биореакторного полигона [76-78].

Температура

Анаэробные процессы происходят лучше всего в пределах 30-38°C для мезофильных и 50-60°C для термофильных организмов. Оптимальное образование метана из ТКО происходит при 41°C [57,64]. Кроме того, некоторые исследователи обнаружили, что повышение температуры отходов также усиливает активность микроорганизмов, тем самым увеличивая образование метана в массиве захоронения отходов [46,60,71,77]. При повышении температуры от 20 до 30–40 С в лабораторных условиях было установлено, что скорость метаногенеза возрастает в 100 раз [57].

Содержание органического вещества

Изменение содержания органического вещества в ТКО с возрастом влияет на его механические характеристики и изменение его объема. Содержание органического вещества ТКО уменьшается с разложением. На больших глубинах для ТКО характерна высокая степень разложения. Поэтому на больших глубинах

содержание органических веществ в ТКО будет ниже, и выше на уровне поверхности полигона, где ТКО находится на начальной стадии разложения [57].

Уплотнение отходов

Средняя плотность ТКО в местах сбора составляет 0,14-0,180 т/м³ [54], а при специальном уплотнении на полигонах плотность увеличивается до 600-0,8 т/м³ и более [78,79]. Плотность зависит от компонентного состава, возраста, длительности нахождения в неподвижном состоянии и других механических воздействий. При увеличении плотности ТКО уменьшается объем пор, заполненных воздухом, что оказывает влияние на воздушный режим [51,64,72].

Авторами [64,82] установлено, что для отходов с высоким содержанием воды увеличение плотности от 0,20 до 0,47 т/м³ (по сухой массе) способствует ускорению процессов разложения.

1.3.2. Оценка воздействия полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на окружающую среду

При длительном захоронении отходов протекают процессы их биохимического и химического разложения, сопровождающиеся образованием эмиссий в виде фильтрата и биогаза, которые являются источниками загрязняющих веществ в компоненты геосреды на всех этапах жизненного цикла полигона [54,81-84].

Фильтрат

Фильтрат представляет собой жидкость, которая образуется при разложении отходов, а также жидкость (осадки, поверхностный сток, подземные воды и т.д.) проходимая через массив отходов. По мере того как вода просачивается вниз, биологические и химические компоненты отходов переходят в фильтрат.

Таким образом, фильтрат представляет собой жидкость, которая содержит растворенные и взвешенные материалы, которые, если должным образом не контролируются, могут проходить через нижележащие слои почвы и загрязнять подземные и поверхностные воды [57].

Очистка фильтрата может быть очень трудным, длительным и дорогостоящим мероприятием. В течение первых нескольких лет, фильтрат легко поддается биологическому разложению органического вещества, характеризующийся кислой рН и высоким БПК₅ [19]. При недостаточности природоохранных сооружений или их отсутствия, фильтрат может просачиваться в почву и грунты по территории полигона, поступать в ближайшие водные объекты. Концентрации загрязняющих веществ в водном объекте при этом зачастую возрастают и нередко достигают или превышают ПДК [54].

В зависимости от преобладания фазы разложения ТКО существуют два типа фильтрата: «молодой» фильтрат – кислотная среда и «старый» фильтрат – в основном щелочная среда метаногенной фазы [18,55,63].

Особенностями фильтрата полигонов захоронения ТКО являются:

- сложный химический состав, представленный органическими и неорганическими веществами, изменяющийся на этапах жизненного цикла полигона;
- высокое содержание токсичных веществ и биорезистентных примесей;
- присутствие в фильтрате различных групп микроорганизмов, в том числе патогенных;
- зависимость объема и состава фильтрата от площади полигона, количества захороненных отходов, количества атмосферных осадков [18,57].

Качество фильтрата зависит от химического состава захороненных отходов, значения рН и окислительно-восстановительных условий, неоднородности потока воды, а также физической, химической и / или биологической трансформации отходов. В таблице 1.4 показаны типичные диапазоны концентраций для компонентов фильтрата.

Таблица 1.4 – Концентрации компонентов фильтрата в кислой и метаногенной фазе на полигонах захоронения ТКО [18]

Параметр	Кислая фаза		Метаногенная фаза		Независимо от фазы		
	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Параметр	Среднее	Диапазон
pH (-)	6,1	4,5 – 7,5	8,0	7,5 – 9,0	АОХ (мг/л)	2	0,32 – 3,35
БПК ₅ (мг/л)	13000	4000 – 40000	180	20 – 550	Cl (мг/л)	2100	100 – 5000
ХПК (мг/л)	22000	6000 – 60000	3000	500 – 4500	NH ₄ -N (мг/л)	750	30 – 3000
SO ₄ (мг/л)	500	70 – 1750	80	10 – 420	NO ₃ -N (мг/л)	3	0,1 – 50
Ca (мг/л)	1200	10 – 2500	60	20 – 60	NO ₂ -N (мг/л)	0,5	0 – 25
Mg (мг/л)	470	50 – 1150	180	40 – 350	Робщ (мг/л)	6	0,1 – 30
Fe (мг/л)	780	20 – 2100	15	3 – 280	Cd (мг/л)	0,006	0,0005 – 0,14
Mn (мг/л)	25	0,3 – 65	0,7	0,03 – 45	Cr (мг/л)	0,3	0,03 – 1,6
Zn (мг/л)	5	0,1 – 120	0,6	0,03 – 4	Cu (мг/л)	0,08	0,004 – 1,4
Sr (мг/л)	7	0,5 – 15	1	0,3 – 7	Ni (мг/л)	0,2	0,02 – 2,05

Различия между разными измерениями и полигонами захоронения отходов могут быть обусловлены различными составами отходов, климатическими условиями, разным распределением потока воды в отходах или различными проектами захоронения отходов (например, толщина отходов) и управлением полигона (например, рециркуляция фильтрата, технология уплотнения) [85]. Например, доля отходов, входящих в поток воды, как правило, находится на уровне от 60% до 5% на разных полигонах [86], что очень важно как для уровня образования фильтрата, а также для долгосрочного эмиссионного потенциала полигонов [86,87].

Несмотря на то, что на отдельных полигонах захоронения ТКО имеются большие расхождения в результатах определяемых компонентов, обычно наблюдается тенденция к снижению концентраций для многих компонентов фильтрата с увеличением возраста полигона [60,88].

Органическое загрязнение фильтрата часто выражается как общий органический углерод (ООУ), ХПК и БПК₅. Авторами [89] отношение БПК₅/ХПК было предложено в качестве индикатора степени разложения отходов, отношение БПК₅/ХПК ниже 0,1, указывает на то, что отходы не оказывают негативного воздействия на компоненты геосреды и здоровье человека.

В целом на полигонах было обнаружено много различных ксенобиотических соединений [90], и поскольку стойкие органические

загрязнители накапливаются в отходах, они также могут присутствовать в фильтрате полигона [91].

Для большинства неорганических макрокомпонентов (например, хлориды, сульфаты) тенденции снижения концентрации могут наблюдаться в фильтрате полигонов после их закрытия [88].

Поскольку концентрации аммонийного азота снижаются медленно или остаются в одном и том же диапазоне в течение десятилетий, аммонийный азот был идентифицирован как критическая составляющая фильтрата [88,92,93]. Тяжелые металлы обычно присутствуют на очень низком уровне в фильтрате полигона с концентрациями в диапазоне или ниже стандартов качества питьевой воды [89].

Биогаз

Жизнедеятельность разнообразной микрофлоры в теле полигона ведет к разложению органических веществ и к образованию большого количества газообразных соединений (биогаза): метан (CH_4) – 40-70%, углекислый газ (CO_2) – 30-60%, азот (N_2) – 5-15%, кислород (O_2) – до 2%, а также микроколичеств нескольких десятков ароматических, галогенсодержащих и хлорированных углеводородов, а всего более 100 компонентов [22].

Количество образованного биогаза зависит от состава отходов. Основываясь на теоретических оценках, потенциал образования газа для ТКО составляет от 120 до 450 л/кг СВ ТКО, тогда как экспериментальные исследования показывают диапазон от близкого к нулю до 390 л/кг СВ ТКО [67].

В зависимости от уровня образования биогаза объекты захоронения отходов подразделяются на [22,94]:

- *безопасные* – захороненные отходы газохимически инертны, содержание CH_4 в приземном слое менее 0,1 об. % и углекислого газа менее 0,5 об. %;
- *потенциально опасные* – содержание CH_4 в приземном слое более 0,1 об. % и CO_2 более 0,5 об. %;
- *опасные* – содержание CH_4 в приземном слое более 1,0 % и CO_2 до 10 %;

– *пожаровзрывоопасные* - содержание CH_4 в приземном слое более 5,0 % и CO_2 более 10 %.

Распространение биогаза и неприятного запаха от полигонов захоронения отходов происходит на расстояние до 300 - 400 метров. Нагрузки от запаха, вызываемые биогазом, обусловлены наличием примесей таких компонентов как сероводород, органические соединений серы, различные эфиры, алкинбензолы и др. [55]. Эти вещества с резким запахом в малых количествах могут оказывать вредное действие на здоровье население близлежащих районов. Неконтролируемая эмиссия биогаза приводит к возникновению пожаров и увеличению риска взрывов [95].

1.4. Оценка стабильности твердых коммунальных отходов в массиве полигона

Современная концепция управления отходами базируется на принципах устойчивого развития и минимизации их воздействия на окружающую среду. Для экологической оценки воздействия полигонов захоронения ТКО используется термин «устойчивый полигон», т.е. полигон, массив отходов которого находится в стабильном состоянии с точки зрения конструктивной (отсутствие просадок поверхности) и биохимической стабильности [20].

Под стабильными отходами понимаются отходы эмиссии загрязняющих веществ, которых не превышают экологически приемлемый уровень и не оказывают негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Состояние полигона зависит от ряда взаимосвязанных факторов: первоначальный состав отходов, степень уплотнения отходов, климатические условия, влажность отходов, количество образующегося биогаза, физико-химический состав фильтрата и т.д.

В настоящее время в России нет нормативных документов, устанавливающих параметры для определения стабильности отходов до и после их захоронения на полигонах. В соответствии с законодательством в европейских странах стабильность отходов должна быть достигнута до захоронения их на

полигонах [96]. По данным австрийского постановления о полигонах захоронения отходов механико-биологическая (МБО) или предварительная термическая обработка ТКО является обязательным условием перед захоронением с целью минимизации выбросов газообразных веществ и содержание экологически значимых соединений в фильтрате. Материалы после МБО, предназначенные для захоронения отходов должны соответствовать предельным значениям в отношении стабильности.

Анализ российского и зарубежного опыта по способам определения стабильности [96-102] захороненных отходов на полигонах показал, что для этих целей используются методы определения стандартных физико-химических параметров отходов и фильтрата (содержание органического вещества, pH, ХПК, БПК₅, аммонийный азот и т.д.); аэробные и анаэробные биологические тесты (GS₂₁, RI₄), позволяющие определять потенциал окисления органической составляющей ТКО и биогазовый потенциал отходов [97]. Известные методы оценки стабильности отходов являются достаточно трудоемкими и длительными.

Авторами [98] были предложены параметры и их граничные значения для оценки стабильности отходов, на основании которых объект захоронения отходов можно считать стабильным (устойчивым). Контролируемыми показателями в фильтрате являются: ХПК, аммонийный азот (NH₄-N), хлориды; в биогазе оценивается объем образования метана; в образцах отходов контролируются показатели биодеструкции отходов (RI₄ ≤ 2,5 мгО₂/г СВ) и т.д.

В таблице 1.5 представлены граничные значения параметров, определяемых в фильтрате, биогазе, отходах, установленные рядом зарубежных ученых [18]. Граничные значения параметров являются так называемыми критериями завершения процессов на полигонах. По мере достижения значений параметров, отходы полигона можно отнести к стабильным.

Граничные значения для завершения постэксплуатационного периода, предложенные Stegmann и др. (2006) основаны на подходах к значительному уменьшению потенциала выбросов полигона захоронения ТКО до того, как будет установлено окончательное покрытие [98].

Таблица 1.5 - Критерии завершения постэксплуатационного обслуживания, предлагаемые в рамках различных граничных значений параметров [18]

	Stegmann и др. (2006)	Cossu и др. (2007)	Кнох и др. (2005)	Krümpelbeck (2000)
Фильтрат	ХПК: 5 - 20 г/ м ² * год, NH ₄ -N: 2,5 - 10 г/ м ² * год,, Cl: 10 - 20 г/ м ² * год, АОХ: 0,01 - 0,05 г/ м ² * год	ХПК: < 200 мг/л Отношение БПК ₅ /ХПК и концентрации NH ₄ -N (значения не представлены)	NH ₄ -N: ≤ 10 мг/л	ХПК: ≤ 16 - 70 мг/л, NH ₄ -N: ≤ 9-20 мг/л ХПК: ≤ 3 -14 г/м ² *год, NH ₄ -N: ≤ 1,8-4 г/м ² *год
Биогаз	<u>Образование метана</u> : <25 м ³ CH ₄ /ч и < 0,5 л CH ₄ /м ² *ч Выбросы углеводородов: <25 ppm	Скорость образования биогаза: <25 м ³ /ч Образование метана: <1 л CH ₄ м ² * ч (CO ₂ + CH ₄) /N ₂ : значение не указано	Объем выбросов парниковых газов: ≤ 8,4 л/м ² *ч	-
Качество отходов	Водная вытяжка из отходов (L/S = 10 л/кг): ТОС: ≤ 150 мг/л, NH ₄ -N ≤ 50 мг/л, цианид ≤ 0,1 мг/л, АОХ ≤ 0,5 мг/л (дополнительно: тяжелые металлы, органические соединения , рН, ЕС) <u>Биоразлагаемость</u> : Дыхательный индекс (RI ₄): ≤ 2,5 мг O ₂ /г сухого вещества (СВ); GS ₂₁ : 10 л/кг СВ	<u>Биоразлагаемость</u> : RI ₄ : ≤ 2,5 мг O ₂ /г СВ GS ₂₁ : < 10 л / кг СВ	<u>Биоразлагаемость</u> : Потери при прокаливании: ≤ 25% Соотношение целлюлозы и лигнина: < 0,2 Биохимический потенциал метана (БПМ): ≤ 0,2 м ³ CH ₄ /мг СВ	-
Комментарии	Специфические для объекта критерии, касающиеся геотехнической стабильности, элементов полигона и гидрогеологии	Все целевые значения предназначены для целей проверки, чтобы решить, следует ли проводить последующий анализ рисков	Тесты биодеструкции не точны и требуется дополнительная оценка конкретного участка	Уровни концентрации применяются только в том случае, если скорость образования фильтрата < 200 мм/год

Cossu и др. (2007) [99] предложили методологию оценки «конечного качества хранения» полигона на основе сочетания общих критериев и анализа риска для конкретного участка.

Оценка конечного качества хранения отходов также была предложена Кнох и др. (2005) для 14-летних испытательных полигонов. Авторы утверждают, что разложение органических компонентов ТКО является ключевым процессом в отношении достижения конечного качества хранения. Критерии оценки качества конечного хранения отходов на полигоне указывает на удаление от 95 до 99,5% разлагаемых органических веществ, но соответствующие тесты на биоразлагаемости отходов по-прежнему являются довольно неточными и иногда несовместимыми друг с другом [100].

Основываясь на оценке данных о выбросах на немецких полигонах захоронения ТКО, Krümpelbeck (2000) определяет фильтрат в качестве основной долгосрочной угрозы на полигонах. Следовательно, предлагаемые граничные значения относятся к ХПК и содержанию аммонийного азота в фильтрате [92].

В целом, все авторы подходов, основанных на граничных значениях параметров, подчеркивают, что необходима дополнительная оценка для каждого конкретного объекта, чтобы дополнить предлагаемые значения до того, как будет принято решение о завершении постэксплуатационного обслуживания.

В последние годы альтернативным методом экспрессной оценки стабильности отходов является метод синхронного термического анализа (СТА) отходов, который объединяет термогравиметрию (ТГ) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК). Метод позволяет получать информацию о составе, термической и окислительной стабильности материалов, фазовых переходах, температурах протекания и кинетике химических реакций [103].

Термические методы анализа находят широкое применение в почвоведении для оценки изменения содержания органического вещества, в анализе конструкционных материалов, например, для анализа термопластических полимеров, композиционных материалов, металлов, а также фармацевтических материалов и т.д. Калориметрические исследования были использованы для

описания термического поведения при сжигании биомассы [104]. Авторы [105] исследовали возможность использования ТГ и ДСК для оценки процесса компостирования ТКО и растительных отходов. В работе [106] сообщается об использовании термических характеристик для оценки процессов стабилизации осадка сточных вод на полигонах.

Авторами [107] СТА использован для оценки содержания органического вещества свежих и захороненных отходов. Деграция отходов вызывает снижение органического вещества, снижается интенсивность теплового потока. На рисунке 1.5 представлены кривые ДСК для свежих и захороненных отходов.

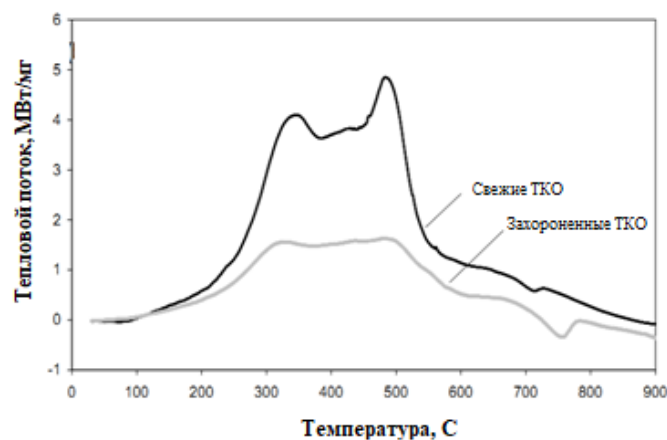


Рисунок 1.5 – Кривые ДСК для свежих и захороненных ТКО [107]

Авторами [108] исследованы изменение кривых ДСК и ТГ для отходов с разных объектов захоронения: старая свалка, биореакторный полигон и промышленный полигон (рисунок 1.6).

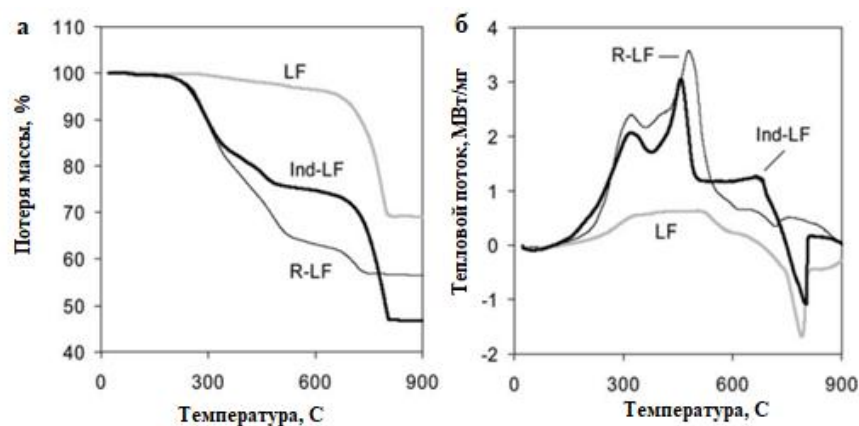


Рисунок 1.6 – (а) Кривые ТГ и (б) ДСК разных объектов захоронения отходов: старый полигон (LF), биореакторный полигон (R-LF), промышленный полигон (Ind-LF) [108]

Старые полигоны (LF) характеризуется низким содержанием органического вещества, которое найдено по значительной потере массы при $T > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 1.8 а) и существенным эндотермическим реакциям (рисунок 1.8б). Биореакторный полигон (R-LF) обладает высоким содержанием органического вещества, вследствие значительной потери массы, два интенсивных экзотермических пика при $T < 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и низкая потеря массы при $T > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По кривым ДСК можно рассчитать удельные энтальпии (тепловой эффект) образцов отходов. В Университете природных ресурсов и прикладных естественных наук г. Вена (ABF-BOKU) разработана методика оценки степени стабильности образцов отходов по величине отношения удельных энтальпий сухого вещества (СВ) (теплосодержание образца в пересчете на сухое вещество) и органического сухого вещества (теплосодержания органического вещества в образце при пересчете на сухое вещество) (ОСВ). Классификация отходов по степени стабильности была разработана на основании корреляции отношения энтальпий СВ и ОСВ с учетом реакционной способности образцов, определенной с помощью биохимических параметров потенциала газообразования (GS_{21}) и показателя дыхательной активности (RI_4) [98, 108].

Авторами [108] установлено, что отношение энтальпий СВ и ОСВ для неактивных старых свалок (LF) и полигонов отходов после механобиологической обработки ТКО составляет $< 0,25$. Для образцов с биореакторных полигонов (R-LF) это отношение составляет 0,25-0,5, а образцы отходов с отношением $\frac{Э(СВ)}{Э(ОСВ)}$ более 0,5 относятся к реактивным отходам [98,108].

Установлено, что для оценки стабильности отходов и прогнозирования уровня эмиссий полигона в компоненты геосреды, необходима не только оценка образования эмиссий биогаза и качественного состава фильтрата, но и оценка состава и свойств захороненных отходов.

1.5. Характеристика современных технических мероприятий по снижению эмиссий полигонов захоронения твердых коммунальных отходов

В настоящее время существует большой выбор методов и технологий, используемых для снижения эмиссий на полигонах захоронения отходов.

В каждой организации, регулирующей процесс эксплуатации полигонов, имеется ряд требований к процедуре закрытия полигона и к обслуживанию в течение постэксплуатационного периода. В период эксплуатации полигона должны быть учтены и зарезервированы финансовые средства, достаточные для осуществления постэксплуатационного обслуживания полигона, стабилизация отходов в массиве захоронения должна быть достигнута в течение постэксплуатационного периода (в настоящее время - 30 лет). Этот средний срок может быть уменьшен или увеличен в зависимости от технического состояния полигона после закрытия и информации о распространении загрязняющих веществ за пределы полигона [109].

Технические мероприятия по сокращению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона можно разделить на две группы:

1. Мероприятия, позволяющие сократить часть эмиссий до захоронения отходов на полигоне:

- предварительная сортировка отходов;
- предварительная обработка отходов (термическая, анаэробная или аэробная механо-биологическая обработка ТКО, предварительное компостирование ТКО).

2. Мероприятия, позволяющие сократить эмиссии на эксплуатационном и постэксплуатационном этапах жизненного цикла полигона:

- сооружение на полигонах системам инфильтрации воды и/или воздуха для ускорения процессов стабилизации отходов;
- устройство метаноокисляющих покрытий [112].

Предварительная сортировка ТКО

В России одним из методов снижения содержания биоразлагаемых компонентов, направляемых на захоронение, может быть предварительная сортировки отходов [112] (отделение органических компонентов отходов на этапе раздельного сбора или с использованием мусоросортировочных комплексов). Предварительная сортировка отходов позволяет не только извлечь вторичные ресурсы, но и снизить объем отходов, захораниваемых на полигоне.

Проведенные авторами [113] исследования показали, что внедрение предварительной сортировки ТКО позволяет снизить общий потенциал генерации метана на 10-30 %.

В случае применения технологий промышленной сортировки отходов снижение образования метана достигается за счет извлечения из потока отходов бумаги и картона. Авторами [112] установлено, что при извлечении в ходе сортировки инертных (с точки зрения газообразования) компонентов вторичного сырья (металлы, полимеры, стекло), удельный метановый потенциал «хвостов», отправляемых на захоронение увеличивается.

Предварительная стабилизация ТКО

Механо-биологическая обработка (МБО) отходов является основным методом стабилизации отходов перед захоронением. МБО позволяет стабилизировать органическую часть отходов и, как следствие, происходит снижение эмиссий биогаза и фильтрата. Комбинация технологических схем МБО позволяет отбирать остаточное вторсырье из отходов, производить компост, топливо для промышленных печей, мусоросжигательных и/или цементных заводов или энергию (биогаз) [114].

Основными стадиями МБО являются механическая обработка, аэробное компостирование и/или анаэробное сбраживание. Целью биологической обработки является максимально возможная деструкция оставшихся органических фракций отходов анаэробно-аэробным или аэробным методом [116].

Авторами [115] установлено, что после МБО от 8 до 12 недель реактивность отходов снижается до граничных значений $RI_4 < 7$ мгО₂/г СВ и $GS_{21} < 20$ л/кг СВ, снижается газообразование отходов при их захоронении на 90-95% по сравнению с полигонами необработанных отходов.

Уровень загрязнения органическими веществами фильтрата полигонов, на которых захораниваются отходы после МБО, снижается на 90% по сравнению с соответствующим уровнем загрязнения фильтрата на полигонах с необработанными отходами по показателям ХПК, БПК₅, NH₄-N [115].

Захоронение на полигоне отходов после МБО имеет следующие преимущества:

- сокращение объема и массы (до 70 %);
- сокращение (до 95 %) потенциала газообразования;
- повышение плотности массива отходов и увеличение полезного объема полигона;
- более равномерные процессы осадки полигона;
- иммобилизация тяжелых металлов и органических соединений посредством образования гуминовых веществ [116].

Сбор биогаза и отведение из массива полигона

Целью дегазации полигонов захоронения отходов является: исключение отрицательного воздействия биогаза на окружающую среду, в том числе снижение взрыво- и пожароопасности массива отходов, устранение залповых выбросов биогаза, снижение негативного вредного и опасного воздействия на персонал, население и объекты окружающей среды, утилизация биогаза [57].

Практика эксплуатации систем сбора и утилизации биогаза показывает, что газосборные системы могут работать менее половины времени генерации биогаза, поскольку являются экономически выгодными только при высоких концентрациях метана. Генерация малого объема биогаза при низких концентрациях метана может продолжаться от нескольких десятилетий до 100 лет [112,117,118].

При снижении концентрации метана ниже 35-40% и расхода газа ниже 30-50 м³/ч, его энергетическое использование становится технически и экономически нецелесообразным [119].

Технические мероприятия по стабилизации отходов в массиве полигона

Сроки послеэксплуатационного обслуживания и мониторинга полигонов до достижения безопасных концентраций загрязняющих веществ могут составлять от десятков до двух сотен лет [120], что влечет за собой высокие затраты на обслуживание полигона в эксплуатационный и постэксплуатационный этапы жизненного цикла полигона. Приоритетом в данном случае является ускоренная стабилизация захороненных отходов для минимизации эмиссий в окружающую среду, т. е. полигон должен эксплуатироваться как управляемый полигон-биореактор. Ускоренная стабилизация отходов может быть осуществлена двумя путями [121-123]:

- интенсивное увлажнение массива полигона (полигон-биореактор с разложением органических веществ в анаэробных условиях с ускоренным выходом биогаза);
- принудительная аэрация массива полигона (разложение органического вещества в аэробных условиях, аналогичное процессу компостирования).

При условии эксплуатации в контролируемом и безопасном режиме полигоны-биореакторы позволяют получить полигон, который соответствует требованиям устойчивого развития.

Увлажнение массива полигона

Как правило, исходной влажности отходов в массиве полигона недостаточно для оптимальной жизнедеятельности микроорганизмов, участвующих в процессе биоразложения отходов, поэтому для дополнительного увлажнения создаются технологические системы с внесением изменений в конструкцию и эксплуатационную практику полигона [110].

Увлажнение массива полигона может осуществляться с целью:

- увлажнения для интенсификации газообразования;

- промывки для ускоренного выщелачивания веществ из массы отходов - добавление воды в количестве до 10 раз превышающем количество, используемое для увлажнения [124].

Исследования [112] показывают, что на полигонах, расположенных во влажном климате (среднегодовая норма осадков превышает величину потенциальной эвапотранспирации) суммарная генерация метана в период эксплуатации полигона на 30 % больше, чем в сухом климате. Тем самым подтверждается, что с увеличением влажности отходов происходит увеличение генерации биогаза.

Авторами [120] установлено, что при проведении ускоренной стабилизации отходов посредством интенсивного увлажнения происходит снижение концентраций органических соединений (ХПК, БПК₅), соединений азота, хлоридов в фильтрате до 80%.

Оптимальное количество воды, которое необходимо добавлять в массив полигона, а также скорость инфильтрации зависят от ряда факторов: климатические условия, геометрические параметры полигона (объем и высота слоя захораниваемых отходов, площадь полигона, площадь поверхностного гидроизоляционного покрытия и склонов), состав отходов, вместимость полигона, потенциал газообразования захороненных отходов и т.д.

В зависимости от местных условий и выбранного вида системы для инфильтрации, применяют следующие инфильтрационные жидкости: поверхностные или грунтовые воды, фильтрат с полигона захоронения отходов (после предварительной обработки / очистки), необработанный фильтрат.

Путем подбора различных сред для инфильтрации можно влиять на процесс биоразложения и адаптировать его к условиям конкретного полигона [112]. Продолжительность и интенсивность инфильтрации массива полигона необходимо корректировать в соответствии с осуществляемой программой мониторинга. Сравнение различных систем инфильтрации представлено в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Сравнение различных систем инфильтрации

Система инфильтрации	Преимущества	Недостатки
Условно контролируемое увлажнение посредством естественного образования фильтрата, поступающего через слабопроницаемое верхнее покрытие полигона	– «естественная» инфильтрация с атмосферными осадками; – не влияет на работу системы дегазации; – равномерное распределение воды; – низкие эксплуатационные затраты	– необходимость управления и контроля объема поступления воды; – в некоторых случаях неравномерное поступление воды из-за неравномерной осадки тела полигона; – требуется реконструкция всей поверхности верхнего покрытия полигона по завершению мероприятий по инфильтрации.
Методы горизонтальной инфильтрации	– не влияет на работу системы дегазации; – стандартный способ монтажа; – равномерно распределение воды	– равномерное увлажнение через всю поверхность дренажной системы на практике зачастую доступно только относительно; – затруднено равномерное внесение малых объемов воды при невысоком давлении; – требуется большое количество дренажных труб для равномерного увлажнения; – требуется вмешательство в устроенный верхний слой полигона до и после мероприятий по инфильтрации; – необходимость затрат на восстановление верхнего покрытия полигона; – чувствительность к проседанию горизонтальной системы: сдвиг/разлом/надлом трубопровода, изменение пути движения жидкости при неравномерной посадке системы трубопровода.
Методы вертикальной инфильтрации – Использование, имеющейся системы дегазации (колодцев)	– не нарушается верхнее покрытие полигона; – низкие капитальные и эксплуатационные затраты; – не требуется демонтаж по завершению мероприятий по инфильтрации	– снижение эффективности системы дегазации; – возможно поступление влаги напрямую в подстилающие участки полигона, высокие риски просачивания в основание полигона.
– Установка вертикальных нагнетательных колодцев	– не влияет на работу системы дегазации; – стандартный способ установки/монтажа скважин; – сравнительно низкие (по сравнению со всей системой) затраты на техническое обслуживание и поддержание в исправном состоянии	– выборочный выпуск воды возможен только на значительный участок полигона, особенно при малой высоте полигона; – нарушается обустройство верхнего покрытия полигона до и после мероприятий по инфильтрации; – значительные затраты на восстановление верхнего покрытия полигона.

Достоинство инфильтрации незагрязненной технической воды или воды поверхностных источников или очищенного фильтрата заключается в отсутствии поступления растворимых компонентов фильтрата в массив полигона и отрицательного влияния используемых водных средств на систему инфильтрации [112,123].

Рециркуляция фильтрата является временной мерой, которую можно использовать пока биологические процессы в массиве полигона протекают с достаточной интенсивностью. В противном случае существует опасность того, что растворимые инфильтруемые компоненты будут быстро просачиваться через слой отходов и накапливаться в нижней его части [123], что приведет к необходимости дорогостоящей повторной очистки. Это приведет не только к повышению затрат на очистку фильтрата, но и к увеличению периода обслуживания полигона после его закрытия [112].

Для осуществления увлажнения массива полигона слой минеральной изоляции основания должен быть толщиной >60 см с коэффициентом фильтрации $k < 10^{-8}$ м/с, также на полигоне обязательным условием является наличие функционирующей дренажной системы [123].

Увлажнение массива захоронения отходов (увлажнение водой или рециркуляция фильтрата) применяют в основном на эксплуатационном этапе полигона (до 20 лет). В течение данного промежутка времени фильтрат образуется в наибольших количествах, и только в этот промежуток времени эксплуатируются определенные виды систем (системы подачи и орошения поверхности полигона), обеспечивающих подвод жидкости.

Полномасштабное применение принципа работы анаэробного биореактора обеспечивает практически полную стабилизацию отходов при их соответствующем увлажнении в течение 5-10 лет в сравнении с традиционными полигонами (от 30 до 50 лет). При эксплуатации полигона как анаэробного биореактора общее количество образовавшегося биогаза не увеличивается, однако за счет увеличения скорости его генерации, выход основного количества биогаза

произойдет гораздо быстрее, после 10 лет эксплуатации полигона эмиссии биогаза составляют около 60% (рисунок 1.7) [121].

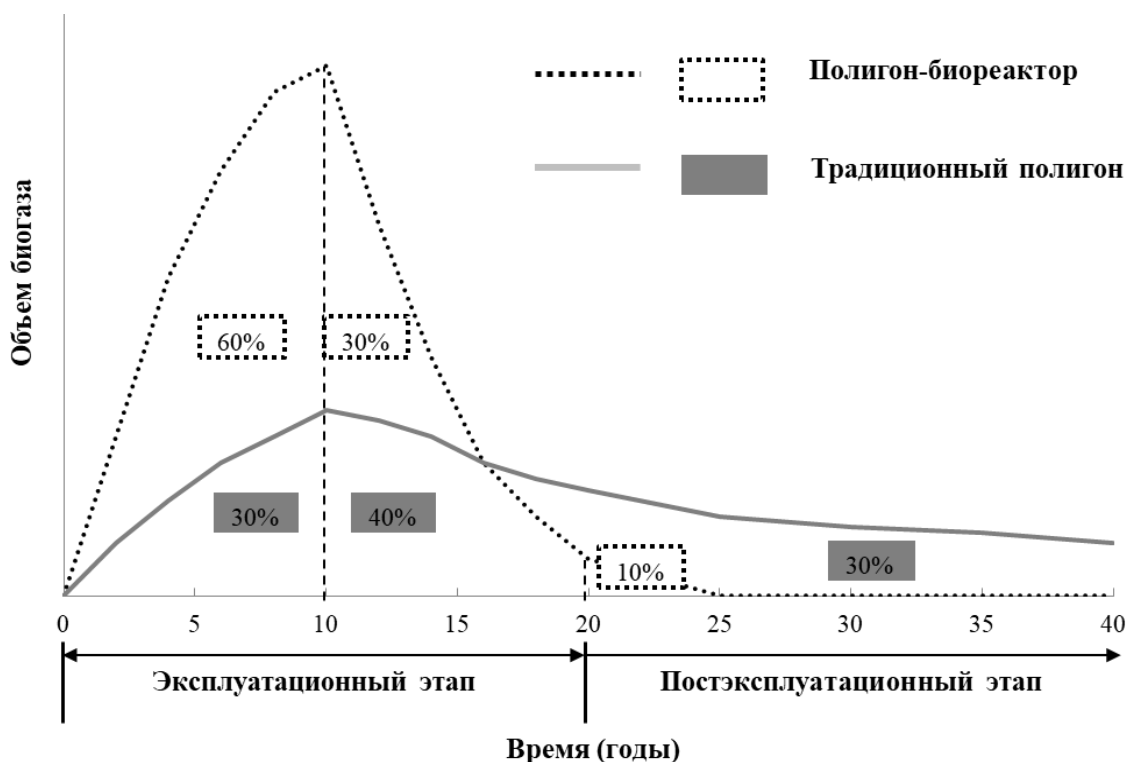


Рисунок 1.7 – Изменение газообразования во времени на анаэробном полигоне-биореакторе и традиционном полигоне

Интенсивность образования биогаза на полигонах-биореакторах существенно выше, чем на традиционных полигонах (полигон со стандартным набором защитных сооружений), следовательно, существует возможность экономически обоснованной энергетической утилизации биогаза на эксплуатационном этапе. Интенсификация процесса образования биогаза на полигоне возможна только при наличии соответствующей системы сбора и утилизации биогаза, в случае отсутствия данных сооружений на полигоне захоронения отходов, необходимо предусмотреть контроль над превышением показателей биогаза в атмосферный воздух.

Остаточные эмиссии биогаза на постэксплуатационном этапе на полигоне-биореакторе значительно ниже, чем на традиционных полигонах (около 20% от общей эмиссии).

В отличие от традиционного полигона эксплуатация полигона-биоректора позволяет управлять и контролировать процессы стабилизации отходов в массиве захоронения, увеличивая или снижая объемы образования биогаза и фильтрата, в зависимости от технического состояния полигона и ассимилирующей способности окружающей среды [112].

Аэрация массива отходов

Альтернативной технологией достижения быстрой стабилизации отходов является ввод воздуха в массив полигона (аэрация), который может осуществляться совместно с увлажнением. В большинстве случаев аэрацию массива отходов используют на завершающем этапе эксплуатации полигона и на этапе постэксплуатации [110].

Скорость подвода воздуха в массив полигона не стандартизирована, поэтому определение и корректировку параметров скорости, давления, температуры, состава газа необходимо производить на месте.

Исследования [125,126] показали, что процессы аэробной обработки позволяют снизить концентрацию органических соединений (ООУ, БПК₅), подвижность тяжелых металлов в фильтрате.

В работе [127,128] представлены данные измерений качества фильтрата полигона в Германии после 6 лет аэрации. Сравнение фильтратов из анаэробных и анаэробных лабораторных реакторов, показало значительное улучшение качества фильтрата в реакторах с отходами после аэрации. Концентрация в фильтрате аммонийного азота ($\text{NH}_4\text{-N}$) уменьшилась на 90% в сравнении с исходной концентрацией до аэрации.

Эффективность системы подвода воздуха определяется несколькими факторами:

- из-за гетерогенности тела полигона воздухопроницаемость отходов может значительно варьироваться;
- высокая влажность отходов может значительно снизить их воздухопроницаемость и, соответственно, скорость потока воздуха.

Аэробное разложение отходов приводит к образованию большего количества тепла, чем при анаэробных процессах. Быстрое образование тепла может повысить температуру отходов и привести к пожару на полигоне. Поэтому требуется тщательный мониторинг температуры и наличие возможности подачи воды в случае необходимости.

В таблице 1.7 представлены преимущества и недостатки используемых технических решений для ускоренной стабилизации отходов.

Таблица 1.7 – Преимущества и недостатки технических решений по ускоренной стабилизации отходов

Метод	Преимущества	Недостатки
Увлажнение массива полигона	- интенсификация газообразования до 3 раз выше, чем на обычных полигонах; - пролонгация периода сбора биогаза; - обеспечивается уменьшение объема отходов в массиве полигона на 15-30%; - достигается более полное разложение органических соединений в фильтрате	- сложность равномерного распределения воды, отсутствие подвода воды в отдельные части массива полигона; - помехи для ежедневной деятельности по эксплуатации полигона
Аэрация массива полигона	- стабилизация отходов достигается быстрее и концентрация загрязняющих веществ в фильтрате ниже по сравнению с анаэробными системами - в фильтрате уменьшается количество органических соединений, снижается концентрация $\text{NH}_4\text{-N}$	- при недостаточной влажности отходов избыточное выделение тепла может привести к их возгоранию - при избыточном увлажнении массива полигона создается физический барьер для контакта воздуха с отходами

Полигоны-биореакторы обеспечивают возможность экономии средств на постэксплуатационное обслуживание. Отходы в массиве полигона-биореактора стабилизируются в течение короткого промежутка времени, поэтому затраты на мониторинг и постэксплуатационное обслуживание полигона, связанные с ремонтными работами, усадкой и нарушением целостности покрытия и т.п. гораздо ниже, чем в случае традиционных полигонов, когда отходы после закрытия покрываются водонепроницаемым изолирующим слоем.

Устройство метаноокисляющих покрытий

При снижении концентрации метана ниже 35% и расхода газа ниже $30 \text{ м}^3/\text{ч}$, его энергетическое использование становится технически и экономически нецелесообразным [106]. В данном случае одним из наиболее перспективных и

экономически эффективных вариантов снижения остаточных эмиссий метана в окружающую среду является использование инженерных биологических систем, основанных на микробном окислении метана.

Метаноокисляющие покрытия могут применяться при эмиссии метана на поверхности полигона до $5 \text{ л/м}^2 \times \text{ч}$ или $<25 \text{ м}^3/\text{ч}$ [121].

В настоящее время разработано большое количество систем на основе биотехнологий - промежуточные биопокрытия, пассивно или активно вентилируемые биофильтры, биоокна и биотенты (таблица 1.8) [128].

Метаноокисляющие покрытия имеют широкую область применения:

- использование совместно с системой сбора газа с целью минимизации остаточных эмиссий;
- на старых полигонах после окончания периода максимального газообразования;
- на небольших полигонах, где сбор газа технически и экономически не оправдан;
- на закрытых полигонах во время проведения аэрации для избежания остаточных эмиссий [112,127].

Как правило, активная метанотрофная зона находится в верхних 30-40 см профиля полигона, зона максимальной окислительной активности - на глубине 15-20 см от поверхности. В большинстве случаев, стабильная скорость окисления метана для поверхностного слоя полигона составляет от 100 до 150 г $\text{CH}_4/\text{м}^2 \times \text{день}$ (при эффективности удаления от 30 до 60%) с максимальными значениями от 200 до 250 г $\text{CH}_4/\text{м}^2 \times \text{день}$ (эффективность от 80 до 100% [128].

Материалы, использующийся в метаноокисляющих покрытиях, должны соответствовать следующим параметрам: $\text{pH}=5,5-8,5$ [129], содержание ООУ $>4\%$ СВ, электропроводность $<500 \text{ мС} \cdot \text{см}^{-1}$, отношение C:N должно быть от 10:1 до 15:1, проводимость воды: 10-50 см/сут., содержание гумуса $> 3\%$ [128].

Таблица 1.8 – Биотехнологические системы окисления метана [128]

	Биофильтры		Биоокна	Биопокрытия	Биотенты
	Активно вентилируемые	Пассивно вентилируемые			
Область применения	в системе сбора биогаза	в системе сбора биогаза (без утилизации биогаза)	временное или окончательное покрытие (в основном на старых полигонах)	временное или окончательное покрытие на эксплуатационном, постэксплуатационном этапе	как ежедневное покрытие на эксплуатационном этапе
Используемые материалы (примеры)	органические или неорганические материалы (например, компост, мульча коры, керамзитовая крошка, смесь торфа и песка)			почва, компост, смесь почвы и компоста	рулонные или складчатые материалы, пропитанные метанотрофами
Преимущества	- возможность управления и контроля эксплуатационных условий		- простота установки; - не требуется система отвода биогаза	- длительный срок эксплуатации; - высокая эффективность окисления метана	- сохраняет возможность захоронения отходов
Недостатки	- непригодны для непостоянного расхода биогаза; - требуется система сбора биогаза		- ограниченная зона покрытия для улавливания неорганизованных выбросов	- трудоемкий мониторинг; - эффективность работы зависит от используемых материалов	- нет данных исследований о высухании, времени удержания метана

Содержание питательной среды в материале покрытий играет важную роль в эффективности процесса окисления метана. Авторы [129] изучили скорость окисления метана на покрытиях полигонов, которые были снабжены питательной средой в виде торфа, компоста, осадков сточных вод в количестве 2,5-10 г/кг. Установлено, что увеличение скорости окисления метана за счёт органических веществ (от 6,95 моль $\text{CH}_4/\text{м}^2 \times \text{день}$ к ~ 10 моль $\text{CH}_4/\text{м}^2 \times \text{день}$ в образце с добавлением компоста и 10 г/кг осадков сточных вод).

Выбор технического мероприятия по снижению эмиссий на полигоне захоронения отходов, который должен соответствовать принципам устойчивого развития, необходимо осуществлять с учетом конечной цели: сокращение эмиссий биогаза и фильтрата, ускорение процессов стабилизации отходов, снижение воздействия полигона на объекты окружающей среды на постэксплуатационном этапе и сокращение сроков ассимиляции полигона окружающей средой.

Выводы по 1 главе:

1. Полигоны захоронения ТКО в совокупности с компонентами прилегающей геосреды рассматриваются как сложные ПТС. В массиве полигона захоронения отходов протекают процессы их биохимического и химического разложения, формирующие эмиссии загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие на геосферные оболочки, как на этапе эксплуатации объекта, так и после его закрытия и рекультивации.

2. Выявлены основные закономерности протекания процессов разложения и стабилизации ТКО в массиве захоронения на этапах жизненного цикла полигона. Определено, что для оценки стабильности отходов и прогнозирования уровня эмиссий полигона в окружающую среду, необходимы не только оценка качественных и количественных характеристик эмиссий биогаза и фильтрата, но и состава и свойства захороненных отходов.

3. Рассмотрены методы, используемые для оценки стабильности отходов, которые в настоящее время являются достаточно трудоемкими и длительными. Установлено отсутствие методик комплексной оценки состояния полигона как

элемента природно-техногенной системы, позволяющих планировать технические мероприятия по снижению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона в текущий и прогнозируемый момент времени.

4. Представлена оценка существующих технических мероприятий по снижению эмиссий загрязняющих веществ на этапах жизненного цикла полигона захоронения отходов. Обоснование внедрения тех или иных технических мероприятий по обеспечению безопасного уровня геоэкологического воздействия полигонов захоронения ТКО определяется рядом граничных условий, среди которых климатические условия территории, технологии эксплуатации объекта, результаты мониторинга компонентов окружающей среды, совокупность геоэкологических характеристик массива захоронения.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА ПОЛИГОНАХ

Для решения поставленных задач был использован комплекс современных методов исследований включающий: натурные и экспериментальные исследования по оценке состояния полигонов и стабильности отходов; лабораторное моделирование процессов разложения отходов в биореакторах.

2.1. Общая характеристика объектов исследования

Для проведения исследований в период 2013-2015 гг. был произведен отбор проб на 4 объектах захоронения ТКО Пермского края и 1 объекте захоронения ТКО Свердловской области, характеризующихся разным сроком захоронения отходов и находящихся на разных этапах жизненного цикла. Характеристика исследуемых объектов захоронения отходов представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристика объектов захоронения отходов

№	Объект захоронения отходов	Период эксплуатации	Площадь объекта, га	Высота массива отходов, м	Объем накопленных отходов, тыс.м ³
1	Объект «А» (Пермский край)	с 2008 г. по настоящее время	13,0	4-6	142,7
2	Объект «Б» (Пермский край)	с 1965 г. по настоящее время	36,0	2-8	205,75
3	Объект «В» (Пермский край)	с 1963 по 2008 г.	10,5	7-9	697,3
4	Объект «Г» (Пермский край)	с 1952 по 1982 г.	29,75	5-8	14900,0
5	Объект «Д» (Свердловская область)	с 1970 г. по настоящее время	5,0	7-8	375,0

1. На объекте «А» отбор проб отходов был выполнен в четырех точках, на глубинах: 2,5-3,0 м, 3,5-4,0 м, 5,5-6,5 м (12 образцов). Объект захоронения отходов находится на этапе эксплуатации. Объект оснащен противοфилтpационным экраном, прудами-накопителями для сбора филтpата, системой рециpкуляция филтpата. Возраст захороненных отходов - 1-3 года (рисунок 2.1 а).

2. Пробы отходов на объекте «Б» были отобраны в четырех точках, на глубинах: точки отбора №1 и №2 - 0,5-1,0 м, 1,0-1,5 м, точки отбора №3 и №4 –

1,0-1,5 м, 2,0-3,0 м, 3,0-4,0 м, 4,0-4,5 м (18 образцов). Участок отбора проб в точках №1 и №2 был рекультивирован в 2007 году песчано-глинистым грунтом (возраст отходов более 30 лет). На участке отбора проб №3 и №4 осуществляется захоронение отходов (возраст отходов 2-6 лет). Объект захоронения отходов не оснащен противofильтрационным экраном, системой сбора и очистки фильтрата.

3. На объекте «В» отходы были отобраны года в четырех точках, на глубинах: 1,0-1,5 м, 3,0-3,5 м, 4,0-4,5 м, 7,5-8,0 м (16 образцов). В основании объекта захоронения отходов нет противofильтрационного экрана. Сбор фильтрата с площади объекта осуществлялся в дренажные канавы, которые на 2008 г. пересыпаны отходами. На данный момент объект закрыт для приема отходов. Возраст захороненных отходов составляет более 10 лет (рисунок 2.1 б).

4. Пробы отходов на объекте «Г» были отобраны в четырех точках, на глубинах: 1,0-2,0 м, 3,0-4,0 м, 4,0-5,0 м, 5,0-6,0 м (14 образцов). Объект закрыт для приема отходов в 1982 года, следовательно, возраст захороненных отходов составляет более 40 лет (рисунок 2.1 в). Поверхность объекта захоронения отходов рекультивированна песчано-глинистым грунтом и большая часть ее поверхности покрыта зеленой растительностью.

5. Отходы на объекте «Д» были отобраны в трех точках, на глубинах: 1,0-1,5 м, 2,0-2,5 м, 3,0-3,5 м, 4,0-4,5 м, 5,0-5,5 м (15 образцов). Объект захоронения отходов находится на стадии эксплуатации. Объект не оснащен противofильтрационным экраном и системой сбора фильтрата. Возраст захороненных отходов 2-20 лет.



а



б



в

Рисунок 2.1 – Общий вид экскавированных отходов: а – срок захоронения 1-3 года, б – срок захоронения более 10 лет, в – срок захоронения более 40 лет

2.2. Объем и программа исследования

Программа исследования по комплексной оценке состояния полигонов захоронения ТКО представлена на рисунке 2.2.

Первым этапом программы являлись предварительные исследования массива полигона. Осуществлялся сбор первичной информации о состоянии объекта (информация от операторов, эксплуатирующих полигоны, анализ инженерных изысканий, данных мониторинга, проектной документации (при наличии)), были определены местоположение точек отбора проб, количество проб.

Вторым этапом программы были полевые исследования массива полигона. Отбор проб отходов на полигоне осуществлялся посредством ковшевого экскаватора. Пробы отходов отбирались по мере заглубления в массив с шагом в 1-2 м по вертикали. Всего с исследуемых объектов захоронения отходов было отобрано 75 проб, минимальная масса отбираемой пробы составила 100 кг.

На месте отбора проб отходов определялись и фиксировались следующие параметры:

- погодные условия (температура в предшествующий период, вид и количество осадков, скорость и направление ветра и т.д.).
- температура в массиве полигона, внешний вид отходов.

В процессе отбора проб по возможности были установлены сроки захоронения отходов на основании сроков годности и дат изготовления, указанных на упаковках продуктов.

Отобранные пробы отходов были помещены в емкости из химически стойкого материала (полиэтиленовые мешки, пластиковые контейнеры и т.д.) и герметично упакованы. Далее промаркированные пробы (место, глубина и дата отбора проб) транспортировались в лабораторию. После отбора проб и доставки их в лабораторию в максимально короткий срок производилось определение исходной влажности каждой пробы отходов и определение фракционного и морфологического состава отходов.

Третьим этапом было проведение лабораторных исследований отходов.



Рисунок 2.2 – Программа исследования массива захоронения отходов

Фракционный состав отходов определялся путем последовательного просеивания образцов через сита с размером ячеек 100 мм, 50 мм, 20 мм. Морфологический состав отходов определялся для фракции размером >20 мм. Пробы отходов разбирались вручную с выделением следующих компонентов: полиэтилен, бумага, стекло, камни, металл, дерево, текстиль, свалочный грунт, прочее. Под свалочным грунтом понималась мелкая неидентифицируемая масса (размером менее 2 мм), включающая разложившиеся пищевые отходы и другие органические отходы.

Сроки захоронения отходов были установлены в процессе определения морфологического и фракционного состава отходов. В случаях, когда установить срок захоронения отходов по информации на упаковках не было возможным, возраст отходов принимался на основании дат начала, окончания эксплуатации и рекультивации отдельных карт, а также по данным геологических изысканий, информации от операторов, эксплуатирующих полигоны.

Отходы характеризуются сильной неоднородностью состава, как по размеру, так и по составу компонентов, что обуславливает сложность проведения физико-химических и биохимических анализов. На рисунке 2.3 представлена схема пробоподготовки отходов для лабораторных анализов.

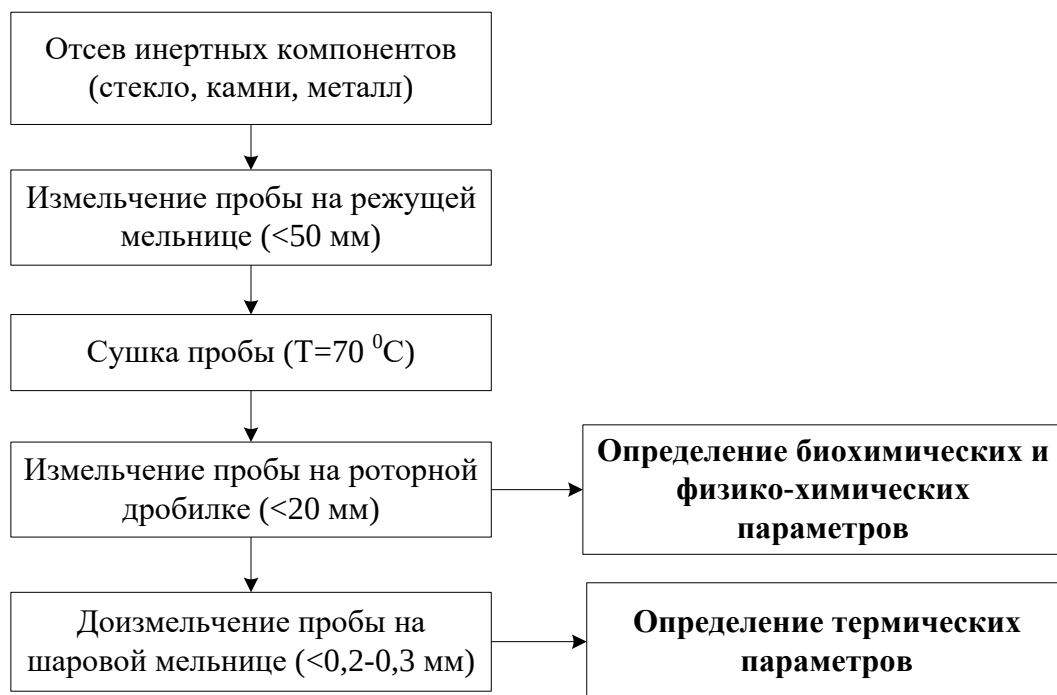


Рисунок 2.3 – Пробоподготовка отходов для лабораторных анализов

С целью получения гомогенизированной пробы пригодной для дальнейших физико-химических и биохимических анализов производился отсев инертной части отходов в виде камней, стекла, металла, далее отходы измельчались на режущей мельнице до размера частиц $D \leq 50$ мм, подвергались сушке при $T=70^{\circ}\text{C}$, измельчению на роторной мельнице до размера частиц $D \leq 20$ мм. После измельчения отходы тщательно перемешивали и отбирали необходимое количество пробы методом квартования (ГОСТ 12536-79) с целью проведения дальнейших анализов. Для определения термических параметров пробы отходов измельчались на шаровой мельнице до размера частиц $D \leq 0,2-0,3$ мм.

Водные вытяжки отходов для анализов готовились согласно ГОСТ 26423-85 в соотношении с дистиллированной водой 1:5.

Для измельченных и гомогенизированных проб отходов в максимально короткий промежуток времени после отбора определяли биохимические параметры: потенциал газообразования (GS_{21}), показатель дыхательной активности (RI_4). Далее определялись физико-химические параметры: pH, ХПК, БПК₅, аммонийный азот (NH_4-N), общий азот ($N_{\text{общ.}}$), зольность, общий углерод ($C_{\text{общ.}}$), органический углерод ($C_{\text{орг.}}$); термические параметры отходов: тепловой поток, потеря массы, отношение удельных энтальпий сухого вещества (СВ) и органического сухого вещества (ОСВ), константа скорости разложения отходов ($K_{\text{с.р.}}$), масс-спектры газов. Репрезентативность проводимых лабораторных исследований была обеспечена выполнением 3 повторений для каждой пробы.

В комплексную оценку состояния полигонов было включено лабораторное моделирование процессов разложения отходов в биореакторах.

Установленные зависимости полевых и лабораторных результатов физико-химических, биохимических и термических параметров от срока захоронения отходов были положены в основу методики оценки стабильности отходов в массиве полигона (четвертый этап). На основании данной методики были определены классы стабильности отходов для разных этапов жизненного цикла полигона.

На завершающем этапе исследований проводилось обоснование выбора технических мероприятий по снижению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона, с учетом всех полученных граничных значений и зависимостей исследуемых параметров.

2.3. Методы проведения исследований по оценке стабильности и моделированию процессов разложения твердых коммунальных отходов

2.3.1. Физико-химические и биохимические методы исследований

Экспериментальные исследования проводились базе лабораторий кафедры «Охрана окружающей среды» ПНИПУ, лабораторий Университета природных ресурсов и прикладных естественных наук г. Вена (ABF-BOKU) и Технического университета г. Гамбург (ТУНН). Все физико-химические и биохимические параметры образцов отходов определяли согласно ГОСТов, ПНД Ф и стандартных общепринятых в химической практике методов проведения исследований (таблица 2.2).

Определение физико-химических и биохимических параметров образцов отходов осуществлялось для оценки жизненного цикла полигона захоронения ТКО (стадии биодеструкции отходов) и степени разложения отходов.

Проведение исследований осуществляли по следующим показателям:

- для твердого вещества отходов: зольность, дыхательная активность (RI_4), потенциал газообразования (GS_{21}), общий и органический углерод, общий азот.
- для водной вытяжки из отходов: pH, ХПК, БПК₅, азот аммонийный.

Таблица 2.2 – Перечень методики исследования физико-химических и биохимических параметров образцов отходов

Наименование показателя	Единица измерения	Обозначение	Наименование методики
pH	ед.рН	ГОСТ 26423-85	Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки
Химическое потребление кислорода (ХПК)	мг O ₂ /л	ПНД Ф 14.1;2.100-97	Методика выполнения измерений химического потребления кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрическим методом

Наименование показателя	Единица измерения	Обозначение	Наименование методики
Биологическое потребление кислорода (БПК)	мг О ₂ /л	МВИ 224.01.17.133/2009	Количественный химический анализ. Методика выполнения измерений биохимического потребления кислорода в природных и сточных водах по изменению давления газовой фазы (манометрический метод)
Азот аммонийный (NH ₄ -N)	г/кг	ПНД Ф 14.1:2.1-95	Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в очищенных сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера
Зольность	%	ГОСТ 27784-88	Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв (гравиметрический методом)
Общий углерод (C _{общ.}), органический углерод (C _{орг.})	г/кг		Метод сжигания образцов в анализаторе элементарного состава «Vario-MAX CN»
Общий азот (N _{общ.})	г/кг		Метод сжигания образцов в анализаторе элементарного состава «Vario-MAX CN»
Дыхательная активность (RI ₄)	мг О ₂ /г СВ	Austrian Standards Institute (ASI) - ÖNORM S 2027-1, Vienna, Austria (2012)	Evaluation of waste from mechanical-biological treatment - Part 4: Stability parameters - Respiration activity (AT ₄)
Суммарное газообразование в течении 21 дня (GS ₂₁)	л/кг СВ	Austrian Standards Institute (ASI) - ÖNORM S 2027-2, Vienna, Austria (2012)	Evaluation of waste from mechanical-biological treatment - Part 2: Stability parameters - Gas generation by incubation test (GS ₂₁)

Известно, что при деструкции отходов происходит формирование свалочного грунта по свойствам аналогичным техническому урбанизированному грунту [130], поэтому при анализах были использованы методики анализа почв.

2.3.2. Термические методы исследований

Для оценки степени стабильности образцов отходов использовались термические методы исследований. Экспериментальные исследования проводились базе лаборатории кафедры «Химические технологии» ПНИПУ, лаборатории термических методов анализа ПГНИУ.

СТА объединяет дифференциальную сканирующую калориметрию, термогравиметрию, масс-спектрометрию образующихся газов. СТА основан на одновременной непрерывной регистрации изменений характеристик образца (обусловленные фазовыми переходами или химическими реакциями) в зависимости от времени или температуры при нагревании в соответствии с выбранной температурной программой в заданной газовой среде.

Метод СТА позволяет получать информацию о составе, термической и окислительной стабильности материалов, температурах протекания и кинетике химических реакций, фазовых переходах [103]. Кривая ТГ выражает зависимость изменения массы образца от температуры и является интегральной кривой. Кривая ДСК, означающая зависимость частного дифференциала изменения энтальпии от температуры, является производной от интегральной зависимости изменения энтальпии с ростом температуры [131].

Масс-спектрометрия использовалась для синхронного качественного анализа газообразных продуктов разложения веществ. Масс-спектрометрия - физический метод, основанный на ионизации молекул изучаемого вещества с последующим разделением ионов по величине отношения массы заряженных частиц к их заряду (M/z). По полученному масс-спектру делается вывод о составе образца и структуре его молекул, по величине тока соответствующих ионов - о количественном составе образца.

Термогравиметрические исследования и дифференциальную сканирующую калориметрию образцов отходов проводили на приборе для СТА NETZSCH «STA 449C Jupiter» в среде воздуха и в среде аргона. Масс-спектрометрию образующихся газов осуществляли на масс-спектрометре QMG 403 C Aeolos.

Условия проведения анализа:

- диапазон нагрева 35-800 °С,
- скорость нагрева - 10°С/мин,
- скорость газового потока в печи - 40 мл/мин (воздух или аргон),
- материал тигля – платина.

Масса используемой навески пробы варьировалась в пределах $3 \div 18$ мг. Предварительно пробы были измельчены до $d \leq 0,2-0,3$ мм. В ходе опыта прибор «STA 449C Jupiter» непрерывно регистрировал убыль массы исследуемой пробы в процессе ее нагрева (кривая ТГ), температуру образца и сигнал ДСК (количество теплоты, которое выделяется или поглощается в результате химических реакций). Предельная чувствительность прибора по массе составляла 0,1 мкг, а по температуре – $0,001^{\circ}\text{C}$. Репрезентативность проводимых исследований была обеспечена выполнением 2 повторений для каждой пробы.

При СТА прибор позволяет одновременно измерять изменение теплового потока и массы образца в зависимости от его температуры. СТА позволяет обрабатывать большое число измерений и упрощает интерпретацию результатов благодаря возможности отделить эндо- и экзотермические эффекты. Процесс сбора и обработки данных был автоматизирован при помощи программного обеспечения прибора NETZSCH Proteus Thermal Analysis.

В процессе СТА определялись следующие термические параметры отходов: величина тепловых эффектов, температура пиков тепловыделения, скорости потери массы, отношение $\Delta(CB)/\Delta(OCB)$, константа скорости разложения ($K_{с.р.}$), масс-спектры газов.

2.3.3. Лабораторное моделирование процессов разложения твердых коммунальных отходов

Для моделирования и исследования процесса разложения (биодеструкции) ТКО, происходящего на полигонах и свалках, на кафедре ООС ПНИПУ был создан лабораторный комплекс (рисунок 2.4).

Преимущество изучения свойств ТКО при их разложении в лабораторных биореакторах заключается в следующем:

- получение результатов в короткие сроки;
- исследование процессов деструкции отходов при определенных условиях;
- ускорение физическо-химических, биохимических и микробиологических процессов.



Рисунок 2.4 – Лабораторный комплекс по моделированию процессов разложения отходов

В состав лабораторного комплекса входят следующие элементы:

- климатическая комната (теплоизолированный бокс, внутри которого обеспечивается температурный режим, соответствующий условиям разложения ТКО в массиве полигона, $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- ёмкости (биореакторы) (рисунок 2.5).

Лабораторный комплекс позволяет имитировать и ускорять процессы разложения отходов в массиве за счет добавления воды и поддержания температуры, соответствующей температуре отходов в массиве полигона.

Объем биореактора составляет около 40 л. В голове емкости находится отверстие (1,0 см), в которое встраивается уплотнительное кольцо, кладется крышка, закрываемая завинчиванием. Биореакторы оснащены системой отвода биогаза. На дне емкости лежит мелкий гравий (1,0-2,5 мм) слоем 3 см, поверх него производится укладка геотекстильного материала. С другой стороны дна имеется отверстие (1,2 см) в который встроен вентиль для отвода воды. Вода подается под верхнюю крышку биореактора, где через специальное устройство разбрызгивается на верхний слой отходов. Лабораторное разложение отходов в биореакторе аналогично процессу разложения отходов на полигонах в естественных условиях.

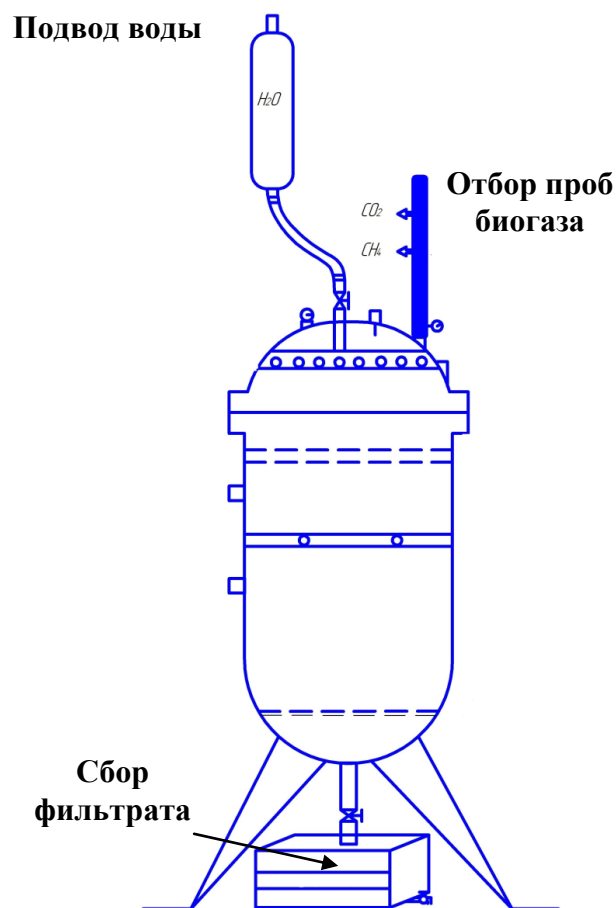


Рисунок 2.5 – Устройство лабораторного биореактора

Для лабораторного моделирования процессов разложения отходов были использованы отходы с 2 объектов захоронения Пермского края, характеризующихся разным сроком захоронения отходов и условиями эксплуатации. Отбор проб на полигонах производился по профилю массива с интервалом 0,5-1,0 м, посредством ковшового экскаватора.

Подготовка проб отходов включала в себя: усреднение пробы, отсеивание инертных компонентов (стекло, камни, металлы и т.д.), просеивание отходов через сито 100 мм. Перед загрузкой отходов в биореакторы определялись вес и влажность проб отходов. Лабораторное моделирование процессов разложения отходов осуществляли на основании немецкого стандарта - Standard Working Methods SWM 3 «Sampling of waste material from landfill simulation reactors (LSR)».

Подготовленные пробы отходов помещали в биореактор и уплотняли, далее в биореактор добавляли воду до полного водонасыщения отходов. После заполнения биореактора отходами, в биореакторе было оставлено пространство 2

см для того, чтобы обеспечить равномерное распределение воды через распределительную головку. Для покрытия отходов использовался геотекстильный материал, чтобы предотвратить попадание мелких частиц, которые могут повредить системе отвода фильтрата. Перед герметичным закрытием биореакторов, они были продуты азотом для удаления излишнего содержания кислорода из отходов.

Для исследований процессов разложения отходов было загружено 16 биореакторов. Главным фактором ускорения разложения отходов являлось добавление воды в биореактор взамен адекватного количества фильтрата. Добавление свежей воды осуществлялось 1 раз в неделю. Нами был проведен расчет количества добавляемой воды и фактора ускорения процесса разложения отходов в биореакторах (за время эксперимента) относительно отобранных образцов отходов с полигонов.

Расчет количества добавляемой воды для ускорения процесса разложения отходов (рассчитывается для полигона и биореактора):

1. Удельное годовое количество фильтрата Q_{CB} (л/кг СВ)

Рассчитывается для полигона (учитывается количество осадков) и биореактора (учитывается количество добавленной воды).

2. Фактор ускорения: $\frac{БР}{полигон}$

3. Сумма отведенного фильтрата: вода/тв.в-во = $Q_{CB} * t$ (л/кг СВ)

4. Разница во времени t до достижения соотношения вода/тв.в-во (L/S)

1 л/кг СВ: $t = (L/S) / Q_{CB}$.

Длительность проведения эксперимента составила около 450 дней. За весь период эксперимента происходило последовательное открытие одного биореактора с периодичностью 40-70 дней. Отходы каждого биореактора имели сопоставимые коэффициенты ускорения, количество добавляемой воды было скорректировано в зависимости от массы отходов. Возраст отходов в лабораторных биореакторах был пересчитан на реальные условия полигона.

После открытия биореактора, отходы анализировались по физико-химическим (ХПК, БПК₅, NH₄-N, N_{общ.}, зольность, C_{общ.}, C_{орг.}), биохимическим

(RI_4 , GS_{21}), термическим параметрам (величина тепловых эффектов, температура пиков тепловыделения, скорость потери массы, отношение $\Delta(CB)/\Delta(OCB)$).

Исследование деструкции отобранных отходов из массива полигона в модельной лабораторной установке в длительном эксперименте, дает возможность отследить, как меняются показатели (физико-химические, биохимические, термические параметры) по мере увеличения биоразложения отходов на разных этапах жизненного цикла полигона. Результаты полученных полевых и лабораторных исследований подвергались статистической обработке с оценкой тесноты корреляционной связи получаемых зависимостей.

ГЛАВА 3. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЛИГОНА ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

3.1. Определение фракционного и морфологического состава твердых коммунальных отходов

По результатам проведения фракционного и морфологического состава ТКО исследуемых объектов захоронения отходов были установлены их зависимости от срока захоронения. Результаты определения фракционного состава проб отходов от срока захоронения отходов представлены на рисунке 3.1.

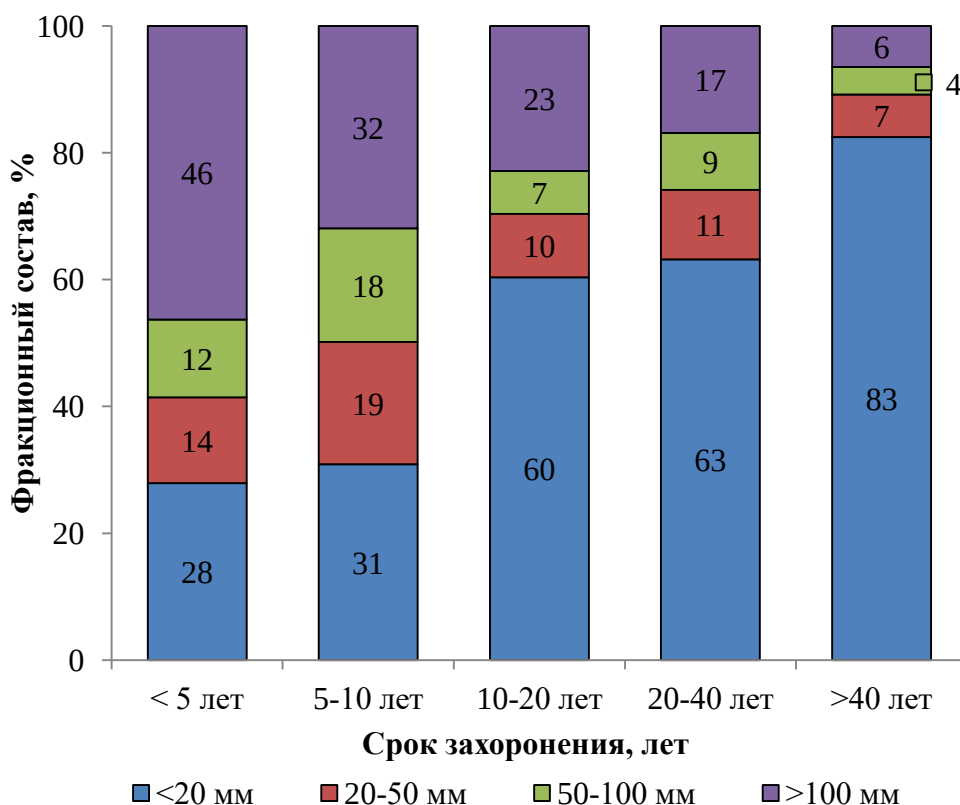


Рисунок 3.1 – Фракционный состав отходов разного срока захоронения

В ходе анализа данных фракционного состава отходов с увеличением срока захоронения отходов от менее 5 лет до более 40 лет была установлена динамика изменения содержания фракции > 100 мм (уменьшение в 7 раз) и фракции < 20 мм (рост в 3 раза). Для фракции отходов размером 50-100 мм и 20-50 мм была установлена менее выраженная тенденция к уменьшению содержания в 2,5 и 3,5 раза соответственно с увеличением срока захоронения с 1 года до 60 лет [132,133].

Рост содержания фракции <20 мм в отходах с увеличением срока захоронения является результатом большей степени разложения отходов под действием процессов физико-механической деформации и биохимической деструкции. О значительной роли биохимического разложения в формировании данной фракции свидетельствует высокое содержание свалочного грунта, доля которого растет с увеличением срока захоронения отходов и достигает значений выше 60% при сроке захоронения отходов более 10 лет.

Результаты определения морфологического состава проб отходов от срока захоронения отходов представлены на рисунке 3.2.

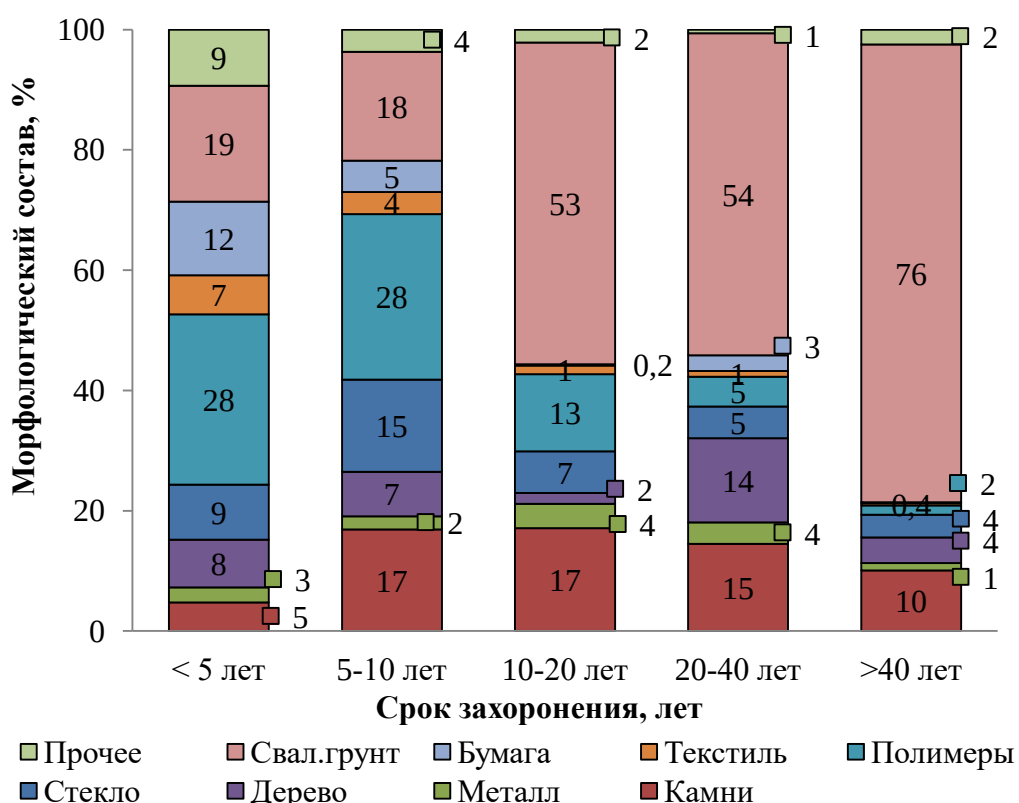


Рисунок 3.2 – Морфологический состав отходов разного срока захоронения

В ходе анализа данных морфологического состава отходов с увеличением срока их захоронения от менее 5 лет до более 40 лет было установлено следующие динамики:

- рост содержания свалочного грунта более чем в 3 раза с 19% до 76%;
- уменьшение содержания полимерных материалов в 14 раз с 28% до 2,0%, бумаги в 31 раз с 12,5% до 0,4%, стекла в 2 раза с 9,4% до 4,1%, текстиля в 14 раз

с 6,8% до 0,5%, и компонентов входящих в группу «прочее» почти в 4 раза с 9,2 % до 2,1% [132-134].

Рост содержания инертных компонентов в виде полимерных материалов, стекла и компонентов группы «прочее» в отходах срока захоронения до 10 лет связан с тенденциями изменения морфологического состава ТКО населения последних десятилетий и не связан с биохимическими процессами разложения отходов.

3.2. Исследование физико-химических и биохимических параметров твердых коммунальных отходов

В большинстве научно-исследовательских работ установление стадии биодеструкции ТКО в массиве полигона осуществлялось по результатам физико-химических свойств фильтрата [47,65,86]. На основании ряда физико-химических параметров фильтрата, качество которого является усредненным показателем протекающих в массиве захоронения отходов процессов, возможно, сделать вывод о той или иной стадии биодеструкции отходов [135,136].

Однако для оценки глубины биодеструкции отходов и прогноза эмиссий загрязняющих веществ в объекты окружающей среды качество фильтрата не является всегда является информативным, т.к. выходящий на поверхность фильтрат представляет собой суммарный результат инфильтрационных вод с разных участков глубин отходов, где отходы могут характеризоваться разными физико-химическими и биохимическими свойствами [135,137].

Значительная часть объектов захоронения отходов не имеет надлежащей системы сбора и отвода фильтрата. В таких случаях отбор фильтрата на анализ осуществляется из мест его скопления, где он подвергается воздействию климатических факторов, а также характеризуется усредненным составом за несколько лет. Анализ образцов отходов, отобранных из массива полигона, позволит комплексно проанализировать изменение физико-химических и биохимических параметров отходов, оценить процессы разложения в массиве захоронения и установить стадии биодеструкции отходов [135].

На основании ряда экспериментальных исследований были выявлены основные (индикаторные) физико-химические и биохимические параметры отходов разного срока захоронения, полученные результаты сведены в таблице 3.1.

На основании полученных результатов была проведена оценка уровня связи между физико-химическими и биохимическими показателями отходов и их сроком захоронения, результаты которой приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Оценка уровня связи между показателями отходов и их сроком захоронения

Параметр	Коэффициент корреляции (r)	Уровень связи
ХПК, мгО ₂ /л	-0,728	Сильная
БПК ₅ , мгО ₂ /л	-0,696	Средняя
NH ₄ -N, г/кг СВ	-0,713	Сильная
N _{общ.} , г/кг СВ	-0,687	Сильная
Зольность, %	0,852	Сильная
C _{орг.} , г/кг СВ	-0,910	Очень сильная
C _{общ.} , г/кг СВ	-0,905	Очень сильная
RI ₄ , мгО ₂ /г СВ	-0,670	Средняя
GS ₂₁ , л/кг СВ	-0,708	Сильная

Исходя из данных представленных в таблице 3.1 и полученных зависимостей на рисунках 3.3-3.5, определено, что с увеличением срока захоронения отходов наблюдается последовательное снижение содержания общего, органического углерода и общего азота. Данная тенденция может быть связана с увеличением степени деструкции и стабилизации отходов в массиве полигона. Выявлена сильная связь между данными показателями и сроком захоронения отходов.

Таблица 3.1 – Основные физико-химические и биохимические параметры исследуемых образцов отходов

Возраст, лет	Физико-химические параметры отходов								
	С _{общ.} , г/кг СВ	С _{орг.} , г/кг СВ	N _{общ.} , г/кг СВ	N-NH ₄ , г/кг СВ	ХПК, мг О ₂ /л	БПК ₅ , мг О ₂ /л	Зольность, % СВ	RI ₄ , мгО ₂ /г СВ	GS ₂₁ , л/кг СВ
0,6	254,0±1,3	245,0±1,2	11,1±0,06	5,0±1,1	5017,0±1204,1	2650,0±637,1	26,1±0,8	23,2±0,46	46,0±2,3
1,2	248,0±1,2	205,0±1,1	14,4±0,07	12,3±2,6	3900,0±936,0	1060,0±254,8	34,7±1,0	17,5±0,35	44,2±2,2
1,5	223,0±1,1	176,0±0,9	5,6±0,03	5,2±1,1	4281,0±1027,4	2150,0±516,8	36,9±1,1	11,3±0,23	30,7±1,5
2	215,0±1,1	185,0±0,9	4,9±0,02	4,3±0,9	4682,0±1123,7	2450,0±588,9	37,5±1,1	8,7±0,17	17,3±0,9
2,3	202,0±1,0	198,0±1,0	10,3±0,05	9,5±2,0	4485,0±1076,4	2400,0±576,9	47,2±1,4	6,9±0,14	20,0±1,0
3	191,0±1,0	188,0±0,9	8,9±0,04	8,3±1,7	1820,0±436,8	950,0±228,4	55,4±1,7	6,7±0,13	12,1±0,6
5	187,0±0,9	177,0±0,9	6,7±0,03	6,1±1,3	1245,0±298,8	520,0±228,4	59,2±1,8	5,9±0,12	14,1±0,7
6	121,0±0,6	90,0±0,5	6,6±0,03	5,4±1,1	965,0±231,6	440,0±105,8	66,9±2,0	5,1±0,10	9,7±0,5
15	90,0±0,5	64,0±0,3	4,4±0,02	2,8±0,6	493,0±118,3	185,0±44,5	79,2±2,4	3,8±0,08	4,2±0,2
20	83,0±0,4	77,0±0,4	4,1±0,02	2,6±0,5	370,0±88,8	155,0±37,2	80,4±2,4	2,7±0,05	6,2±0,3
30	80,0±0,4	68,0±0,3	3,9±0,02	2,1±0,4	309,0±74,2	120,0±28,8	85,1±2,6	2,6±0,05	5,8±0,3
40	75,0±0,4	62,0±0,3	3,7±0,02	1,4±0,3	275,0±66,0	60,0±14,4	86,9±2,6	2,3±0,05	5,0±0,3
50	69,0±0,3	59,0±0,3	3,4±0,02	1,3±0,3	150,0±36,0	20,0±4,8	89,2±2,7	1,7±0,03	1,9±0,1
60	60,0±0,3	57,0±0,3	2,1±0,01	0,1±0,0	115,0±27,6	10,0±2,4	94,1±2,8	0,3±0,01	1,9±0,1

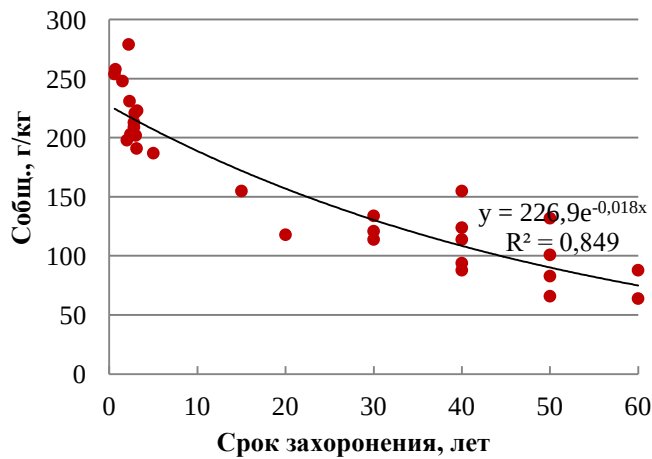


Рисунок 3.3 – Изменение содержания общего углерода в отходах от срока захоронения

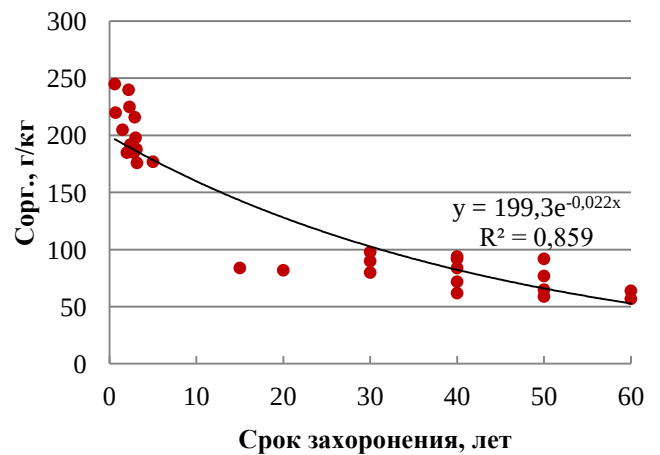


Рисунок 3.4 – Изменение содержания органического углерода в отходах от срока захоронения

На рисунке 3.6 представлены результаты определения содержания аммонийного азота в отходах разного срока захоронения.

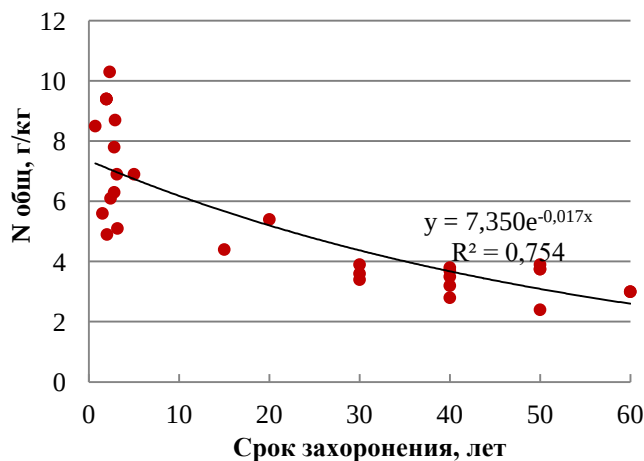


Рисунок 3.5 – Изменение содержания общего азота в отходах от срока захоронения

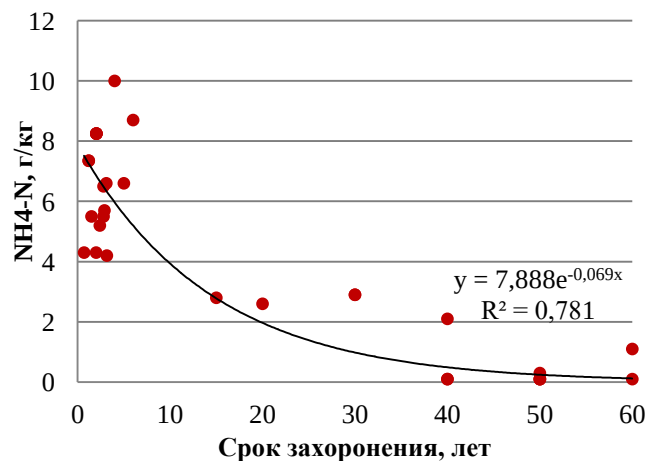


Рисунок 3.6 – Изменение содержания аммонийного азота в отходах от срока захоронения

Высокие значения аммонийного азота в отходах сроком захоронения 1-3 года, говорят о процессах биодеструкции легкоразлагаемых фракций ТКО с образованием жирных кислот, полисахаров, аминокислот, глицерина, и т.д. [135, 137].

Проведенные исследования по определению содержания аммонийного азота в водной вытяжке проб отходов позволили выявить снижение его содержания в отходах с увеличением срока захоронения. Снижение содержания аммонийного

азота в отходах сроком захоронения более 10 лет может быть связано с замедлением процессов восстановительного дезаминирования азотсодержащих соединений [135].

Физико-химические параметры, такие как ХПК, БПК₅ можно использовать для определения этапа жизненного цикла полигона (стадии биодеструкции отходов) [135,136]. На основании полученных результатов анализов, исследуемых образцов отходов, были построены зависимости ХПК, БПК₅ водных вытяжек отходов от срока захоронения (рисунок 3.7).

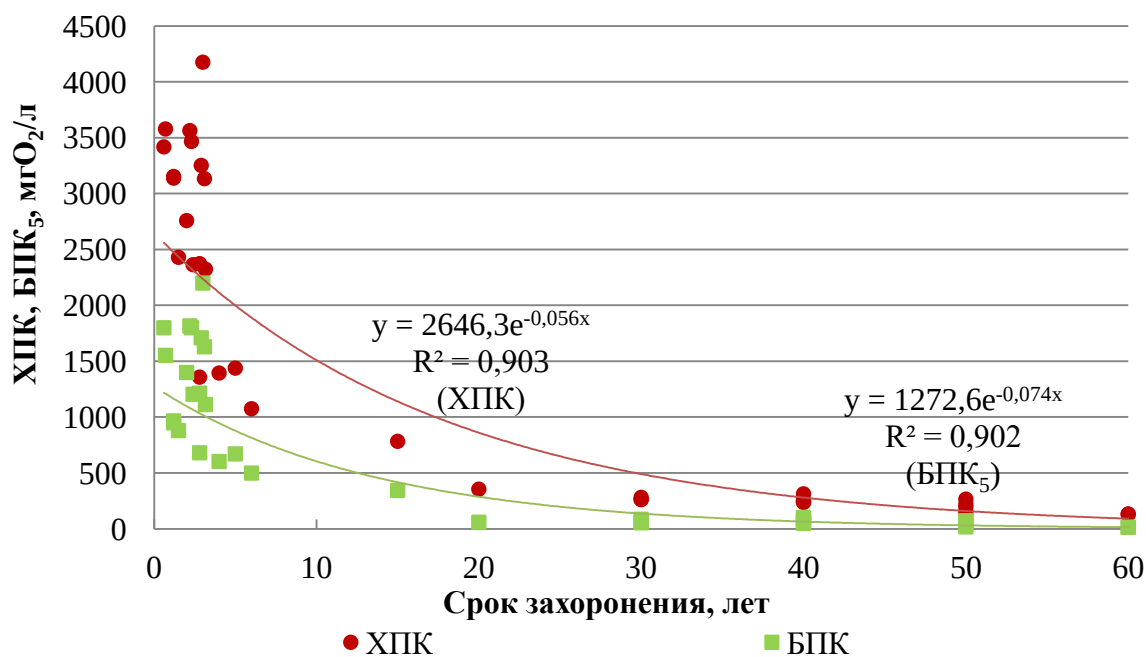


Рисунок 3.7 – Зависимость ХПК, БПК₅ водных вытяжек отходов от срока захоронения

Полученные значения ХПК, БПК₅ водных вытяжек отходов сроком захоронения 1-3 года (объект «А») и 2-6 лет (эксплуатируемый участок объекта «Б», объект «Д») могут говорить о протекающей стадии активного метаногенеза. Понижение значений ХПК, БПК₅ водных вытяжек проб отходов возраста более 10 лет (объект «В», рекультивированный участок объекта «Б») свидетельствуют о замедлении процессов активного метаногенеза и переходе на стабильную фазу. Низкие значения ХПК, БПК₅ водных вытяжек отходов сроком захоронения более 40 лет (объект «Г») говорят о снижении содержания органических соединений,

стабилизации биохимических процессов, что характерно для окончания фазы стабильного метаногенеза и наступления периода ассимиляции [136,137].

Индикатором изменения содержания органических соединений в отходах может служить отношение БПК₅/ХПК. Установлены следующие отношения БПК₅/ХПК водной вытяжки отходов разного срока захоронения: объект «А» (1-3 года) - 0,54; эксплуатируемый участок объекта «Б» (2-6 лет) - 0,45; объект «Д» (2-6 лет) - 0,42; объект «В» (>10 лет) - 0,23; рекультивированный участок объекта «Б» (>30 лет) - 0,21; объект «Г» (>40 лет) - 0,15.

Одними из важных показателей степени разложения отходов, являются зольность и содержание органического вещества. Зависимость зольности и содержания органического вещества в пробах отходов от возраста отходов, представлена на рисунке 3.8.

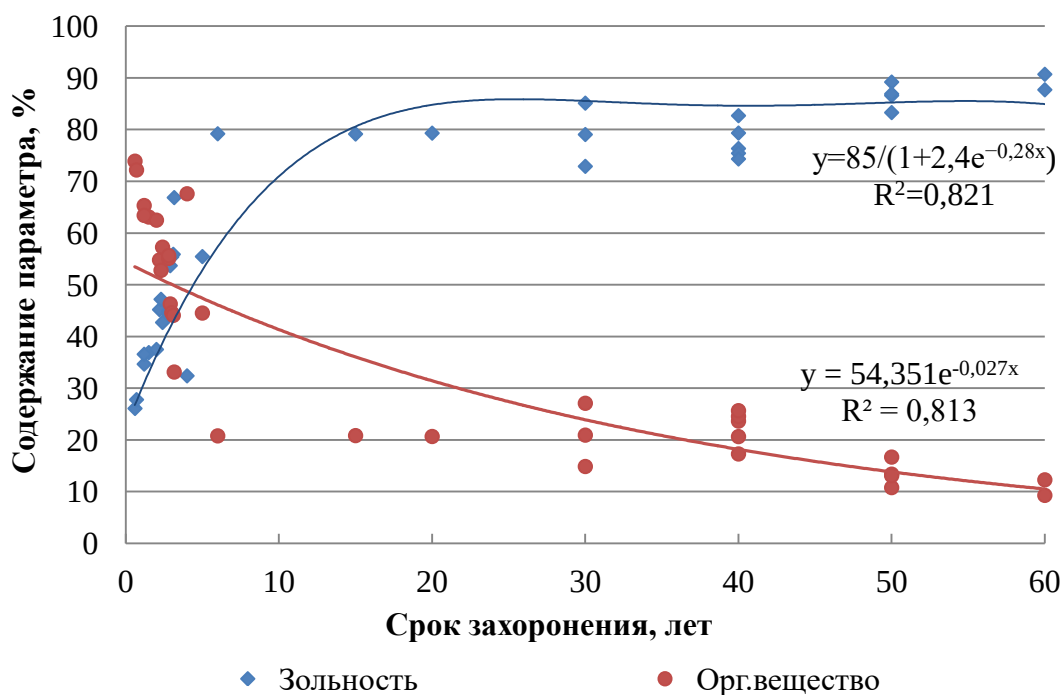


Рисунок 3.8 – Зависимость зольности и содержания органического вещества в отходах от срока захоронения

С увеличением срока захоронения отходов наблюдается последовательное снижение содержания органического вещества. В отходах, срок захоронения которых составляет более 30 лет, содержание органического вещества уменьшается в 6 раз по сравнению с отходами, находящимися в массиве полигона 1-3 года [138].

Как видно из данных, представленных на рисунке 3.5, зольность отходов по мере увеличения возраста отходов возрастает. Таким образом, значение зольности отходов сроком захоронения более 50 лет (объект «Г») в отдельных случаях составляет 89,1 %, что более чем в 2 раза выше зольности «молодых» отходов. Высокое значение зольности отходов объекта «Г» свидетельствует о завершении процессов их разложения [135,139].

На основании результатов определения содержания органического вещества и зольности было установлено, что в отходах возраста захоронения 1-3 года (объект «А») и 2-6 лет (эксплуатируемый участок объекта «Б», объект «Д») интенсивно протекают процессы разложения органических компонентов. Данные отходы характеризуются высоким содержанием органического вещества и наименьшим показателем зольности, что говорит о незначительной степени разложения отходов.

Установлены следующие отношения показателей органическое вещество/зольность образцов отходов разного срока захоронения: объект «А» (1-3 года) - 1,26; эксплуатируемый участок объекта «Б» (2-6 лет) - 1,21; объект «Д» (2-6 лет) - 1,14; объект «В» (>10 лет) - 0,3; рекультивированный участок объекта «Б» (>30 лет) - 0,2; объект «Г» (>40 лет) - 0,14.

Важным параметром определения биодеструкции отходов является дыхательная активность отходов (RI_4). Изменение дыхательной активности отходов в зависимости от срока захоронения отходов представлено на рисунке 3.9. Результаты определения дыхательной активности отходов (RI_4) показали, что за первые 10 лет после захоронения отходов на полигоне происходит резкое снижение дыхательной активности (в 3,4 раза). Для отходов сроком захоронения более 30 лет показатель дыхательной активности отходов достигает приемлемых уровней ($RI_4 \leq 2,0$) [139]. При сравнении полученных результатов определения дыхательной активности с содержанием органического вещества можно говорить о наблюдении динамики снижения значения дыхательной активности при уменьшении содержания органического вещества в отходах. Данный параметр можно использовать в качестве показателя биодеструкции отходов.

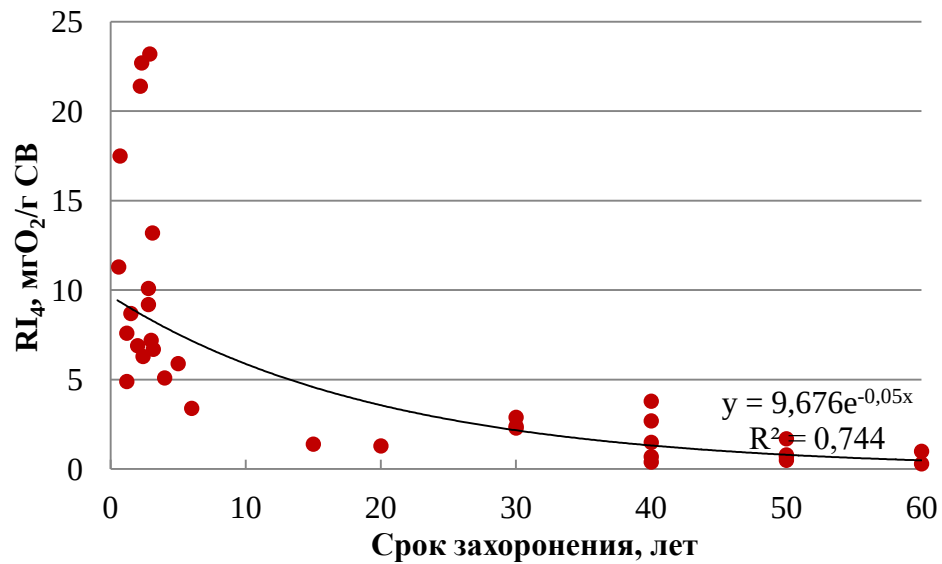


Рисунок 3.9 – Изменение дыхательной активности в анализируемых пробах отходов от срока захоронения

Снижение значений дыхательной активности (RI_4) может говорить о увеличении степени разложения отходов и, соответственно, сокращении количества образующегося биогаза. Установлено, что с увеличением срока захоронения отходов потенциал газообразования (GS_{21}) уменьшается (рисунок 3.10).

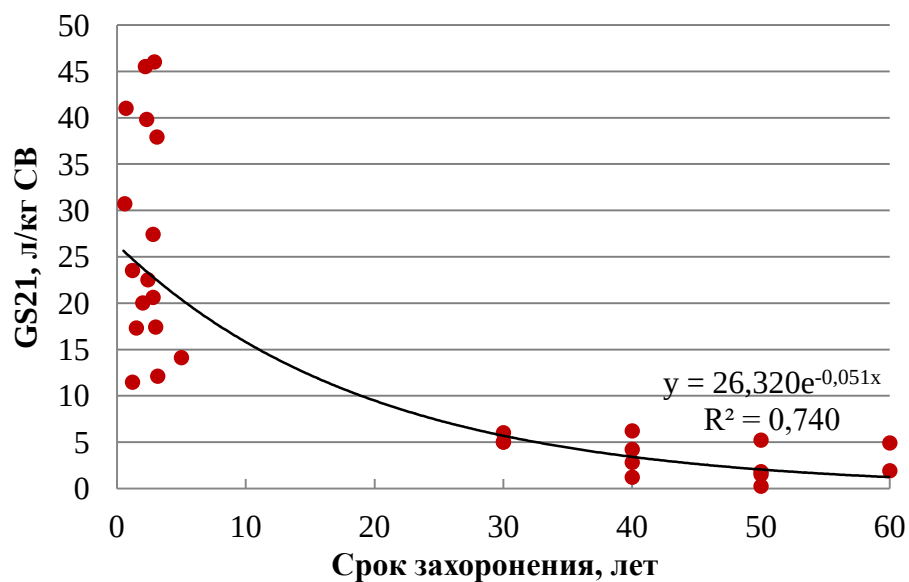


Рисунок 3.10 – Потенциал газообразования в анализируемых пробах отходов от срока захоронения

У молодых отходов (возраст захоронения 1-3 года) отмечается достаточно высокая способность к газообразованию - среднее значение суммарного газообразования за 21 день составляет 40-45 л/кг СВ, тогда как отходы, срок захоронения которых составляет более 30 лет, характеризуются средним значением показателем GS_{21} - 4,0 л/кг СВ, что в 8 раз меньше этого показателя для молодых отходов.

Результаты определения суммарного газообразования отходов (GS_{21}) показали, что за первые 10 лет после захоронения отходов на полигоне происходит резкое снижение газообразования (в 5 раз). Для отходов сроком захоронения более 30 лет потенциал газообразования достигает приемлемых уровней ($GS_{21} \leq 5,0$) [139].

3.3. Оценка термических параметров твердых коммунальных отходов

Для оценки термических параметров захороненных отходов были проанализированы термические параметры компонентов отходов, которые при разложении в массиве полигона оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

В таблице 3.3 представлены характеристики основных компонентов отходов, способных к разложению. Эти компоненты составляют более 60% ТКО по массе. Для неорганической фракции отходов (камни, стекло, металл) характеристика не представлена, т.к. они не вносят вклад в образование эмиссий.

Таблица 3.3 – Характеристики основных компонентов ТКО, способных к разложению [140]

Компоненты ТКО	Содержание в ТКО, %	Влажность, %	Летучее вещество, %	Остаточная масса, %	Теплоемкость, Дж/г
Бумага	34,0	10,2	75,9	5,4	15814,47
Картон	6,0	5,2	77,5	5,0	17277,53
Дерево	2,0	12,0	75,1	0,5	17100,75
Текстиль	2,0	10,0	66,0	6,5	18514,96
Резина	0,5	1,2	83,9	9,9	25330,14
ПЭТ	3,0	0,2	95,8	2,0	43465,96
Полиэтилен низкой плотности	2,0	0,2	98,5	1,2	43465,96
Пищевые отходы	9,0	78,7	16,6	0,7	3970,48

Наибольшей теплоемкостью обладают такие компоненты ТКО, как полиэтилететрафталат (ПЭТ), полиэтилен низкой плотности, резина, низкой теплоемкостью обладают пищевые отходы.

Экспериментальные результаты термического анализа отходов [141] позволили выделить четыре последовательных этапа термодеструкции образцов, которые отличаются между разными компонентами температурами разложения и потерей массы.

Этапы термодеструкции образцов:

Этап I: происходит при $T=50-180^{\circ}\text{C}$. Характерно испарение свободной влаги в образцах (обезвоживание).

Этап II: начинается при $T=200^{\circ}\text{C}$ и характеризуется большей потерей массы образца. Происходит окисление органических соединений в образцах.

Этап III: продолжение предыдущего этапа, начинает нарушаться устойчивость транспортировки газа в твердое вещество образца. Скорость изменения массы изменяется нелинейно с температурой.

Этап IV: начинается при $T=700^{\circ}\text{C}$. Показывает улетучивание / сжигание стабильных компонентов образцов.

В таблице 3.4 представлены экспериментальные изменения массы и температуры разложения компонентов ТКО при термическом анализе в среде воздуха.

Таблица 3.4 – Экспериментальные изменения массы и температуры разложения компонентов ТКО в среде воздуха [141]

Компоненты ТКО	Изменение массы (%)					Температура ($^{\circ}\text{C}$)			
	Этап I: Обезво- живание	Этап II: Окисление	Этап III: Свободное испарение	Этап IV: Стойкие компо- ненты	Остаточ- ная масса	Этап II начало	Этап III начало	Этап IV начало	Заключи- тельный этап
Бумага	3,3	53,6	28,6	5,6	8,9		337	624	711
Картон	6,1	52,1	41	-	0,8	279	322	-	488
Дерево	8,5	53,7	36,6	-	1,2	290	345	-	540
Текстиль	3,8	76,8	18,9	-	0,4	319	343	-	491
Резина	0	52,6	9,7	14,7	23	305	343	704	971
ПЭТ	0,6	75,7	9,7	-	13	422	468	-	736
Полиэтилен низкой плотности	0,3	98,3	0,7	-	0,6	452	502	-	531
Пищевые отходы	78,4	-	17,8	1,1	2,9	80	180	684	730

Проанализировав температуру, необходимую для полного сгорания образцов, определен порядок сгорания компонентов ТКО: картон, текстиль, полиэтилен низкой плотности, дерево, бумага, пищевые отходы, ПЭТФ, резина. Для образцов картона, текстиля, полиэтилена низкой плотности и дерева термодеструкция завершилась до $T=540^{\circ}\text{C}$. Образцы бумаги, пищевых отходов и ПЭТ имеют малую долю (1-9%) веществ, которые не разлагаются до температуры выше 700°C . Образец резины полностью разлагается при более высоких температурах в отличие от других компонентов отходов, вследствие содержания остаточных органических веществ.

Для оценки степени стабильности исследуемых образцов отходов разного возраста захоронения был проведен СТА.

В ходе СТА образцов отходов были получены результаты, представляющие собой набор кривых: ДСК - кривая изменения теплового потока в процессе проведения анализа, ТГ - кривая изменения массы в процессе проведения анализа [139]. Для сравнительной характеристики процессов деструкции отходов использовали образцы дерново-подзолистой почвы, т.к. известно, что сформированный свалочный грунт по физико-химическим характеристикам приближается к состоянию дерново-подзолистых почв [130].

Анализ результатов СТА образцов отходов, полученных при их термическом разложении в среде воздуха

Характеристика полученных кривых ДСК и ТГ для исследуемых образцов отходов в среде воздуха представлена таблице 3.5.

На рисунке 3.11 представлены кривые ДСК для образцов отходов разного срока захоронения в среде воздуха в сравнении с образцом дерново-подзолистой почвы.

Таблица 3.5 – Характеристика кривых ДСК и ТГ в среде воздуха для исследуемых образцов отходов

Наименование объекта исследования	Характеристика образца	Возраст образца, лет	Интервал Т экзоэффекта, °С	Экзотермические пики	Эндотерми- ческие пики	Тепловой эффект, Дж/г	Потеря массы, %
Объект «А»	пр.1, гл.2,5-2 м	2-2,4	180-561	239,6°С, 350,8°С, 416,6°С, 496,2°С	-	9623	75,34
	пр.2, гл.3,5-4 м	2,3-2,7	160-613	241,3°С, 283°С, 338,9°С, 359,7°С, 381,3°С, 437,5°С, 463,2°С	-	6558	55,37
	пр.3, гл.5,5-6 м	2,2-3	160-650	316,9°С, 387,5°С, 416,6°С, 431,9°С, 472,8°С, 505,4°С	-	5708	52,58
	пр.5, гл.1-1,5 м	0,6-1	150-683,7	310,5°С, 437,8°С	683,7°С	3254	47,72
	пр.6, гл.2,5-3 м	3,0	150-570	318,5°С, 356,4°С, 418,2°С, 434°С, 459,7°С, 473,5°С, 485,9°С, 518,4°С	720,0°С	2494	31,68
	пр.7, гл.5,5-6 м	2,9-3,2	150-709,2	315°С, 441,2°С, 484,8°С, 564,1°С, 574,4°С	709,2°С	1888	30,86
Объект «Б»	пр.1, гл.0,5-1 м	40	120-608	245,2°С, 315,7°С,	738,6°С	1340	24,64
	пр.2, гл.1-1,5 м	50	95-618	247°С, 324,8°С	740,5°С	926,6	19,49
	пр.3, гл. 0,5-1 м	40	125,7-615	236,4°С, 316,8°С, 391,6°С, 441,9°С	708,7°С	1464	23,67
	пр.4, гл. 1-1,5 м	50	150-619	235,1°С, 316,3°С, 416,2°С, 439,2°С, 456,6°С	703,5°С	1109	19,17
	пр.5, гл.1-1,5 м	0,5-1,1	150-665	225,8°С, 298,6°С, 346,2°С, 440,3°С	-	3745	51,86
	пр.6, гл.2-2,5 м	1,3-1,7	160-637	236,7°С, 296°С, 380,7°С	-	3649	43,12
	пр.7, гл.3-3,5 м	1,6-2,4	160-696,5	244,7°С, 315,9°С, 341,1°С, 395,5°С	696,5°С	3023	43,89
	пр.8, гл.4-4,5 м	3-3,3	160-659	238,6°С, 285,6°С, 370,3°С	-	2523	35,99
	пр.9, гл.1-1,5 м	1,8-2,4	150-624	240,9°С, 305,3°С, 348,1°С, 386,2°С, 470,3°С	694,3°С	2567	37,83
	пр.10, гл.2-2,5 м	2,7-2,8	135-610	237,4°С, 305,5°С, 339,8°С, 405,1°С, 457,4°С, 465,9°С	680,2°С	2707	42,26
	пр.11, гл.3-3,5 м	2,7-2,8	140-610	242°С, 289,6°С, 386,5°С, 445,7°С, 460,1°С, 484,9°С	673,0°С	2689	41,98
	пр.12, гл. 4-4,5 м	4,7-5,3	140-630	240,1°С, 284,7°С, 387,4°С, 410,9°С, 436,6°С, 453,9°С	-	2674	40,18

Наименование объекта исследования	Характеристика образца	Возраст образца, лет	Интервал Т экзоэффекта, °С	Экзотермические пики	Эндотерми- ческие пики	Тепловой эффект, Дж/г	Потеря массы, %
Объект «В»	пр.1, гл.1-1,5 м	15	140-670	316,3°С, 330,7°С, 434,4°С, 464,1°С	730,9°С	4663	61,58
	пр.2, гл.3-3,5 м	20	150-610	224,8°С, 320,8°С, 382,8°С, 407,3°С	732,8°С	2932	34,42
	пр.3, гл.4,5-5 м	30	150-630	321,8°С, 427,7°С, 455,6°С	732,6°С	1710	30,09
	пр.4, гл.7,5-8 м	40	150-640	318,5°С, 329,4°С, 388,3°С, 462°С	-	1590	24,06
	пр.7, гл.4,5-5 м	30	150-625	315,2°С, 406,6°С, 454,5°С, 469,4°С	709,2°С	2254	36,26
	пр.8, гл.7,5-8 м	40	140-625	315,9°С, 323,7°С, 412,2°С, 428,6°С	709,8°С	2300	39,03
	пр.11, гл. 4,5-5 м	30	140-655	309,8°С, 412,7°С, 466,3°С, 492,7°С	682,5°С	2400	32,14
	пр.12, гл. 7,5-8 м	40	150-640	317,3°С	-	1769	25,38
Объект «Г»	пр.1, 1,5-2 м	40	160-651	322°С	709,6°С	1620	20,84
	пр.2, гл.2,5-3 м	45	150-644	329,7°С	722,7°С	669	12,44
	пр.3, гл.4,5-5 м	55	150-570	333,8°С, 423,6°С, 457,4°С, 531,8°С	708,7°С	396,9	9,86
	пр.5, гл.2,5-3 м	45	150-638	321,9°С, 439,6°С	708,7°С	1723	27,41
	пр.7, гл.5,5-6 м	60	140-640	343,3°С, 379,2°С, 501,5°С	738,2°С	1678	23,08
Объект «Д»	пр.1, гл. 1-1,5 м	1,2	150-608	252,8°С, 368,5°С, 430,9°С, 455,1°С	-	7995	51,16
	пр.5, гл. 5-5,5 м	4	150-615	243,9°С, 335°С, 359°С, 430,7°С, 443,8°С	668,5°С	7051	46,31
	пр.6, гл. 1-1,5 м	1,2	150-630	253,7°С, 335,9°С, 397,7°С	680,5°С	8009	48,89
	пр.10, гл. 5-5,5 м	4	160-638	246,5°С, 343,4°С	672,0°С	5283	33,94

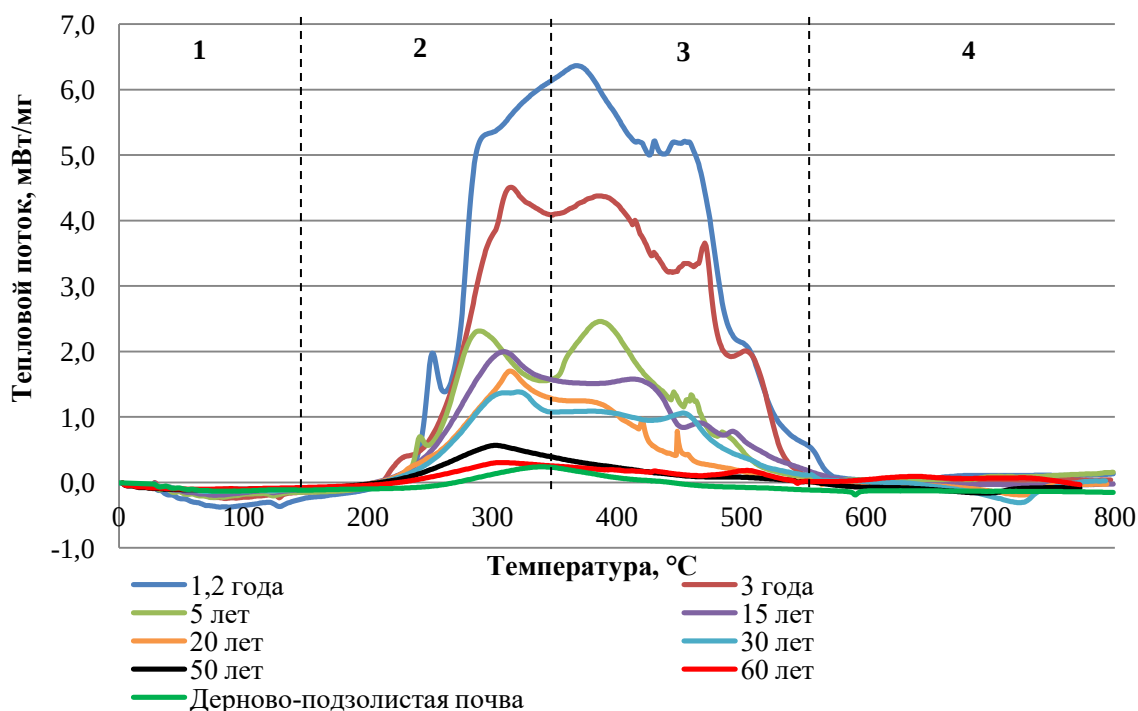


Рисунок 3.11 – ДСК-кривые для отходов разного срока захоронения в среде воздуха

На основании анализа кривых ДСК в среде воздуха было установлено, что интенсивность тепловых потоков при деструкции зависит от длительности захоронения отходов. По кривым ДСК в среде воздуха было определено, что при термической деструкции образцов отходов до 180°C происходят эндотермические процессы, связанные с реакциями дегидратации (испарением влаги). При дальнейшем росте температуры в образцах протекают экзотермические процессы. Выделяют 2 этапа разложения (экзотермических пика) отходов в интервале температур $T=220-550^{\circ}\text{C}$, в котором происходят основные процессы деструкции, и окисления органической части отходов, что также подтверждается образующимися при масс-спектральном анализе кислородсодержащими соединениями (рисунок 3.12). Экзотермические пики в интервале температур $T=220-330^{\circ}\text{C}$ связаны с окислительной деструкцией полимерных материалов (полипропилен, поликарбонат), бумаги, картона. Пики в интервале $T=390-550^{\circ}\text{C}$ характерны для полиамидов, полиэтилена, ПЭТ, резины, древесных отходов [131,139,142].

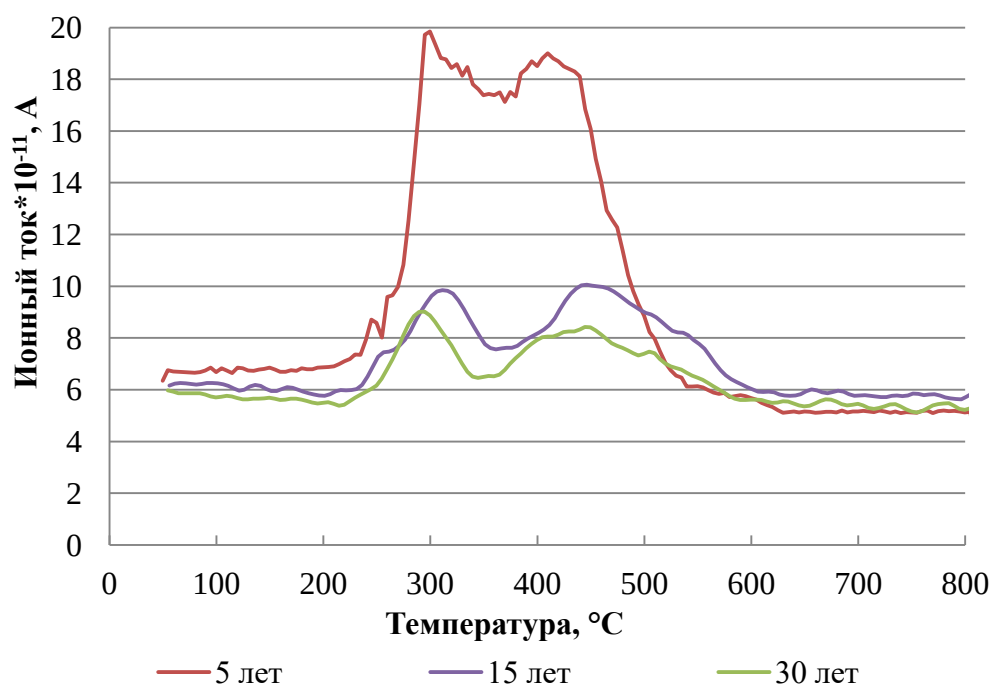


Рисунок 3.12 – Кривые ионного тока компонентов газовой фазы ($M/z=28$) при СТА отходов в среде воздуха

Для дерново-подзолистой почвы характерен ярко выраженный один экзотермический пик при $T=330,7^{\circ}\text{C}$. Тепловые потоки образцов отходов сроком захоронения более 30 лет в области температур $T=300-330^{\circ}\text{C}$ аналогичны потокам, образующимся при окислительной деструкции дерново-подзолистой почвы [139].

Эндотермические эффекты в области температур $T=650-800^{\circ}\text{C}$ могут быть объяснены разложением неорганической компонентой отходов, минеральных солей (карбонатов кальция и магния, сульфатов алюминия и т.д.). Данные пики выявлены на кривых ДСК образцов сроком захоронения более 30 лет (объект «Г» и рекультивированные участки объекта «Б»). Отходы с данных свалок наиболее стабильны по термическим параметрам, что также подтверждается данными физико-химического и биохимического анализа [139].

В результате анализа кривых ДСК выявлено смещение пиков начала горения образцов с увеличением возраста захоронения в более высокую область температур ($305,5^{\circ}\text{C}$, $309,8^{\circ}\text{C}$, $316,9^{\circ}\text{C}$, $321,8^{\circ}\text{C}$, $324,8^{\circ}\text{C}$, $329,7^{\circ}\text{C}$), что может свидетельствовать об увеличении степени разложения отходов. Повышение

температуры начала горения может свидетельствовать о степени гумификации отходов. Начало горения образцов, отобранных с объекта «Г» (возраст отходов более 50 лет), рекультивированных участков объекта «Б» (возраст отходов более 40 лет) и дерново-подзолистой почвы практически совпадают [131,142].

Наибольшие экзотермические эффекты были выявлены при разложении образцов «молодых» отходов, отобранных на объекте «А», эксплуатируемом участке объекта «Б», объекте «Д» (возраст отходов 1-6 лет).

По кривым ДСК в среде воздуха, полученных в ходе СТА были рассчитаны удельные энтальпии (теплосодержание) СВ и ОСВ образцов отходов, отобранных на исследуемых полигонах, в диапазоне $T=35-800^{\circ}\text{C}$. Было определено, что энтальпии СВ отходов уменьшаются с прогрессирующей деградацией органических веществ. [139,142].

На основании полученных данных была выявлена зависимость отношения $\text{Э}(\text{СВ})/\text{Э}(\text{ОСВ})$ от возраста отходов (рисунок 3.13).

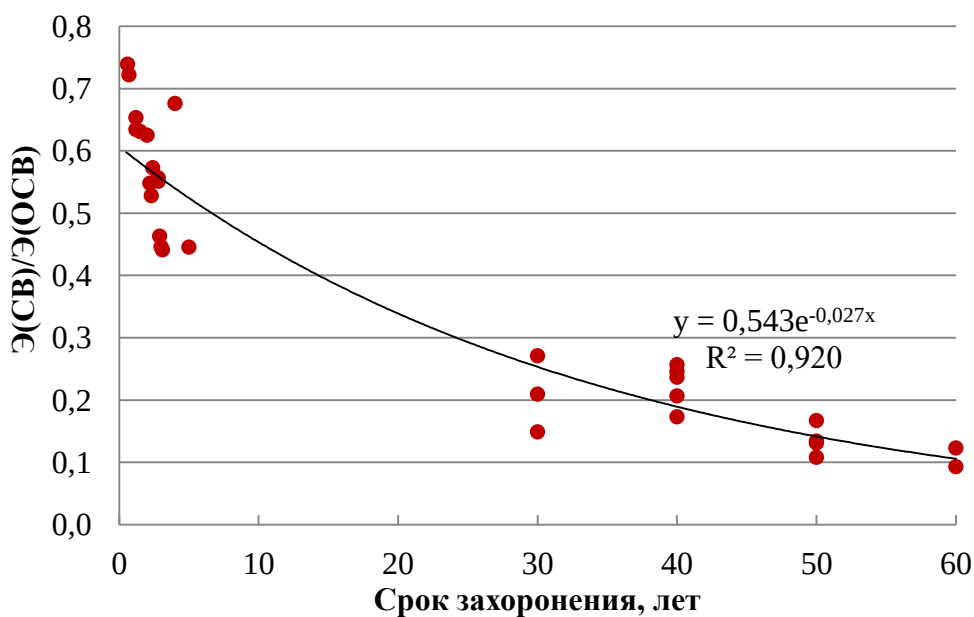


Рисунок 3.13 – Отношение удельных энтальпий СВ и ОСВ исследуемых образцов отходов в среде воздуха

Отношение $\text{Э}(\text{СВ})/\text{Э}(\text{ОСВ})$ для отходов сроком захоронения менее 5 лет уменьшается наиболее интенсивно, чем отношение $\text{Э}(\text{СВ})/\text{Э}(\text{ОСВ})$ для отходов

сроком захоронения более 10 лет, что объясняется увеличением степени разложения органической составляющей в отходах.

На рисунке 3.14 представлены кривые ТГ снятые в среде воздуха для образцов отходов, отобранных с исследуемых объектов захоронения ТКО, находящихся на различных этапах жизненного цикла, в сравнении с образцом дерново-подзолистой почвы.

Полученные результаты ТГ анализа показали, что потеря массы образцов происходит в несколько этапов. Первый температурный интервал $T=0-220^{\circ}\text{C}$, характеризуется незначительным снижением массы образца (от 1,0 до 11,0 %) вследствие испарения физической и связанной влаги с поверхности образца. При дальнейшем увеличении температуры до 550°C происходит достаточно быстрое уменьшение массы, обусловленное термическим разложением органических веществ и интенсивным выходом летучих соединений, содержащихся в образце.

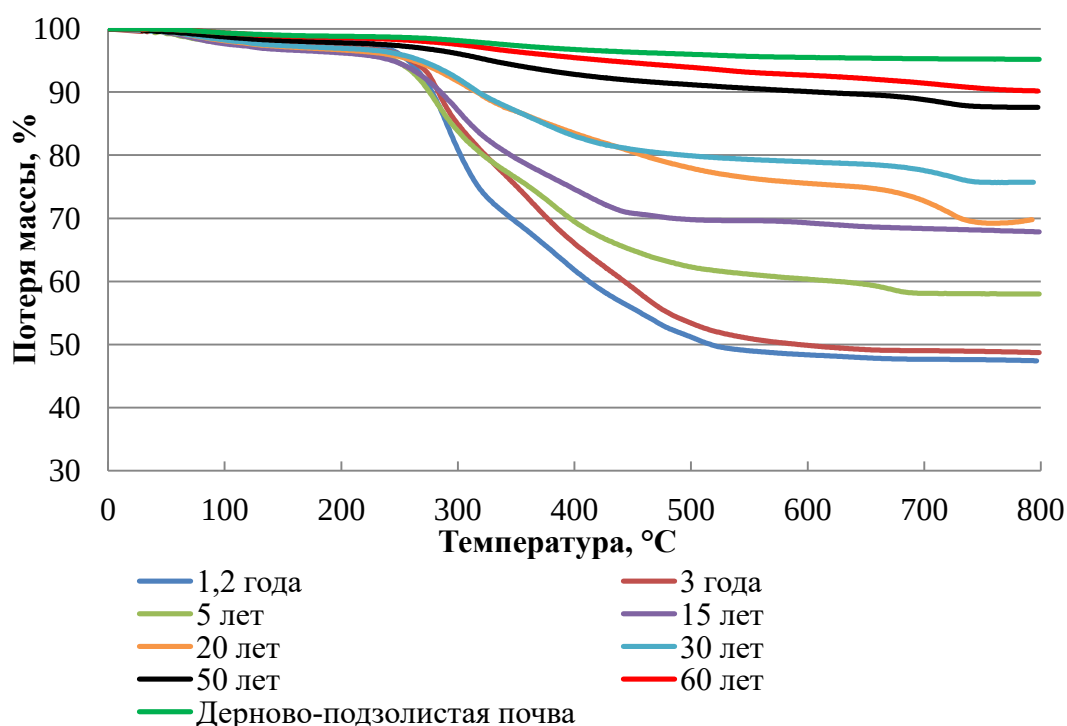


Рисунок 3.14 – ТГ-кривые для отходов разного срока захоронения в среде воздуха

В интервале температур $T=220-550^{\circ}\text{C}$ на кривой ТГ (рисунок 3.11) наблюдается выраженная степень потери массы, которая может свидетельствовать о высоком содержании в образце органических веществ, что может быть обусловлено константой скорости разложения (таблица 3.6). При

температуре выше 550°C наблюдается резкое падение скорости потери массы образца и, следовательно, снижение значения константы скорости разложения образца. При температуре $T=550^{\circ}\text{C}$ разложение органических веществ заканчивается.

Для определения константы скорости разложения отходов было использовано кинетическое уравнение 1 порядка (формула 3.1):

$$-\frac{dm}{t} = k * m \quad (3.1)$$

Установлено, что график в координатах $\ln m_t - t$ будет линейным; по тангенсу угла наклона (формула 3.2) этого графика можно оценить константу скорости разложения (k):

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\Delta \ln m}{\Delta t} = k \quad (3.2)$$

Потери массы для отходов сроком захоронения 1-3 года составили: объект «А» - 52,58%, объект «Б» - 48,26%, объект «Д» - 42,96%. Наименьшая потеря массы установлена у образцов сроком захоронения более 50 лет - 9,2% (объект «Г»), что свидетельствует о высокой доле инертной составляющей отхода, их стабильности и завершенности биохимических процессов деструкции.

Кривые ТГ демонстрируют снижение константы скорости разложения образцов с увеличением срока захоронения отходов (рисунок 3.15), что также подтверждается снижением содержания органического вещества (рисунок 3.16).

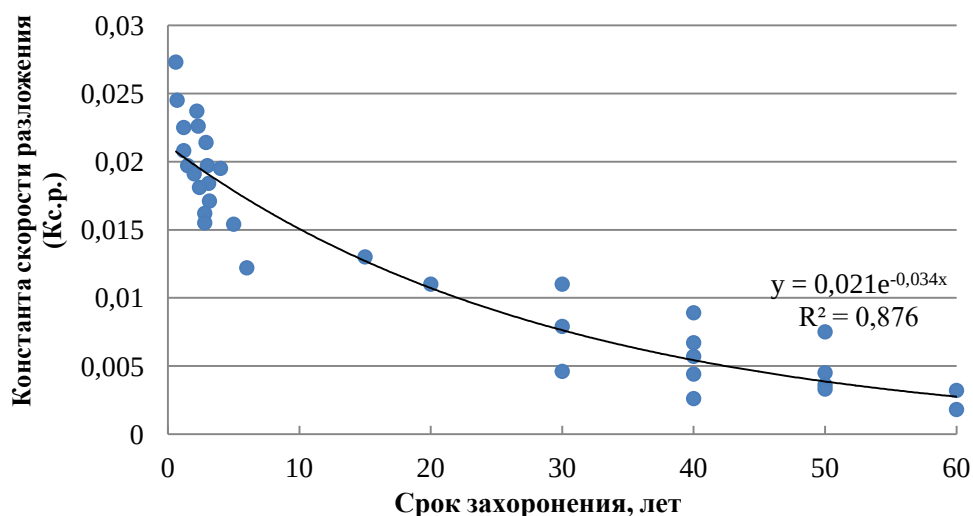


Рисунок 3.15 – Изменение константы скорости разложения отходов от срока захоронения

Таблица 3.6 - Характеристика кривых ТГ в среде воздуха для исследуемых образцов отходов

Наименование объекта исследования	Характеристика образца	Возраст образца, лет	Потеря массы, %	Константа скорости разложения (К _{с.р.})	Потеря массы, %	Константа скорости разложения (К _{с.р.})	Потеря массы, %	Константа скорости разложения (К _{с.р.})	Общая потеря массы, %
			Т=0-220 °С		Т=220-550 °С		Т=550-800 °С		
Объект «А»	пр.1, гл.2,5-2 м	2-2,4	1,46	0,0014	71,91	0,0457	1,97	0,0031	75,34
	пр.2, гл.3,5-4 м	2,3-2,7	2,77	0,0012	51,03	0,0256	1,56	0,0012	55,36
	пр.3, гл.5,5-6 м	2,2-3	3,04	0,0013	47,94	0,0234	1,60	0,0028	52,58
	пр.5, гл.1-1,5 м	0,6-1	5,15	0,0024	39,65	0,0183	2,93	0,0028	47,73
	пр.6, гл.2,5-3 м	3	3,03	0,0015	19,92	0,0077	8,02	0,0056	30,97
	пр.7, гл.5,5-6 м	2,9-3,2	3,04	0,0014	22,45	0,0084	6,19	0,0035	31,68
Объект «Б»	пр.1, гл.0,5-1 м	40	3,92	0,0022	14,67	0,0057	6,06	0,0037	24,65
	пр.2, гл.1-1,5 м	50	3,27	0,002	10,71	0,004	5,51	0,0031	19,49
	пр.3, гл. 0,5-1 м	40	3,43	0,002	11,62	0,0044	4,04	0,0024	19,09
	пр.4, гл. 1-1,5 м	50	3,21	0,0018	16,73	0,0065	5,64	0,0023	25,58
	пр.5, гл.1-1,5 м	0,5-1,1	5,16	0,0023	48,39	0,0245	1,59	0,0028	55,14
	пр.6, гл.2-2,5 м	1,3-1,7	4,28	0,0019	41,69	0,0197	1,23	0,0026	47,2
	пр.7, гл.3-3,5 м	1,6-2,4	3,32	0,0016	30,40	0,0171	2,94	0,0019	36,66
	пр.8, гл.4-4,5 м	3-3,3	4,88	0,0024	37,79	0,0161	1,67	0,001	44,34
	пр.9, гл.1-1,5 м	1,8-2,4	4,41	0,0015	29,8	0,0187	3,49	0,0029	37,7
	пр.10, гл.2-2,5 м	2,7-2,8	4,39	0,002	35,02	0,0172	2,89	0,0026	42,3
	пр.11, гл.3-3,5 м	2,7-2,8	3,95	0,0019	34,95	0,0165	3,10	0,0025	42
	пр.12, гл. 4-4,5 м	4,7-5,3	3,24	0,0016	35,18	0,0161	1,78	0,0011	40,2
Объект «В»	пр.1, гл.1-1,5 м	15	11,58	0,0062	49,44	0,0098	1,07	0,0018	62,09
	пр.2, гл.3-3,5 м	20	3,23	0,0018	17,43	0,0071	3,84	0,0023	24,5
	пр.3, гл.4,5-5 м	30	3,54	0,002	20,02	0,0079	6,60	0,0048	30,16
	пр.4, гл.7,5-8 м	40	3,61	0,0022	18,95	0,0077	3,09	0,002	25,65
	пр.7, гл.4,5-5 м	30	5,49	0,0032	25,26	0,011	5,34	0,0037	36,09
	пр.8, гл.7,5-8 м	40	5,28	0,003	28,68	0,0129	5,07	0,004	39,03
	пр.11, гл. 4,5-5 м	30	5,62	0,0032	36,97	0,018	4,44	0,004	47,03
	пр.12, гл. 7,5-8 м	40	4,07	0,0023	26,30	0,0116	1,76	0,0011	32,13
Объект «Г»	пр.2, гл.2,5-3 м	50	2,31	0,0012	7,09	0,0026	3,05	0,0016	12,45
	пр.3, гл.4,5-5 м	60	1,48	0,0009	5,37	0,0018	2,97	0,0014	9,82
	пр.5, гл.2,5-3 м	50	3,55	0,0022	18,08	0,0073	1,57	0,0006	23,2
	пр.7, гл.5,5-6 м	60	3,93	0,0023	18,31	0,0072	5,17	0,0029	27,41
Объект «Д»	пр.1, гл. 1-1,5 м	1,2	3,12	0,0019	45,9	0,0225	2,26	0,0015	51,28
	пр.5, гл. 5-5,5 м	4	3,39	0,002	40,84	0,0195	2,13	0,0021	46,36
	пр.6, гл. 1-1,5 м	1,2	2,86	0,0017	43,18	0,0208	3,20	0,0027	49,24
	пр.10, гл. 5-5,5 м	4	3,06	0,0019	28,45	0,0122	2,45	0,0015	33,96
Дерново- подзолистая почва	-	-	1,20	0,0008	3,12	0,0011	0,50	0,0002	4,83

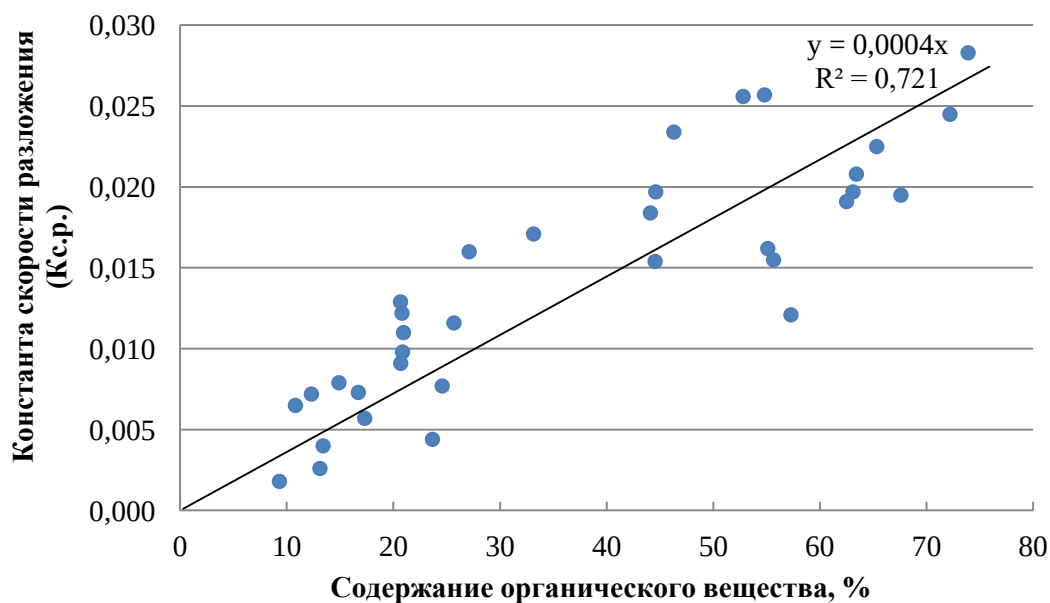


Рисунок 3.16 – Изменение константы скорости разложения отходов от содержания органического вещества

Анализ полученных результатов позволил установить константы скорости разложения отходов разного срока захоронения, полученные по кривым ТГ в интервале $T=220-550^{\circ}\text{C}$. Установлено, что для отходов сроком захоронения до 8 лет константа скорости разложения $K_{с.р.} > 0,017$; для отходов сроком захоронения 8-35 лет - $K_{с.р.} = 0,007-0,017$; для отходов сроком захоронения более 35 лет - $K_{с.р.} < 0,007$.

Анализ результатов СТА образцов отходов, полученных при их термическом разложении в среде аргона

При проведении исследований термической деструкции образцов отходов, отобранных на старых свалках и полигонах (возраст отходов более 30 лет), в среде воздуха наблюдается совпадение экзотермических пиков окислительной деструкции образцов, что не позволяет определить различие в природе органических веществ, входящих в состав образцов. Также возникают сложности в идентификации эндотермических пиков в интервале температур $T=650-800^{\circ}\text{C}$, показывающих разложение неорганической части отходов, солей. В этой связи было принято решение о проведении СТА образцов отходов в инертной среде -

среде аргона [139]. Характеристика полученных кривых ДСК и ТГ для исследуемых образцов отходов в среде аргона представлена в таблице 3.7.

На рисунке 3.17 представлены кривые ДСК для образцов отходов разного срока захоронения, снятые в среде аргона в сравнении с образцом дерново-подзолистой почвы.

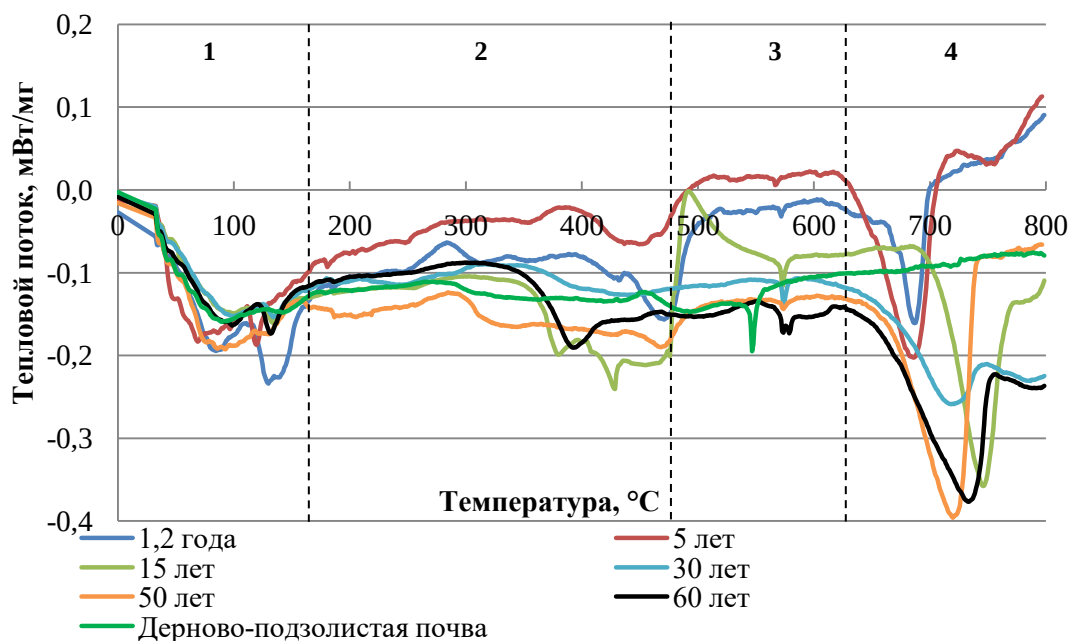


Рисунок 3.17 – ДСК-кривые для отходов разного срока захоронения в среде аргона

Анализ кривых ДСК для отходов разного срока захоронения в среде аргона показал, что для всех образцов отходов характерны четыре интервала термических эффектов (эндотермических пиков): 1 пик - в интервале температур $T=80-150^{\circ}\text{C}$ связан с процессами дегидратации; 2 пик - в интервале температур $T=420-500^{\circ}\text{C}$ связан с основными процессами десорбции и деструкции органической части отходов, 3 пик - в интервале температур $T=550-620^{\circ}\text{C}$, который может быть связан с процессами карбонизации органической составляющей отходов, и 4 пик в области температур $T=680-720^{\circ}\text{C}$, который может быть объяснен деструкцией высокомолекулярных соединений, разложением неорганической части отходов, например разложением карбоната кальция и магния, сульфата алюминия и др., что подтверждается обнаруживаемыми при масс-спектропии пиками на кривых ионного тока $M/z=44$ (углекислый газ) и $M/z=64$ (диоксид серы) [139,142].

Таблица 3.7 – Характеристика кривых ДСК и ТГ в среде аргона для исследуемых образцов отходов

Наименование объекта захоронения отходов	Характеристика образца	Возраст образца, лет	Интервал Т эндозффекта, °С (+пик)	Тепловой эффект Дж/г	Потеря массы, %	Интервал Т эндозффекта, °С (+пик)	Тепловой эффект, Дж/г	Потеря массы, %
Объект «А»	пр.5, гл.1-1,5 м	0,6-1	536-606 (572 °С)	0,485	0,99	606,0-730,0 (693,3 °С)	47,48	3,99
	пр.6, гл.2,5-3 м	3	540-629 (572,4 °С)	0,438	2,00	629,0-725 (709 °С)	135,7	8,0
	пр.7, гл.5,5-6 м	2,9-3,2	545-590 (572,8 °С)	1,145	0,95	628-781,1 (709,2 °С)	57,31	4,84
Объект «Б»	пр.3, гл.0,5-1 м	40	580-607 (573 °С)	1,242	1,10	607-742 (719,2 °С)	89,45	6,04
	пр.4, гл.1-1,5 м	50	550-589 (573,7 °С)	1,012	1,00	680-800 (720,3 °С)	154,11	5,56
	пр.5, гл.1-1,5 м	0,5-1,1	386-518 (469 °С) 518-608 (572 °С)	32,320	13,76	608-700 (678,7 °С)	37,44	4,62
	пр.6, гл.2-2,5 м	1,3-1,7	385-518 (420,6 °С, 472,4 °С) 518-600 (572,5 °С)	86,530	16,55	600-700 (682,3 °С)	27,34	3,32
	пр.7, гл.3-3,5 м	1,6-2,4	382-520 °С (437,9 °С, 465 °С) 520-600 (571,8 °С)	34,290	12,66	600-726 (698,4 °С)	56,72	3,65
	пр.8, гл.4-4,5 м	3-3,3	376-510 (470,5 °С) 550-600 (572,2 °С)	35,030	14,81	600-728 (687,2 °С)	34,02	5,26
	пр.9, гл.1-1,5 м	1,8-2,4	400-500 (432,2 °С, 469,7 °С) 550-600 (572,4 °С)	0,446	10,88	600-726 (704,5 °С)	74,03	6,1
	пр.10, гл.2-2,5 м	2,7-2,8	385-510 (454 °С) 510-606 (572,4 °С)	25,050	8,98	606-727 (691,6 °С)	54,92	5,23
	пр.11, гл.3-3,5 м	2,7-2,8	401-500 (472,1 °С) 550-610 (572,3 °С)	0,215	8,65	610-724 (693,2 °С)	61,86	4,21
	пр.12, гл. 4-4,5 м	4,7-5,3	398-530 (475,3 °С) 530-600 (572,3 °С)	21,310	8,16	600-723 (694,6 °С)	33,40	3,08
	пр.1, гл.1-1,5 м	15	280-389 (304,7 °С, 370,1 °С)	2,120	14,8	608-800 (694,9 °С)	71,72	6,1
Объект «В»	пр.2, гл.3-3,5 м	20	350-490 (379,7 °С, 427,9 °С) 490-690 (572,6 °С)	1,556	5,77	690-800 (745,7 °С)	84,75	6,23
	пр.3, гл.4,5-5 м	30	310-606 (498,6 °С, 572,3 °С)	83,290	6,82	606-800 (724,8 °С)	172,00	8,93
	пр.7, гл.4,5-5 м	30	300-490 (360,2 °С, 441,4 °С), 490-600 (572,3 °С)	8,991	6,12	608-800 (744,2 °С)	102,30	9,32
	пр.8, гл.7,5-8 м	40	372-538,5 (484 °С, 538,5 °С) 549,8-642 (572 °С)	12,340	9,82	642-800 (728,7 °С)	97,10	8,12
	пр.11, гл. 4,5-5 м	30	300-490 (371,4 °С, 458,8 °С) 490-608 (572 °С)	3,780	17,78	608-740 (719,8 °С)	81,40	6,29
	пр.12, гл. 7,5-8 м	40	340-520 (382,5 °С, 469,7 °С), 540-590 (572,4 °С)	1,009	18,87	674,5-820 (800 °С)	112,40	5,05
	пр.2, гл.2,5-3 м	50	384-500 (467,2 °С) 500-606 (573,4 °С)	1,871	4,93	640-730 (722,1 °С)	124,20	3,26
Объект «Г»	пр.3, гл.4,5-5 м	60	300-490 (459 °С), 540-600 (573,4 °С)	0,974	4,77	600-800 (733,4 °С)	142,00	3,08
	пр.5, гл.2,5-3 м	50	350-508 (439,2 °С), 550-590 (573,4 °С)	0,890	9,81	600-786 (719,4 °С)	128,30	6,17

В результате анализа кривых ДСК в среде аргона происходит смещение пиков начала деструкции образцов в сторону более высоких температур в интервале $T=680-720^{\circ}\text{C}$ с увеличением срока захоронения отходов ($693,6^{\circ}\text{C}$, $694,2^{\circ}\text{C}$, $703,4^{\circ}\text{C}$, $705,4^{\circ}\text{C}$, $710,5^{\circ}\text{C}$, $716,7^{\circ}\text{C}$), что свидетельствует об увеличении высокомолекулярных стабильных соединений в образцах [139]. Данная тенденция объясняется разрывом прочных связей углеродного скелета с образованием диоксида углерода, что подтверждается кривой ионного тока для отходов разного срока захоронения (рисунок 3.18). Сигнал масс-спектра показывает, что диоксид углерода начинает образовываться при 250°C и имеет три пика при 350°C , 520°C , 680°C (максимальная интенсивность ионного тока).

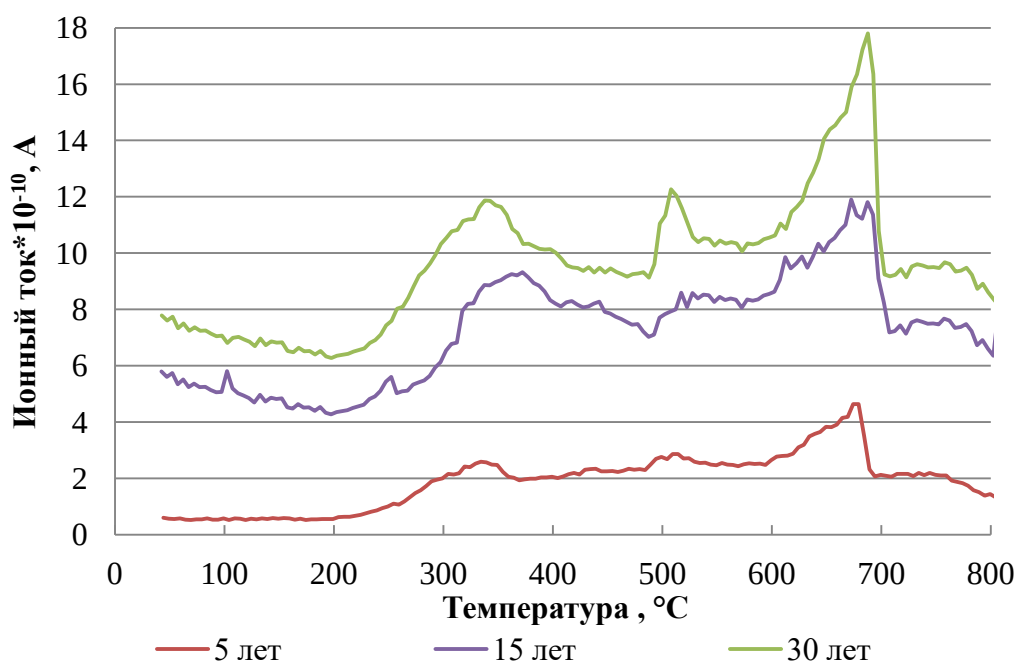


Рисунок 3.18 – Кривые ионного тока диоксида углерода ($M/z=44$) при СТА отходов в среде аргона

Сравнение ДСК образцов отходов с ДСК образца дерново-подзолистой почвы показало, что для образцов сроком захоронения более 30 лет в интервале температур $T=550-600^{\circ}\text{C}$ наблюдаются ярко выраженные эндотермические пики, которые характерны и для образцов дерново-подзолистой почвы [139,142].

При анализе деструкции образца дерново-подзолистой почвы можно выделить два основных пика тепловых потока в интервале температур $T=90-$

100°C и пик при $T=574^{\circ}\text{C}$, характерный для деструкции и пиролиза гуминовых соединений.

При длительном захоронении ТКО формирующийся свалочный грунт по свойствам приближается к характеристикам дерново-подзолистой почвы [130]. При термическом анализе образцов деструкция и пиролиз органических фракций образцов протекает в одном интервале температур с пиками при $T=585,2^{\circ}\text{C}$ (возраст отходов более 50 лет, объект «Б») и $T=574^{\circ}\text{C}$ (образец дерново-подзолистой почвы).

Для свалочного грунта наблюдается эндотермический пик при температуре $710,9^{\circ}\text{C}$, не характерный для образца дерново-подзолистой почвы, который может быть связан с разложением нерастворимых неорганических солей в свалочном грунте (карбонаты, фосфаты, сульфаты и др.) [139].

Установлено, что при проведении исследований термической деструкции образцов отходов, отобранных на старых свалках и полигонах (возраст отходов более 30 лет), в среде воздуха наблюдается совпадение экзотермических пиков окислительной деструкции образцов (329°C , 330°C), что не позволяет определить различие в природе органических веществ, входящих в состав образцов. При проведении исследований в среде аргона наблюдалось смещение эндотермических пиков карбонизации органической фракции образцов. В этой связи при исследовании стабильности гумифицированных отходов (отходы старых свалок, рекультивированных площадок) целесообразно проводить дополнительные исследования термической деструкции образцов отходов в инертной среде [139,142].

По кривым ДСК в среде аргона были определены энтальпии СВ от срока захоронения отходов представлены на рисунке 3.19.

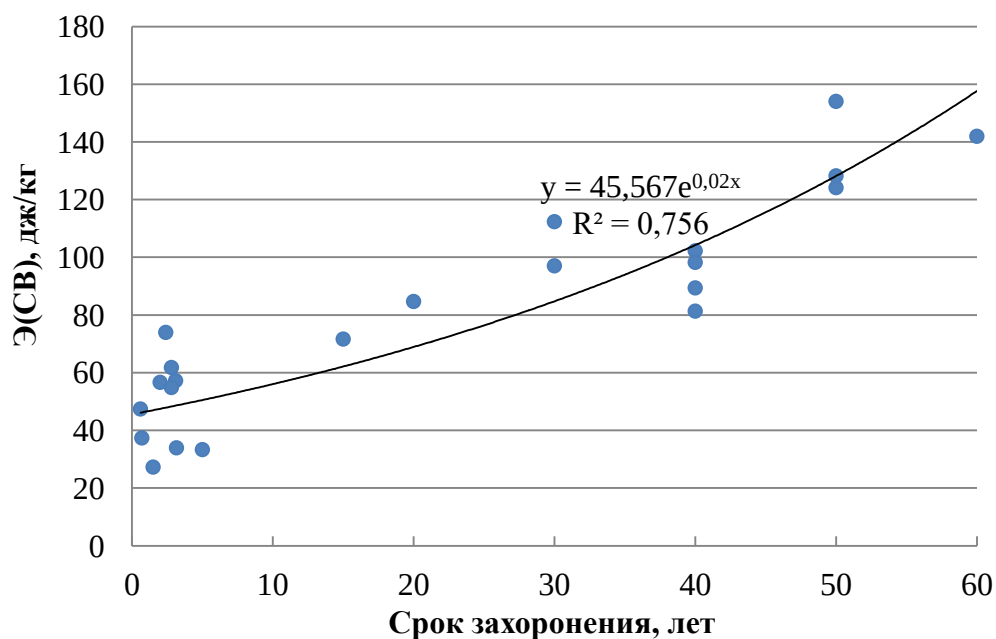


Рисунок 3.19 – Энтальпия СВ исследуемых образцов отходов в среде аргона

На основании полученных данных была выявлена зависимость энтальпии СВ от возраста отходов. Энтальпия СВ в среде аргона для отходов сроком захоронения более 10 лет увеличивается наиболее интенсивно, чем энтальпия СВ для отходов сроком захоронения менее 10 лет, что объясняется увеличением содержания минеральных соединений и степени разложения органической составляющей в отходах. При проведении СТА в среде аргона зависимости отношения $\text{Э(СВ)}/\text{Э(ОСВ)}$ отходов от срока захоронения выявлено не было.

На рисунке 3.20 представлены зависимости удельных энтальпий СВ исследуемых образцов отходов от зольности и органического углерода в среде аргона.

Было определено, что энтальпии СВ отходов уменьшаются с прогрессирующей деградацией органического углерода. Энтальпия СВ отходов увеличивается при возрастании показателя зольности в отходах.

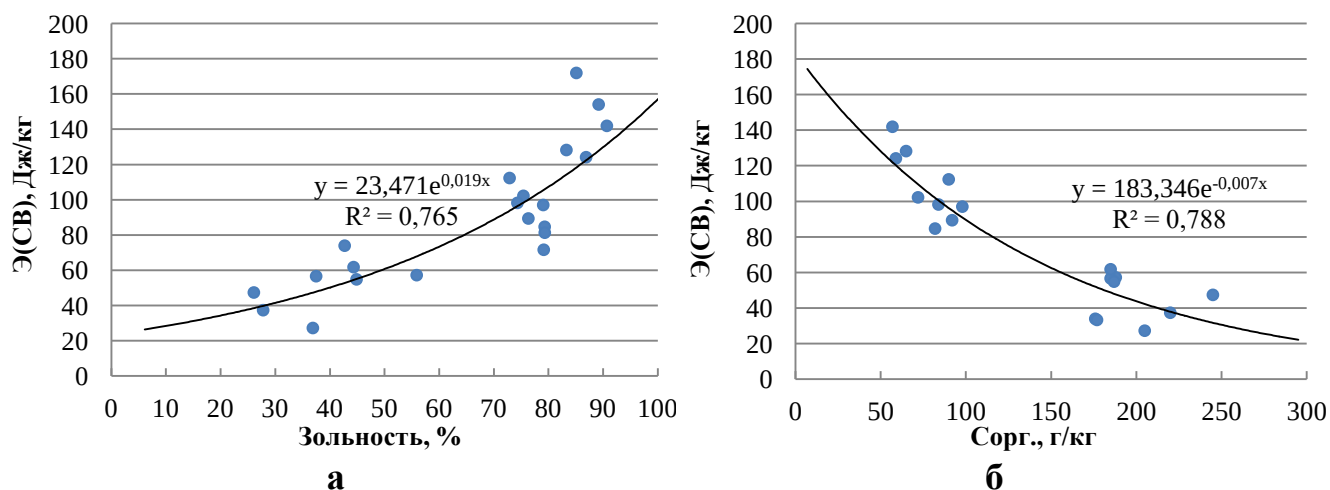


Рисунок 3.20 – Зависимость Э (СВ) и физико-химических параметров отходов в среде аргона: а - зольность; б - органический углерод

На рисунке 3.21 представлены кривые ТГ для образцов отходов разного срока захоронения в среде аргона в сравнении с образцом дерново-подзолистой почвы.

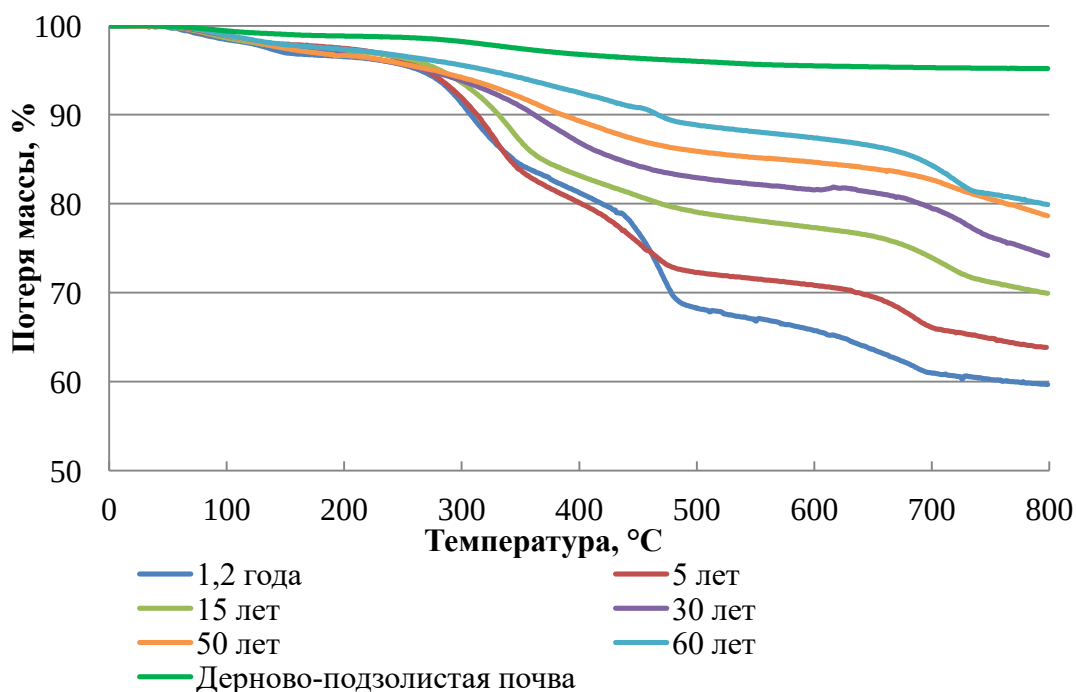


Рисунок 3.21 – ТГ-кривые для отходов разного срока захоронения в среде аргона

Полученные результаты ТГ анализа показали, что кривые изменения массы образцов в процессе нагрева имеют несколько ступеней. Первый температурный интервал $T=0-220^{\circ}\text{C}$, характеризуется незначительным изменением массы образца (от 0,5 до 5,4 %) вследствие процесса дегидратации. При дальнейшем повышении

температуры до 600°C на кривых ТГ фиксируется выраженная ступень, происходит достаточно быстрое уменьшение массы, обусловленное процессами карбонизации органической составляющей отходов. При температуре выше 600°C наблюдается резкое падение скорости потери массы образца.

Установлено, что для образцов отходов, отобранных на эксплуатируемых полигонах ТКО (срок захоронения до 10 лет), потеря массы протекает без ярко выраженных эндотермических пиков, что свидетельствует о превалировании процессов деструкции органических веществ [139,142]. Следует отметить, что при деструкции органических фракций «молодых» отходов потеря массы в интервале температур 220-600°C составляет около 30% и в 10 раз превышает этот показатель для образца дерново-подзолистой почвы, что свидетельствует о более высоком содержании в отходах органической составляющей.

3.4. Результаты лабораторного моделирования процессов разложения твердых коммунальных отходов

Для лабораторного моделирования процессов разложения отходов было загружено 16 биореакторов, использованы отходы с 2 объектов захоронения Пермского края, характеризующихся разным сроком захоронения отходов и условиями эксплуатации: объект «А» (возраст отходов 2-3 года) и объект «В» (возраст отходов около 20 лет).

Главным фактором ускорения разложения отходов являлось добавление свежей воды в биореактор взамен адекватного количества фильтрата.

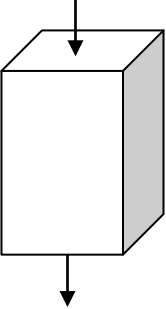
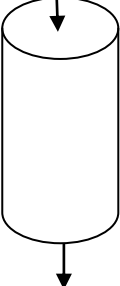
Для образцов отходов определялись следующие физико-химические и биохимические параметры: влажность, аммонийный азот, ХПК, органический углерод, зольность, дыхательная активность (RI_4), потенциал газообразования (GS_{21}). Для оценки стабильности образцов отходов определяли термические параметры (тепловой поток, потеря массы, $\Delta(CB)/\Delta(OCB)$, $K_{c.p.}$).

Отходы каждого биореактора имели сопоставимые коэффициенты ускорения, количество добавляемой воды было скорректировано в зависимости от

массы отходов. Возраст отходов в лабораторных биореакторах был пересчитан на реальные условия полигона.

Результаты лабораторного моделирования процессов разложения отходов объекта «В»

Для определения коэффициента ускорения в лабораторном эксперименте был произведен расчет количества добавляемой воды для отходов объекта «В».

Фрагмент полигона Осадки: 700 мм/год	Биореактор Оборотная вода 23,8 л/год
Площадь: 1 м ² Высота: 8 м Плотность сух. в-ва: 0,8 мг/м ³ Выход фильтрата: 40% осадков=280 мм/год= 280 л/год 	Масса отходов: 20,3 кг (по СВ) 

Удельное годовое количество фильтрата (л/кг СВ)

$$\text{Полигон: } Q_{\text{СВ}} = \frac{280 \text{ л}}{6400 \text{ кг*год}} = 0,044 \frac{\text{л}}{\text{кг*год}}$$

$$\text{Биореактор: } Q_{\text{СВ}} = \frac{23,8 \text{ л}}{20,3 \text{ кг*год}} = 1,06 \frac{\text{л}}{\text{кг*год}}$$

$$\text{Коэффициент ускорения: } \frac{BR}{\text{полигон}} = \frac{1,06}{0,044} = 24,1$$

*Сумма отведенного фильтрата: вода/тв.в-во = $Q_{\text{СВ}} * t$ (л/кг СВ)*

Разница во времени t до достижения соотношения вода/тв.в-ва (L/S)

$$1 \text{ л/кг СВ: } t = (L/S) / Q_{\text{СВ}}$$

$$\text{Полигон: } t = \frac{1 \frac{\text{л}}{\text{кг}} \cdot \text{сух.в-ва}}{0,044 \text{ л}/(\text{кг} \cdot \text{сух.в-ва} \cdot \text{год})} = 22,7 \text{ лет}$$

$$\text{Биореактор: } t = \frac{1 \frac{\text{л}}{\text{кг}} \cdot \text{сух.в-ва}}{1,06 \text{ л}/(\text{кг} \cdot \text{сух.в-ва} \cdot \text{год})} = 0,94 \text{ года}$$

На основании проведенных расчетов коэффициент ускорения процессов в биореакторах составил 24,1. Следовательно, 1 год моделирования процессов разложения отходов в биореакторах равен около 24 годам цикла полигона захоронения отходов. Объем добавляемой воды составлял 0,6-0,7 л. в неделю.

Результаты определения физико-химических, биохимических и термических параметров отходов объекта «В», изменяющихся в процессе ускоренного процесса разложения в биореакторах представлены в таблице 3.8.

На основании результатов показателя ХПК водной вытяжки отходов (380,2-154,0 мгО₂/л) определено, что отходы находятся на стадии стабильного метаногенеза. Значения показателя зольности и содержание в отходах органического углерода говорят о завершающемся процессе разложения отходов и увеличении их стабилизации после окончания эксперимента. Снижение содержания аммонийного азота в отходах (3,5-1,3 г/кг) может быть связано с замедлением процессов восстановительного дезаминирования азотсодержащих соединений.

Результаты определения показателя дыхательной активности отходов и потенциала газообразования показали, что за период эксперимента, произошло достижение приемлемого для окружающей среды уровня данных показателей ($RI_4 \leq 2,0$ мгО₂/г СВ; $GS_{21} \leq 5,0$ л/кг СВ), вследствие снижения содержания органического вещества в отходах.

Для оценки изменения стабильности исследуемых образцов отходов в лабораторном эксперименте был проведен СТА в среде воздуха.

На рисунках 3.22 и 3.23 представлены кривые ДСК и ТГ для отходов объекта «В» в зависимости от дней эксперимента.

Таблица 3.8 – Параметры отходов объекта «В»

№ биореактора	Дни эксперимента	Возраст отходов в эксперименте, лет	Возраст объекта, лет	ХПК, мгО ₂ /л	NH ₄ -N, г/кг	Зольность, %	RI ₄ , мгО ₂ /г СВ	GS ₂₁ , л/кг СВ	C _{орг} , г/кг	Э(СВ)/Э(ОСВ)	K _{с.р.}
1	120	3,45	23,45	380,2	3,5	69,2	4,8	7,5	96,5	0,308	0,0091
2	180	8,9	28,9	290,8	3,6	70,4	5,3	8,4	98,4	0,296	0,0072
3	220	12,2	32,2	224,4	2,42	70,1	4,1	6,1	84,3	0,299	0,0063
4	260	14,8	34,8	250,2	2,18	72,2	3,6	5,4	73,9	0,278	0,0041
5	330	16,1	36,1	202,4	1,82	75,2	2,9	5,5	64,1	0,248	0,0054
6	370	19,6	39,6	193,8	2,14	76,4	2,8	4,8	58,8	0,236	0,0046
7	400	22,5	42,5	172,6	1,54	79,1	2,0	4,3	62,4	0,209	0,0041
8	450	27,5	47,5	154,0	1,3	85,2	1,6	3,9	56,2	0,148	0,0046

Таблица 3.9 – Параметры отходов объекта «А»

№ биореактора	Дни эксперимента	Возраст отходов в эксперименте, лет	Возраст объекта, лет	ХПК, мгО ₂ / л	NH ₄ -N, г/кг	Зольность, %	RI ₄ , мгО ₂ /г СВ	GS ₂₁ , л/кг СВ	C _{орг} , г/кг	Э(СВ)/Э(ОСВ)	K _{с.р.}
1	120	3,1	5,1	4800,4	12,4	39,2	19,0	44,2	280,4	0,548	0,0197
2	160	7,8	9,8	4108,8	14,42	43,2	17,1	46,3	262,3	0,568	0,0208
3	200	11,8	13,8	4280,1	10,52	48,8	18,2	38,4	204,1	0,512	0,0184
4	250	13,6	15,6	3844,8	6,4	51,4	12,3	26,5	201,3	0,486	0,0174
5	280	18,8	20,8	2106,4	6,82	59,2	10,1	19,1	194,1	0,408	0,0145
6	330	22,6	24,6	1806,2	5,58	62,2	6,4	15,6	168,3	0,378	0,0119
7	380	26,2	28,2	1042,8	5,4	65,4	5,3	9,4	112,5	0,346	0,0098
8	450	30,2	32,2	1003,0	3,1	66,2	3,4	5,5	90,1	0,338	0,0076

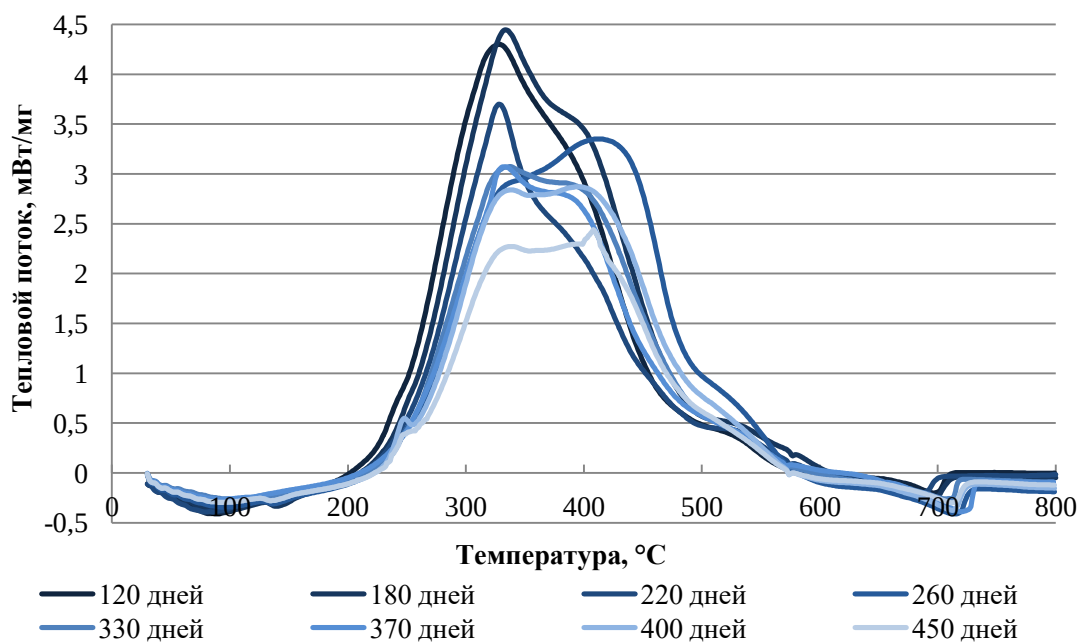


Рисунок 3.22 – ДСК-кривые для отходов объекта «В»

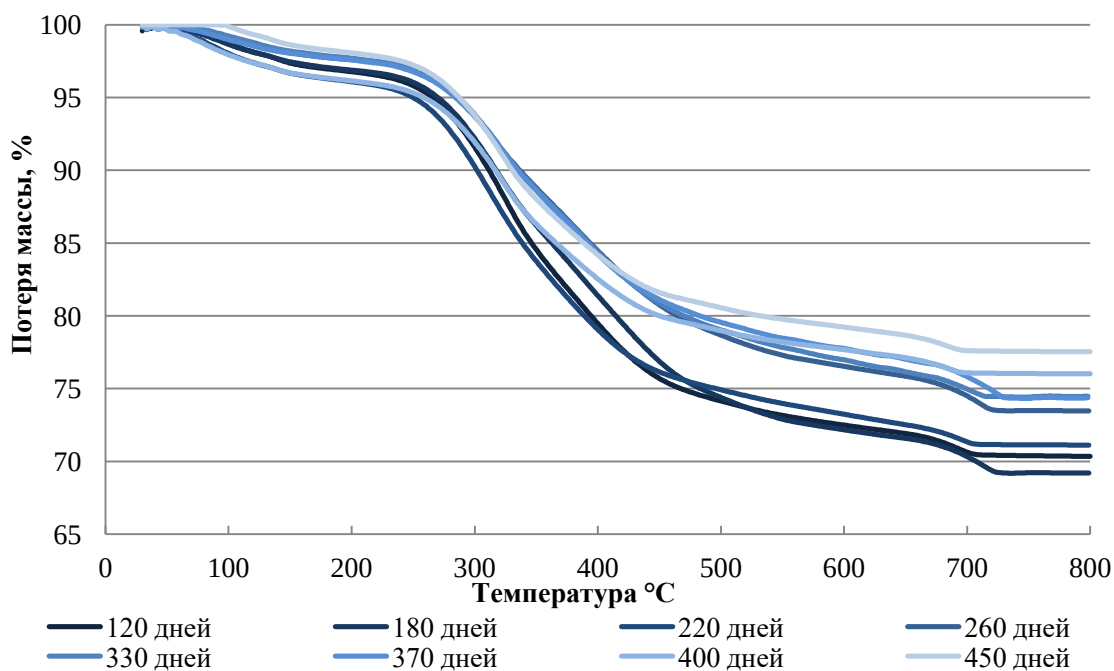


Рисунок 3.23 – ТГ-кривые для отходов объекта «В»

На основании анализа кривых ДСК и ТГ в среде воздуха было установлено, что интенсивность тепловых потоков и потеря массы при деструкции снижались в процессе лабораторного моделирования процесса разложения отходов. По кривым ДСК в среде воздуха было выявлено 2 экзотермических пика разложения органической составляющей отходов в интервале температур $T=280-550^{\circ}\text{C}$. Экзотермические пики в интервале температур $T=280-350^{\circ}\text{C}$ связаны с

окислительной деструкцией полимерных материалов (полипропилен, поликарбонат), резины, древесных отходов. Пики в интервале $T=380-450^{\circ}\text{C}$ характерны для полиамидов и ПЭТ.

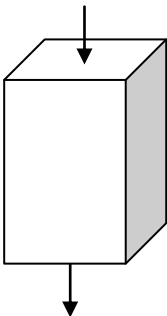
В результате анализа кривых ДСК выявлено смещение пиков начала горения образцов с увеличением дня эксперимента в более высокую область температур ($324,0^{\circ}\text{C}$, $328,0^{\circ}\text{C}$, $328,5^{\circ}\text{C}$, $335,0^{\circ}\text{C}$, $337,0^{\circ}\text{C}$, $340,0^{\circ}\text{C}$, $344,0^{\circ}\text{C}$, $344,5^{\circ}\text{C}$), что свидетельствует об увеличении степени разложения отходов. Эндотермические эффекты в области температур $T=650-720^{\circ}\text{C}$ характерны для разложения неорганической фракции отходов, минеральных солей (карбонатов кальция и магния и т.д.).

В процессе проведения лабораторного эксперимента отношение $\text{Э(СВ)}/\text{Э(ОСВ)}$ отходов снизилось до значений, позволяющих отнести отходы к стабильным [89].

По кривым ТГ определено, что основная потеря массы образцов отходов происходит в интервале температур $T=220-550^{\circ}\text{C}$, обусловленная термическим разложением органических веществ. Анализ полученных результатов позволил установить, что в процессе лабораторного моделирования отходов константа скорости разложения снижается с $K_{с.р}=0,009$ до $K_{с.р}=0,004$.

Результаты лабораторного моделирования процессов разложения отходов объекта «А»

Для определения коэффициента ускорения был произведен расчет количества добавляемой воды для отходов объекта «А».

Фрагмент полигона Осадки: 600 мм/год	Биореактор Оборотная вода 18,5 л/год
Площадь: 1 м^2 Высота: 6 м Плотность сух. в-ва: $0,75 \text{ мг/м}^3$ Выход фильтрата: 40% осадков=240 мм/год= 240 л/год 	Масса отходов: 15,6 кг (по сух. в-ву) 

Удельное годовое количество фильтрата (л/кг СВ)

$$\text{Полигон: } Q_{\text{СВ}} = \frac{240 \text{ л}}{6000 \text{ кг} \cdot \text{год}} = 0,04 \frac{\text{л}}{\text{кг} \cdot \text{год}}$$

$$\text{Биореактор: } Q_{\text{СВ}} = \frac{18,5 \text{ л}}{15,6 \text{ кг} \cdot \text{год}} = 1,18 \frac{\text{л}}{\text{кг} \cdot \text{год}}$$

$$\text{Коэффициент ускорения: } \frac{BP}{\text{полигон}} = \frac{1,18}{0,04} = 29,5$$

Сумма отведенного фильтрата: вода/тв.в-во = $Q_{\text{СВ}} \cdot t$ (л/кг СВ)

Разница во времени t до достижения соотношения вода/тв.в-ва (L/S)

1 л/кг СВ: $t = (W/F) / Q_{\text{СВ}}$.

$$\text{Полигон: } t = \frac{1 \frac{\text{л}}{\text{кг}} \cdot \text{сух.в-ва}}{0,04 \text{ л} / (\text{кг} \cdot \text{сух.в-ва} \cdot \text{год})} = 25,0 \text{ лет}$$

$$\text{Биореактор: } t = \frac{1 \frac{\text{л}}{\text{кг}} \cdot \text{сух.в-ва}}{1,18 \text{ л} / (\text{кг} \cdot \text{сух.в-ва} \cdot \text{год})} = 0,85 \text{ года}$$

На основании проведенных расчетов фактор ускорения процессов в биореакторах составил 29,5. Следовательно, 1 год моделирования процессов разложения отходов в биореакторах равен около 29 годам цикла полигона захоронения отходов. Объем добавляемой воды составлял 0,5 л. в неделю.

Результаты определения физико-химических, биохимических и термических параметров отходов объекта «А», изменяющихся в процессе ускоренного процесса разложения в биореакторах представлены в таблице 3.9.

Снижение значений ХПК водных вытяжек отходов (4800,4-1003,0 мгО₂/л) в процессе эксперимента свидетельствуют о замедлении процессов активного метаногенеза и переходе на стабильную фазу. Высокие значения аммонийного азота в отходах (10,5-12,4 г/кг) в начале эксперимента говорят о процессах биодеструкции легкоразлагаемых фракций с образованием жирных кислот, полисахаров, аминокислот, глицерина и т.д.

В процессе лабораторного эксперимента происходит снижение содержания органического углерода и увеличение показателя зольности в отходах в 2 раза, что говорит о протекающих процессах разложения отходов.

Результаты определения дыхательной активности отходов показали, что в процессе эксперимента происходит резкое снижение дыхательной активности (в 5 раз) и потенциала газообразования отходов (в 8 раз), что свидетельствует о снижении содержания органического вещества в отходах.

На рисунках 3.24 и 3.25 представлены кривые ДСК и ТГ для отходов объекта «А» в зависимости от дней эксперимента.

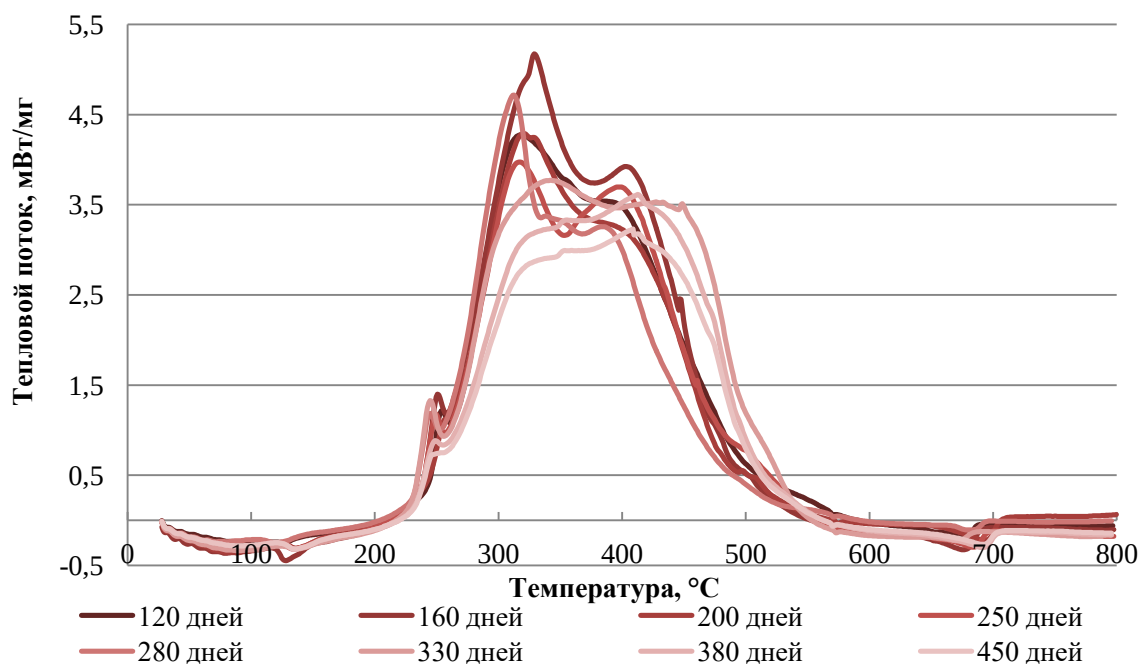


Рисунок 3.24 – ДСК-кривые для отходов объекта «А»

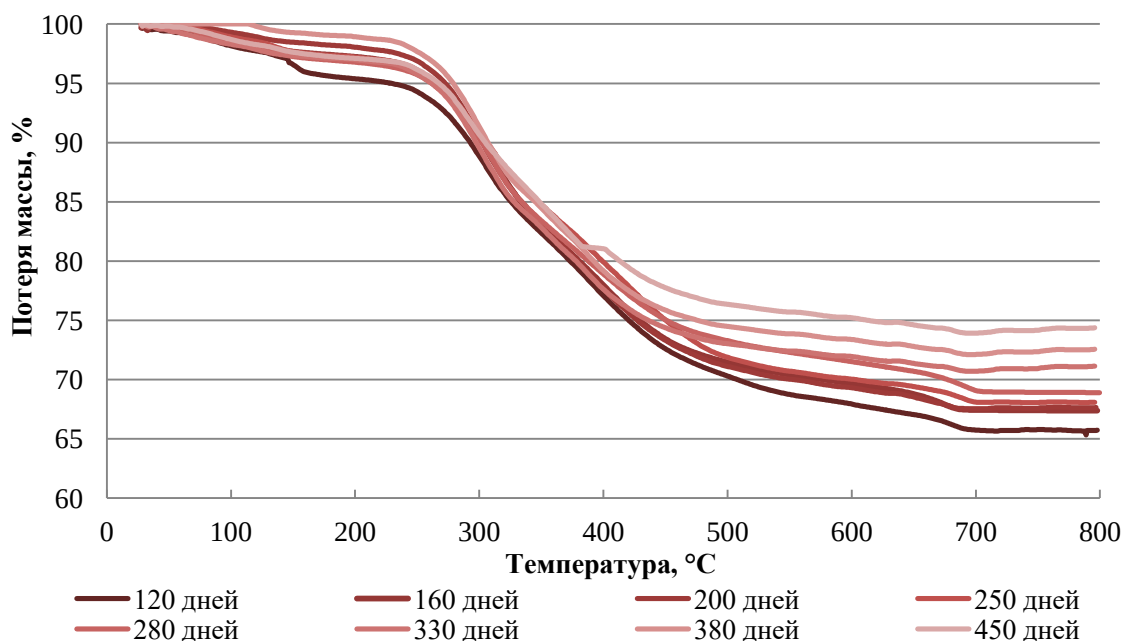


Рисунок 3.25 – ТГ-кривые для отходов объекта «А»

На основании анализа кривых ДСК и ТГ в среде воздуха было установлено, что интенсивность тепловых потоков и потеря массы снижались в процессе лабораторного моделирования процесса разложения отходов. По кривым ДСК в среде воздуха было выявлено 3 экзотермических пика разложения в интервале температур $T=240-430^{\circ}\text{C}$. Экзотермические острые пики в интервале температур $T=240-260^{\circ}\text{C}$ характерны для поливинилхлоридов, полистирола. Экзотермические пики в интервале температур $T=270-330^{\circ}\text{C}$ связаны с окислительной деструкцией полимерных материалов (полипропилен, поликарбонат), бумаги, картона, резины. Пики в интервале $T=340-430^{\circ}\text{C}$ характерны для полиамидов, ПЭТ, древесных отходов. Эндотермические эффекты в области температур $T=650-720^{\circ}\text{C}$ могут быть объяснены разложением минеральных солей: карбонатов кальция и т.д.

Выявлено смещение пиков начала горения образцов с увеличением возраста захоронения в более высокую область температур, что свидетельствует о процессах стабилизации отходов. В результате проведения лабораторного эксперимента отношение $\Delta(\text{CB})/\Delta(\text{OCB})$ отходов снизилось в 2 раза.

Кривые ТГ демонстрируют снижение потери массы образцов в процессе эксперимента, что также подтверждается снижением содержания органического вещества в отходах. В процессе лабораторного моделирования отходов константа скорости разложения отходов при $T=220-550^{\circ}\text{C}$ снижается с $K_{\text{с.р}}=0,02$ до $K_{\text{с.р}}=0,007$.

На основании результатов лабораторных исследований (для 2 объектов захоронения) были получены уравнения экспоненциальной зависимости индикаторных показателей от срока захоронения отходов.

По результатам термического анализа определено, что тенденции снижения значений отношения $\Delta(\text{CB})/\Delta(\text{OCB})$ и константы скорости разложения отходов, полученные в лабораторном эксперименте (с 2 объектов захоронения), схожи с тенденциями изменения данных показателей, полученными в полевом эксперименте (рисунок 3.26 и 3.27).

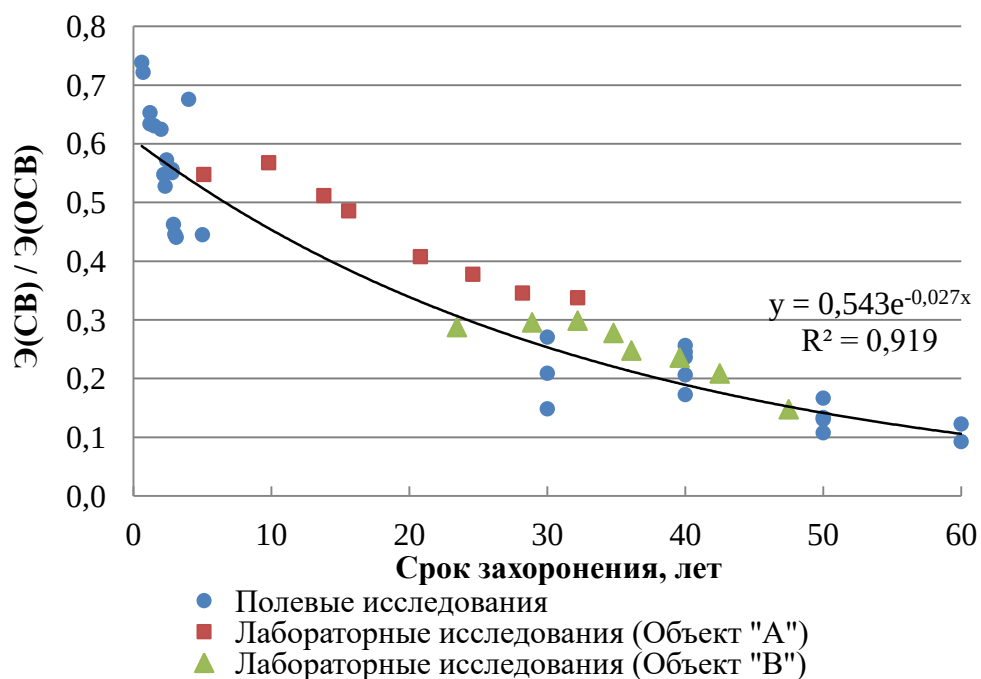


Рисунок 3.26 – Сравнение результатов отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ для полевых и лабораторных исследований отходов

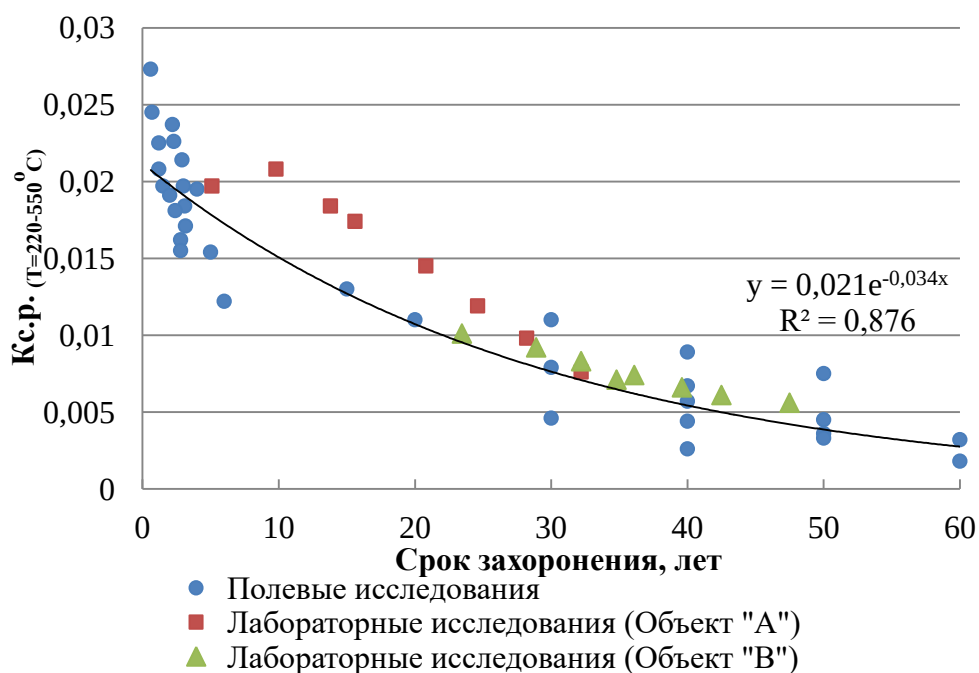


Рисунок 3.27 – Сравнение результатов константа скорости разложения для полевых и лабораторных исследований отходов

Сравнение полевых и лабораторных результатов исследований

Для подтверждения того, что полученные уравнения отношения СВ и ОСВ описывают один и тот же процесс, и относятся к одной генеральной совокупности данных. Для этого проводилось сравнение приведенных уравнений регрессии.

На основе имеющихся наблюдений проверялась нулевая гипотеза.

$H_0: y_1 = y_2$ – гипотеза о статистической неразличимости регрессий.

Проверка этой гипотезы включала последовательную проверку трех гипотез:

1) $H_0''': S_1^2 = S_2^2$ – гипотеза о равенстве остаточных дисперсий.

2) $H_0'': b_1 = b_2$ – гипотеза о неразличимости угловых коэффициентов

3) $H_0': a_1 = a_2$ – гипотеза о неразличимости свободных членов уравнений.

1) Проверка гипотезы $H_0''': S_1^2 = S_2^2$ (формула 3.3):

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1-2} \sum_{i=1}^{n_1} (y_{1i} - a_1 - b_1 x_{1i})^2; S_2^2 = \frac{1}{n_2-2} \sum_{i=1}^{n_2} (y_{2i} - a_2 - b_2 x_{2i})^2 \quad (3.3)$$

где n_1 и n_2 – объемы полевых и лабораторных данных;

y_{1i} – экспериментальные значения функции;

x_{1i} – значения срока захоронения отходов.

Для проверки гипотезы рассчитывается критерий Фишера $F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$.

2) Проверка гипотезы $H_0'': b_1 = b_2$: Рассчитывается критерий Стьюдента (формула 3.4):

$$t_b = \frac{b_1 - b_2}{S^* \sqrt{\frac{1}{(n_1-1)S_{\bar{x}_1}^2} + \frac{1}{(n_2-1)S_{\bar{x}_2}^2}}} \quad (3.4)$$

где $S_{\bar{x}_1}^2 = \frac{1}{n_1-1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_{1i} - \bar{x}_1)^2$; $S_{\bar{x}_2}^2 = \frac{1}{n_2-1} \sum_{i=1}^{n_2} (x_{2i} - \bar{x}_2)^2$ – дисперсии

величин времени;

$$S^* = \left\{ \frac{(n_1-2)S_{\bar{x}_1}^2 + (n_2-2)S_{\bar{x}_2}^2}{n_1+n_2-4} \right\}^{\frac{1}{2}} - \text{усредненное стандартное отклонение.}$$

3) Проверка гипотезы $H_0': a_1 = a_2$ (формула 3.5):

$$t_a = \frac{\bar{b} - \tilde{b}}{\tilde{s}} \quad (3.5)$$

где $\bar{b} = \frac{(n_1-1)S_{\bar{x}_1}^2 b_1 + (n_2-1)S_{\bar{x}_2}^2 b_2}{(n_1-2)S_{\bar{x}_1}^2 + (n_2-2)S_{\bar{x}_2}^2}$; $\tilde{b} = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}$;

$$\tilde{S} = S^* \left\{ \frac{1}{(n_1-2)S_{\bar{x}_1}^2 + (n_2-2)S_{\bar{x}_2}^2} + \frac{1}{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right\}.$$

Если все гипотезы H'_0, H''_0, H'''_0 принимаются, то сравниваемые регрессии признаются статистически неразличимыми.

1. Анализ регрессий при сравнении отношений энтальпии СВ и ОСВ.

Полевые исследования:

$$n_1=29; \bar{x}_1=21,3; S_{\bar{x}_1}^2=498,306; \bar{y}_1=-1,102;$$

$$\ln y = -0,489 - 0,029x; S_1^2=0,027.$$

Лабораторные исследования:

$$n_2=16; \bar{x}_2=27,197; S_{\bar{x}_2}^2=143,858; \bar{y}_2=-1,115;$$

$$\ln y = -0,308 - 0,0297x; S_2^2=0,013.$$

Нулевая гипотеза о равенстве остаточных дисперсий: $F=0,027/0,013=2,077$.

$F_\alpha(27, 14)=2,33$. Поскольку $F < F_\alpha$, то гипотеза о равенстве остаточных дисперсий принимается.

Проверка гипотезы о равенстве угловых коэффициентов регрессии:

$$b_1 = -0,029, b_2 = -0,0297;$$

$$S^*=19,424; t_b=0,0022; t_\alpha(0,05; 41)=1,96.$$

Поскольку $t_b < t_\alpha$, то принимается нулевая гипотеза о равенстве угловых коэффициентов регрессии.

Проверка гипотезы о равенстве свободных членов уравнения регрессии:

$$a_1=-0,489; a_2=-0,308; \bar{b}=-0,029; \tilde{b}=-0,002; \tilde{S}=-0,318;$$

$$t_a=0,085; t_\alpha(0,05; 41)=1,96.$$

Поскольку $t_a < t_\alpha$, то принимается нулевая гипотеза о равенстве свободных членов уравнения регрессии.

Таким образом, можно утверждать, что уравнения $y = 0,613e^{-0,029t}$ и $y = 0,735e^{-0,0297t}$ статистически неразличимы и описывают один и тот же процесс.

2. Анализ регрессий коэффициентов скорости разложения отходов.

Полевые исследования:

$$n_1=29; \bar{x}_1=21,3; S_{\bar{x}_1}^2=498,306; \bar{y}_1=-4,567;$$

$$\ln y = -3,831 - 0,035x ; S_1^2 = 0,083.$$

Лабораторные исследования:

$$n_2 = 16; \bar{x}_2 = 27,197; S_{\bar{x}_2}^2 = 143,858; \bar{y}_2 = -4,731;$$

$$\ln y = -3,466 - 0,047x; S_2^2 = 0,036.$$

Нулевая гипотеза о равенстве остаточных дисперсий: $F = 0,083/0,036 = 2,306$.

$F_\alpha(27, 14) = 2,33$. Поскольку $F < F_\alpha$, то гипотеза о равенстве остаточных дисперсий принимается.

Проверка гипотезы о равенстве угловых коэффициентов регрессии:

$$b_1 = -0,035; b_2 = -0,047.$$

$$S^* = 19,424; t_b = 0,0027; t_\alpha(0,05; 41) = 1,96.$$

Поскольку $t_b < t_\alpha$, то принимается нулевая гипотеза о равенстве угловых коэффициентов регрессии.

Проверка гипотезы о равенстве свободных членов уравнения регрессии:

$$a_1 = -3,831; a_2 = -3,466; \bar{b} = -0,037; \tilde{b} = -0,028; \tilde{S} = -0,318;$$

$$t_a = 0,028; t_\alpha(0,05; 41) = 1,96;$$

Поскольку $t_a < t_\alpha$, то принимается нулевая гипотеза о равенстве свободных членов уравнения регрессии.

Таким образом, можно утверждать, что уравнения: $y = 0,022e^{-0,035t}$ и $y = 0,031e^{-0,047t}$ статистически неразличимы и описывают один и тот же процесс.

Исследование деструкции отобранных отходов из массива полигона в модельной лабораторной установке в длительном эксперименте, дает возможность отследить, как меняются физико-химические, биохимические, термические параметры по мере увеличения степени разложения отходов. Результаты лабораторных исследований позволяют прогнозировать изменение показателей на разных этапах жизненного цикла полигона.

3.5. Оценка стабильности твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла полигона

По результатам проведенных анализов определения физико-химических, биохимических, термических параметров отходов разного срока захоронения была разработана методика комплексной оценки стабильности ТКО в массиве полигона на этапах жизненного цикла. Методика оценки стабильности ТКО предполагает установлении классов стабильности отходов, граничных значений индикаторных параметров стабильности и периодов их достижения. Установленные классы стабильности позволяют определить текущее состояние отходов в массиве полигона и выбрать технические мероприятия по управлению полигоном захоронения ТКО.

Предполагается разделить классы стабильности отходов на:

- **Высокореактивные отходы (В)**, т.е. отходы с высокими значениями индикаторных показателей стабильности. Для объектов захоронения отходов, содержащих данный класс отходов, необходимо применение технических мероприятий по снижению эмиссий загрязняющих веществ в объекты окружающей среды (создание систем активной дегазации полигона, сооружений по очистке фильтрата, организация системы мониторинга и т.д.)

- **Реактивные отходы (Р)**, являются переходным классом стабильности отходов. Для объектов захоронения отходов, содержащих данный класс отходов, требуется проведение мониторинговых исследований объектов окружающей среды, создание систем пассивной дегазации массива захоронения отходов, сооружений по очистке фильтрата до нормативных требований и т.д.

- **Стабильные отходы (С)**, т.е. отходы, находящиеся в стабильном состоянии, эмиссии загрязняющих веществ которых не превышают экологически приемлемый уровень и не оказывают негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Для объектов захоронения отходов, содержащих данный класс отходов, нет необходимости в мониторинге и проведении технических мероприятий по снижению эмиссий загрязняющих веществ в объекты окружающей среды.

Для определения граничных значений индикаторных показателей стабильности отходов, была установлена зависимость дыхательной активности и потенциала газообразования отходов. Данные биохимические параметры могут говорить о реакционной способности отходов и позволяют определить период, когда эмиссии в окружающую среду будут минимальными. Установленная зависимость дыхательной активности и потенциала газообразования отходов, представлена на рисунке 3.28.

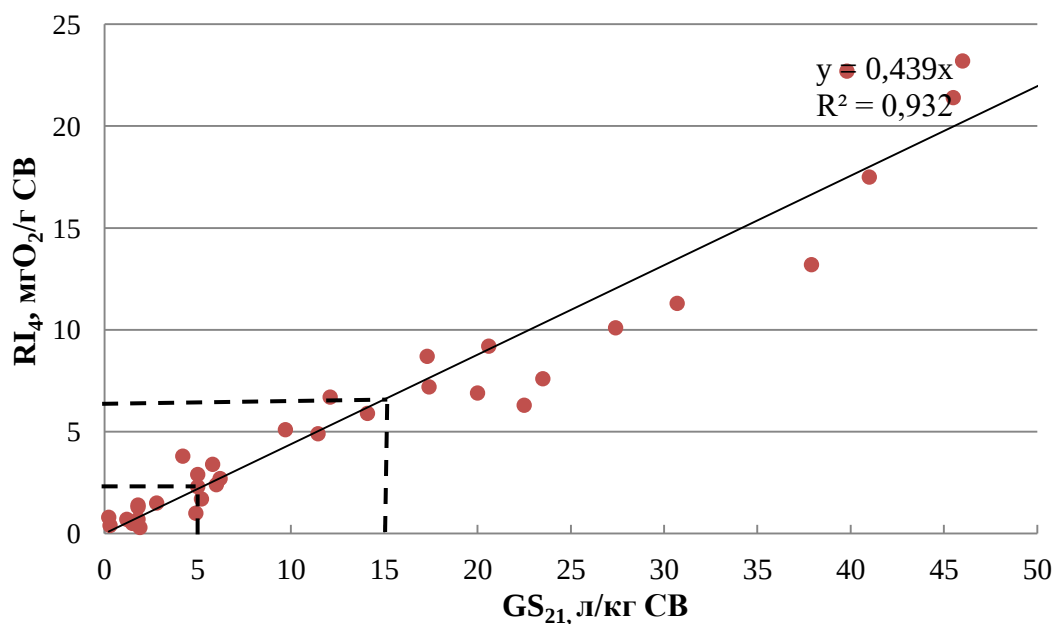


Рисунок 3.28 – Зависимость дыхательной активности и потенциала газообразования отходов

На основании полученных результатов определения дыхательной активности отходов и потенциала газообразования позволили установить граничные значения, при которых отходы могут считаться стабильными: $RI_4 \leq 2,0$ и $GS_{21} \leq 5,0$; выше данных значений отходы являются реактивными и могут оказывать негативное воздействие на объекты окружающей среды.

Вследствие того, что данные методы оценки стабильности отходов являются достаточно трудоемкими и длительными, предложено использовать СТА захороненных отходов.

Полученные в результате СТА значения отношения удельных энтальпий СВ/ОСВ сравнили со значениями дыхательной активности и значениями

потенциала газообразования отходов. Установленные зависимости отношения $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$ и дыхательной активности, потенциала газообразования отходов, представлены на рисунках 3.29а и 3.29б соответственно.

В таблице 3.10 представлено сравнение значений отношения удельных энтальпий СВ и ОСВ, дыхательной активности, потенциала газообразования отходов на основании которых можно определить стабильность образцов отходов.

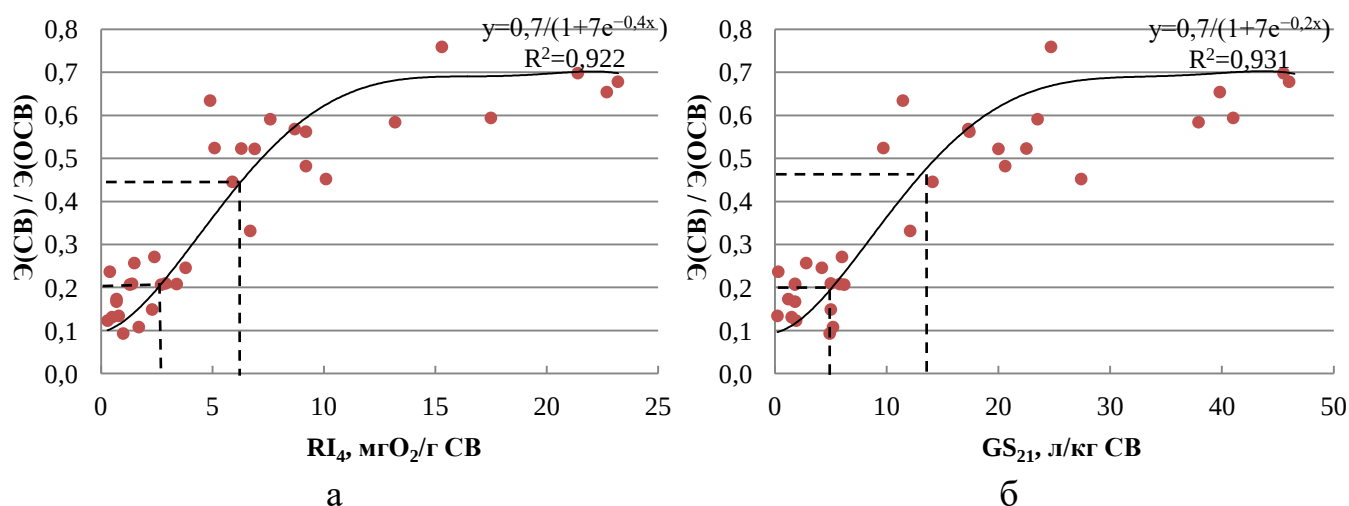


Рисунок 3.29 – Зависимость отношения удельных энтальпий СВ и ОСВ и
(а) дыхательной активности, (б) потенциала газообразования отходов

Таблица 3.10 – Сравнение значений отношения удельных энтальпий СВ и ОСВ, дыхательной активности, потенциала газообразования отходов

RI_4 , $\text{mgO}_2/\text{г CB}$	GS_{21} , л/кг CB	Отношение $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$
$>7,0$	$>15,0$	$>0,45$
$2,5-7,0$	$5,0-15,0$	$0,2-0,45$
$\leq 2,5$	$\leq 5,0$	$\leq 0,2$

По результатам сравнения данных показателей были установлены граничные значения отношения $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$. Для высокореактивных отходов отношение $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB}) > 0,45$; для реактивных отходов - $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB}) = 0,2-0,45$; для стабильных отходов - $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB}) < 0,2$.

Для установления граничных значений физико-химических параметров отходов (ХПК, БПК₅, общий и органический углерод) и периодов их достижения

были установлены зависимости относительно отношения $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$ (рисунок 3.30).

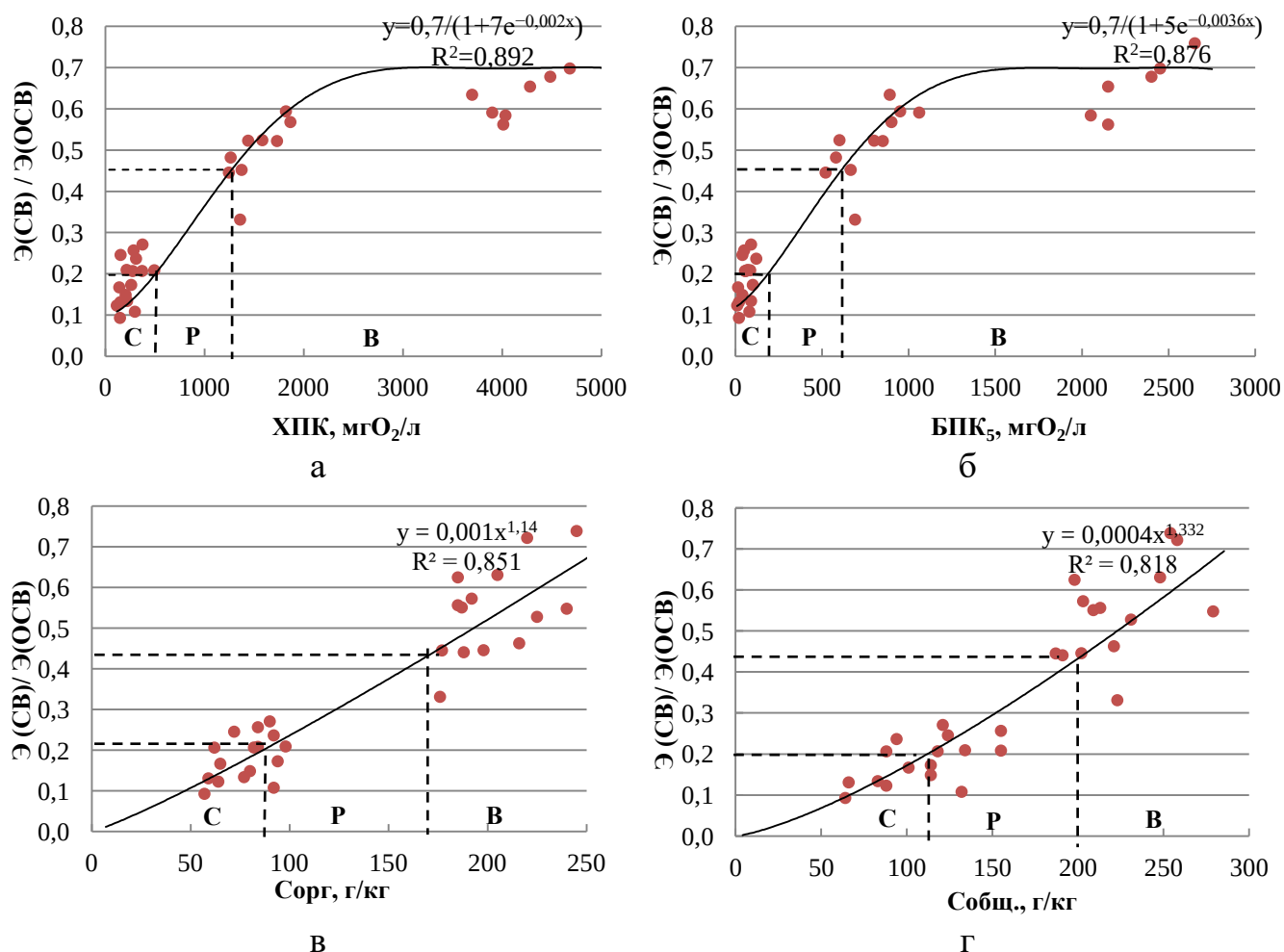


Рисунок 3.30 – Зависимость отношения $\mathcal{E}(\text{CB})$ и $\mathcal{E}(\text{OCB})$ и физико-химических параметров исследуемых образцов отходов: а - ХПК; б - БПК₅; в - органический углерод; г - общий углерод

Установлены граничные значения для найденной по кривым ТГ в среде воздуха константы скорости разложения отходов в интервале $T=220-550^\circ\text{C}$ (рисунок 3.31). Для высокореективных отходов константа скорости разложения $K_{с,р} > 0,017$; для реактивных отходов - $K_{с,р} = 0,007-0,017$; для стабильных отходов - $K_{с,р} < 0,007$.

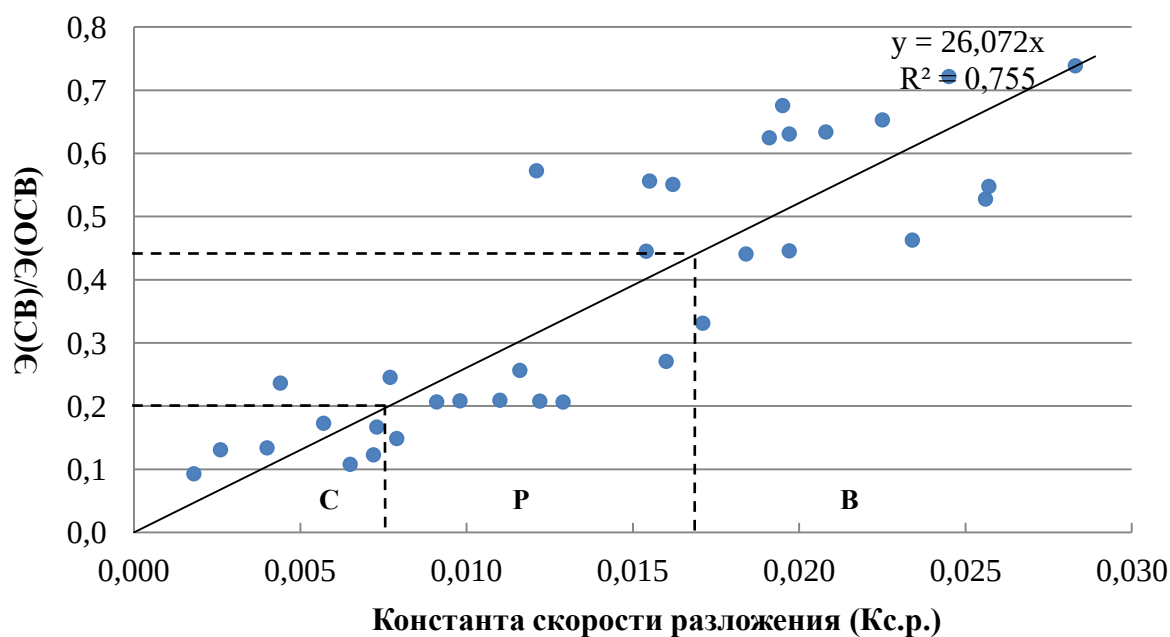


Рисунок 3.31 – Зависимость отношения Э(СВ) и Э(ОСВ) и константы скорости разложения отходов

Зная уравнение функций для индикаторных показателей стабильности отходов выразим неизвестную переменную и установим граничные значения.

Для уравнения линейной функции (формула 3.6):

$$x = \frac{y}{a} - b \quad (3.6)$$

Для уравнения экспоненциальной функций (формула 3.7):

$$x = \frac{1}{b} \ln \frac{y}{a} \quad (3.7)$$

Для уравнения логистической функции (формула 3.8):

$$x = \frac{1}{c} \ln \left(\frac{a-y}{by} \right) \quad (3.8)$$

где y - зависимая переменная, x – независимая переменная, a , b - параметры модели.

Полученные граничные значения по установленным индикаторным (основным) показателям оценки стабильности отходов и периоды их достижения по классам стабильности представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Граничные значения индикаторных показателей оценки стабильности отходов

Параметр	Классы стабильности отходов					
	Высокореактивные отходы		Реактивные отходы		Стабильные отходы	
	Значение	Срок захоронения, лет	Значение	Срок захоронения, лет	Значение	Срок захоронения, лет
ХПК, мгО ₂ /л	>1400	<12,0	500-1400	12-30	<500	>30
БПК ₅ , мгО ₂ /л	>650	<10,0	180-650	10-27	<180	>27
NH ₄ -N, г/кг СВ	>6,1	<4,0	1,4-6,1	4-25	<1,4	>25
N _{общ.} , г/кг СВ	>7,6	<4,0	3,5-7,6	4-45	<3,5	>45
Зольность, %	<55	<5,0	55-80	5-30	>80	>30
C _{орг.} , г/кг СВ	>185	<3,0	95-185	3-35	<95	>35
C _{общ.} , г/кг СВ	>210	<4,0	120-210	4-35	<120	>35
RI ₄ , мгО ₂ /г СВ	>7,0	<8,0	2,0-7,0	8-35	<2,0	>35
GS ₂₁ , л/кг СВ	>20	<8,0	5,0-20	8-35	<5,0	>35
Э(СВ)/Э(ОСВ)	>0,45	<10,0	0,2-0,45	10-35	<0,2	>35
K _{с.р.}	>0,017	<8,0	0,007-0,017	8-32	<0,007	>32

На основании проведенных исследований обоснована возможность использования метода СТА для определения стабильности отходов на этапах жизненного цикла полигона. Отношение Э(СВ)/Э(ОСВ) возможно использовать для установления класса стабильности отходов. На основании полученных результатов установлены классы стабильности для отходов объектов захоронения ТКО, расположенных в Пермском крае.

Анализ полученных результатов позволил установить, что образцы отходов, имеющие отношение удельных энтальпий СВ/ОСВ > 0,45, могут быть отнесены к классу высокореактивных. К данному классу относятся отходы объекта «А», эксплуатируемого участка объекта «Б» (возраст 1-6 лет).

Образцы отходов, имеющие отношение Э(СВ)/Э(ОСВ)=0,2-0,45, могут быть отнесены к классу реактивных отходов. К данному классу относятся отходы объекта «В», и рекультивированного участка объекта «Б» (возраст более 10 лет).

Образцы отходов, имеющие отношение Э(СВ)/Э(ОСВ)<0,2, характеризуются высокой степенью минерализации и могут быть отнесены к стабильным отходам. К данному классу относятся отходы объекта «Г» (возраст более 40 лет).

Полученные результаты оценки стабильности отходов разного срока захоронения могут быть использованы при разработке и выборе технических мероприятий для снижения негативного воздействия полигонов и свалок на объекты окружающей среды, при разработке технических решений по рекультивации, безопасному выводу из эксплуатации объектов захоронения отходов и сокращению сроков ассимиляции полигона окружающей средой.

Выводы по 3 главе:

1. Установлены зависимости термических параметров отходов от их физико-химических и биохимических параметров отходов разного срока захоронения. На этапах жизненного цикла объекта выявлены логистические зависимости отношения $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$ от показателя дыхательной активности, потенциала газообразования отходов, ХПК, БПК₅; экспоненциальные зависимости отношения $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$ от содержания общего и органического углерода, общего и аммонийного азота в отходах; линейные зависимости отношения $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$ от зольности и константы скорости разложения отходов.

2. Обоснована возможность использования СТА для определения стабильности отходов, захороненных на полигонах. Предложено оценивать стабильность отходов в массиве полигона по ряду термических параметров отходов: величине тепловых эффектов, температуре пиков тепловыделения, скорости потери массы, отношению $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$.

3. Анализ кривых ДСК и ТГ в среде воздуха позволил определить, что интенсивность тепловых потоков и потеря массы снижаются с увеличением срока захоронения отходов и стабильности отходов. На кривых ДСК наблюдается сдвиг температуры начала окисления отходов в интервале $T=300-330^{\circ}\text{C}$. По кривым ДСК в среде аргона выявлено смещение и увеличение интенсивности эндотермических пиков в интервале $T=620-800^{\circ}\text{C}$ с увеличением срока захоронения отходов, что объясняется разложением неорганических компонентов отходов и разложением карбоната кальция.

4. Разработана методика комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения с использованием метода СТА, предназначенная для геоэкологической оценки состояния полигонов захоронения ТКО на этапах жизненного цикла. По классам стабильности отходы предложено разделить на: высокореактивные отходы, реактивные отходы, стабильные отходы.

ГЛАВА 4. ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОГО УРОВНЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНА ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Выбор технического мероприятия по управлению полигоном захоронения отходов, которое должно соответствовать принципам устойчивого развития, необходимо осуществлять с учетом конечной цели: сокращение эмиссий биогаза и/или фильтрата, ускорение процессов стабилизации отходов, снижение воздействия полигона на геосферные оболочки на постэксплуатационном этапе и сокращение сроков ассимиляции полигона окружающей средой.

Сроки послеэксплуатационного обслуживания и мониторинга полигонов до достижения безопасных концентраций загрязняющих веществ для объектов окружающей среды могут составлять от десятков до двух сотен лет, что влечет за собой высокие затраты на обслуживание полигона как в период эксплуатации, так и после закрытия полигона. Приоритетом является ускоренная стабилизация захороненных отходов для минимизации эмиссий в объекты окружающую среду [119-121]. Это делает актуальным вопрос выбора технических мероприятий, которые позволяют снизить эмиссии загрязняющих веществ объектов захоронения ТКО на окружающую среду, подготовить объекты к выводу из эксплуатации, минимизировать воздействие уже выведенных из эксплуатации объектов.

Алгоритм выбора технических мероприятий по снижению эмиссий (рисунок 4.1) включал в себя следующие этапы: оценку технических мероприятий по снижению эмиссий (анализ существующих технических мероприятий по снижению эмиссий, установление критериев выбора технических мероприятий), комплексную оценку состояния объекта захоронения отходов (оценка параметров массива захоронения отходов, установление граничных условий их реализации для технических мероприятий), эколого-экономическую оценку (расчет предотвращенного экологического ущерба и платы за негативное воздействие на объекты окружающей среды при реализации технических мероприятий на объекте захоронения отходов).

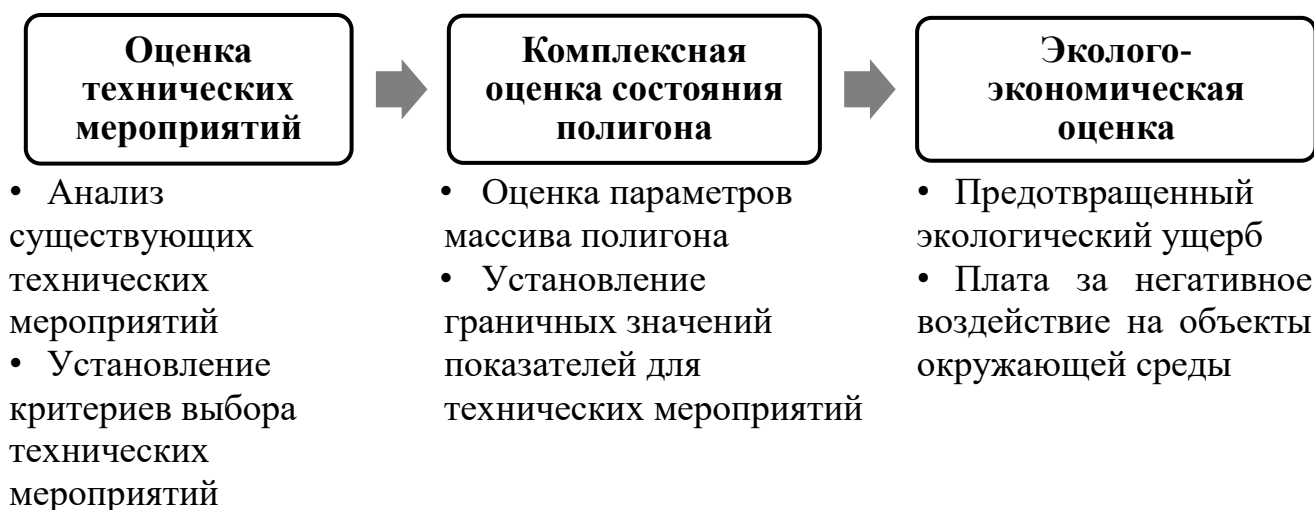


Рисунок 4.1 – Алгоритм выбора технических мероприятий по снижению эмиссий на полигонах захоронения отходов

4.1. Установление критериев выбора комплекса технических мероприятий по снижению эмиссий полигона

Анализ существующих технических мероприятий был проведен на основании аналитического обзора научно-технической информации и проектных решений по строительству полигонов захоронения ТКО в РФ и ЕС, и представлен в главе 1, разделе 1.4.

Для оценки были выбраны следующие технические мероприятия по снижению эмиссий на разных этапах жизненного цикла полигона захоронения отходов: интенсивное увлажнение массива полигона (управляемый анаэробный полигон), увлажнение массива полигона со сбором биогаза, принудительная аэрация массива полигона, устройство метаноокисляющих покрытий.

На основании результатов выполненной оценки технических мероприятий, используемых на разных этапах жизненного цикла полигона захоронения ТКО, предложены граничные условия использования того или иного технического мероприятия по снижению эмиссий (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Граничные условия внедрения технических мероприятий по снижению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона

Граничные значения	Технические мероприятия			
	Увлажнение массива полигона	Сбор биогаза	Аэрация массива полигона	Устройство метаноокисляющих покрытий
Этап жизненного цикла	Эксплуатационный	Эксплуатационный / Постэксплуатационный	Постэксплуатационный	Постэксплуатационный
Возраст объекта, лет	0-20	5-30	25-30	20-100
Климатические условия	Годовое кол-во осадков <1000 мм/год [57]	Годовое кол-во осадков >580 мм/год [57]	Инфильтрация 250 мм/год* [117]	Эвапотранспирация 450-550 мм/год** [127]
Температура ОС при проведении работ, °С	>0	>0	>0	5-40 [117]
Влажность отходов в массиве, %	не нарушает механической стабильности массива	55-80 [121]	40-50 [125]	30-35 [111]
Генерация метана, м ³ /ч	н/в	>60 [122]	≤25 [131]	≤25 [119]
Содержание метана в биогазе, %	н/в	>45 [122]	<45 [122]	<30 [128]
рН фильтрата полигона	6,8-7,4 [122]	6-8 [121]	6,8-7,4 [131]	н/в
ХПК фильтрата полигона, мгО ₂ /л	<12700 [122]	н/в	н/в	н/в
Температура отходов в массиве полигона, °С	25-40 [121]	25-40 [121]	20-60 [56]	25-35 [128]
Э(СВ)/Э(ОСВ) отходов массиве полигона	> 0,2	> 0,3	0,2-0,3	≤ 0,2
RI ₄ отходов массиве полигона, мгО ₂ /г СВ	н/в	н/в	>3,0 [131]	2,0-3,0 [128]
GS ₂₁ отходов в массиве полигона, л/кг СВ	н/в	н/в	>3,0 [131]	3,0-10,0 [128]
Наличие гидроизоляции основания	обязательно	н/в	обязательно	н/в
Наличие системы сбора и очистки фильтрата	обязательно	н/в	обязательно	н/в
Наличие системы сбора и утилизации биогаза	н/в	обязательно		н/в
Рекультивация закрытых участков	не требуется	в зависимости от системы сбора и отведения биогаза	необходима	является частью технического мероприятия

н/в – не влияет

*Разница между количеством атмосферных осадков и испарившейся влаги с массива полигона (с учетом конструкции верхнего покрытия)

**Суммарное испарение влаги с массива полигона (зависит от вида используемой растительности и в целом конструкции полигона)

Основными критериями для принятия решения о внедрении технических мероприятий по снижению эмиссий на полигонах является класс стабильности отхода, установленный по значению отношения $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB})$, параметры массива полигона (технология захоронения отходов, конструктивные особенности объекта), климатические условия территории, эмиссий биогаза и фильтрата, основные биохимические свойства отходов, наличие природоохранных сооружений на полигоне.

Определено, что реализацию технологии увлажнения массива полигона со сбором биогаза рекомендовано проводить при значении отношения $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB}) > 0,3$, технологию увлажнения массива полигона при $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB}) > 0,2$, аэрацию массива полигона при $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB}) = 0,2-0,3$, устройство метаноокисляющих покрытий при $\mathcal{E}(\text{CB})/\mathcal{E}(\text{OCB}) \leq 0,2$.

При использовании управляемого увлажнения массива полигона на этапе эксплуатации необходимо учитывать годовое количество осадков, которое должно быть менее 1000 мм/год [57]. Влажность отходов в массиве полигона должна поддерживаться на уровне, не нарушающем его механической стабильности. Обязательным условием для внедрения данного технического мероприятия является наличие гидроизоляционного основания полигона, систем сбора и очистки фильтрата, также необходим постоянный контроль физико-химических характеристик фильтрата (рН, ХПК, $N_{\text{общ}}$).

Целесообразность внедрение систем сбора биогаза на полигоне будет зависеть от объема генерации биогаза и содержания в нем метана, температуры окружающей среды при проведении работ, годового количество осадков, влажности отходов в массиве полигона и т.д.

Для применения аэрации массива полигона на завершающем этапе эксплуатации и на постэксплуатационном этапе жизненного цикла необходимо учитывать: климатические условия местности, в частности инфильтрацию осадков в массив полигона с обязательным учетом конструкции верхнего покрытия, объем генерации биогаза, биохимические параметры отходов (RI_4 ,

GS_{21}). Обязательным условием является наличие гидроизоляции основания полигона, сооружений по сбору и очистке (утилизации) фильтрата и биогаза.

Для применения метаноокисляющих покрытий на постэксплуатационном этапе жизненного цикла полигона необходимо учитывать величину эвапотранспирации с поверхности полигона, соблюдать граничные значения температуры проведения работ, эмиссий биогаза, биохимических параметров отходов (RI_4 , GS_{21}).

Анализ принципиальной возможности реализации технических мероприятий

Анализ принципиальной возможности реализации технических мероприятий по снижению эмиссий на объекте захоронения отходов заключается в сопоставлении параметров технических мероприятий с характеристиками объекта захоронения отходов по установленным критериям (рисунок 4.2).

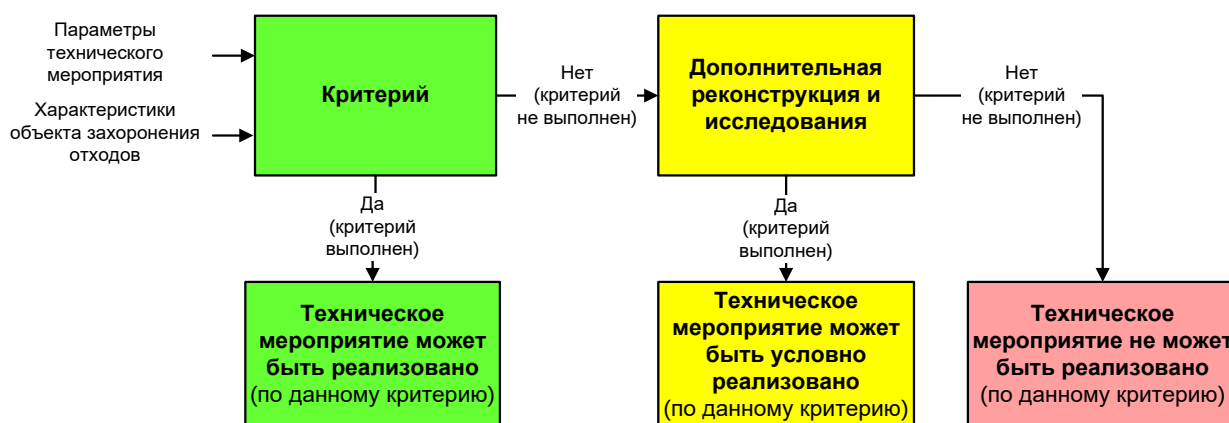


Рисунок 4.2 – Общая схема выполнения анализа

принципиальной возможности реализации технических мероприятий

По каждому критерию оценки технического мероприятия возможно три «уровня соответствия» характеристик объектов захоронения отходов параметрам технического мероприятия:

- критерий выполняется полностью - техническое мероприятие может быть реализовано (по данному критерию) - зеленый блок;
- критерий выполняется частично или при соблюдении дополнительных условий (выполнение дополнительных исследований, устройство

необходимых сооружений или реконструкция имеющихся сооружений и т.п.) - техническое мероприятие условно может быть реализовано (по данному критерию) - желтый блок;

- критерий не выполняется ни при каких условиях - техническое мероприятие не может быть реализовано - красный блок.

В результате анализа такого соответствия по установленным критериям может быть сделан вывод о возможности/ невозможности реализации рассматриваемых технических мероприятий на объектах захоронения отходов. Технологические мероприятия, не удовлетворяющие хотя бы одному критерию (получившие хотя бы один «красный блок»), не могут быть реализованы на объекте захоронения отходов. Преимуществом будут обладать технические мероприятия имеющие большее число зеленых блоков.

По результатам анализа принципиальной возможности реализации технических мероприятий по снижению эмиссий формируется перечень технических мероприятий, применимых для определенного объекта захоронения отходов.

Результаты оценки технических мероприятий по снижению эмиссий были апробированы для исследуемых объектов захоронения отходов. Для выбора технических мероприятий по снижению эмиссий на исследуемых объектах захоронения отходов были оценены значения критериев массива захоронения отходов (таблица 4.2).

Апробация подхода представлена для результатов анализа технических мероприятий по снижению эмиссий для объекта захоронения отходов, расположенного в Пермском крае (таблица 4.3). Полигон захоронения ТКО эксплуатируется с 2008 года, оценка полигона произведена на момент отбора проб отходов (2013 г.). Общая площадь объекта составляет 10,6 га, ежегодный объем захоронения отходов составляет 80-100 тыс. тонн. На объекте эксплуатируется четыре рабочие карты, одна из карт закрыта для приема отходов и находится на стадии временной рекультивации.

Таблица 4.2 – Значения критериев выбора технических мероприятий по снижению эмиссий для исследуемых объектов захоронения отходов

Критерии	Объекты захоронения отходов					
	Объект «А»	Эксплуатируемый участок объекта «Б»	Объект «Д»	Объект «В»	Рекультивированный участок объекта «Б»	Объект «Г»
Этап жизненного цикла	Эксплуатационный	Эксплуатационный	Эксплуатационный	Постэксплуатационный	Постэксплуатационный	Постэксплуатационный
Возраст объекта, лет	5 лет	6 лет	10 лет	30 лет	45 лет	60 лет
Климатические условия	610 мм.рт.ст.	600 мм.рт.ст.	515 мм.рт.ст.	610 мм.рт.ст.	600 мм.рт.ст.	650 мм.рт.ст.
Влажность отходов в массиве, %	55-60	50-55	55-65	40-45	35-40	30-40
Генерация метана, м ³ /ч	80-110	65-100	60-90	15-25	10-15	2-5
Содержание метана в биогазе, %	50-60	45-55	45-55	35-50	30-35	25-35
рН фильтрата полигона	7,2	Сложность отбора проб, система сбора фильтрата отсутствует				
ХПК фильтрата полигона, мгО ₂ /л	8235,2					
Температура отходов в массиве полигона, °С	40-45	35-40	35-40	30-35	35-40	25-30
Э(СВ)/Э(ОСВ) отходов в массиве полигона	0,51-0,74	0,42-0,65	0,33-0,63	0,14-0,26	0,11-0,18	0,07-0,12
RI ₄ отходов массиве полигона, мгО ₂ /г СВ	27,2-46,0	17,3-31,0	14,2-18,4	1,4-3,8	0,8-1,7	0,3-1,5
GS ₂₁ отходов в массиве полигона, л/кг СВ	21,2-45,5	17,1-41,0	11,7-23,8	2,5-6,2	1,2-5,2	1,1-4,9
Наличие гидроизоляции основания	имеется	нет	нет	нет	нет	нет
Наличие системы сбора и очистки фильтрата	имеется	нет	нет	нет	нет	нет
Наличие системы сбора и утилизации биогаза	нет	нет	нет	нет	нет	нет
Рекультивация закрытых участков	нет	нет	нет	да	да	да

Таблица 4.3 – Результаты оценки технических мероприятий по снижению эмиссий (на примере объекта захоронения ТКО, Пермский край) на соответствие критериям

Критерии	Значение	Технические мероприятия			
		Увлажнение массива полигона	Сбор биогаза	Аэрация массива полигона	Устройство метаноокисляющих покрытий
Этап жизненного цикла	Эксплуатационный	удовл.	удовл.	не удовл.	не удовл.
Возраст объекта, лет	5 лет	удовл.	удовл.	не удовл.	не удовл.
Климатические условия	610 мм.рт.ст.	удовл.	удовл.	удовл.	не удовл.
Влажность отходов в массиве, %	55-60	удовл.	удовл.	удовл.	не удовл.
Генерация метана, м ³ /ч	80-110	н/в	удовл.	не удовл.	не удовл.
Содержание метана в биогазе, %	50-60	н/в	удовл.	не удовл.	не удовл.
pH фильтрата полигона	7,2	удовл.	удовл.	удовл.	н/в
ХПК фильтрата полигона, мгО ₂ /л	8235,2	удовл.	н/в	н/в	н/в
Температура отходов в массиве полигона, °С	40-45	удовл.	удовл.	удовл.	не удовл.
Э(СВ)/Э(ОСВ) отходов массиве полигона	0,51-0,74	удовл.	удовл.	не удовл.	не удовл.
RI ₄ отходов массиве полигона, мгО ₂ /г СВ	27,2-46,0	н/в	н/в	не удовл.	не удовл.
GS ₂₁ отходов в массиве полигона, л/кг СВ	21,2-45,5	н/в	н/в	не удовл.	не удовл.
Наличие гидроизоляции основания	имеется	удовл.	н/в	удовл.	н/в
Наличие системы сбора и очистки фильтрата	имеется	условно удовл.	н/в	условно удовл.	н/в
Наличие системы сбора и утилизации биогаза	нет	н/в	условно удовл.	условно удовл.	н/в
Рекультивация закрытых участков	нет	удовл.	условно удовл.	не удовл.	не удовл.

*удовл. – удовлетворяет;

условно удовл. – условно удовлетворяет;

не удовл. – не удовлетворяет;

н/в – не влияет.

Сопоставление данных о текущем состоянии объекта и граничных условий о возможности внедрения различных технических мероприятий по минимизации воздействия объекта на окружающую среду позволили установить, что на исследуемом объекте захоронения отходов в настоящее время можно рекомендовать внедрение следующих технических мероприятий: увлажнение массива полигона водой, рециркуляции фильтрата (необходима реконструкция имеющихся сооружений по сбору и очистке фильтрата), технология сбора биогаза. Увлажнение массива отходов и интенсификация образования биогаза позволит добиться ускоренной стабилизации отходов в массиве захоронения, тем

самым сократить срок и объемы образования эмиссий после вывода объекта из эксплуатации. Учитывая, что закрытая рабочая карта объекта была выведена из эксплуатации относительно недавно, процессы разложения отходов в массиве карты идут интенсивно.

Аналогичная оценка технических мероприятий была выполнена для всех исследуемых объектов захоронения отходов.

По результатам анализа технических мероприятий по снижению эмиссий были предложены варианты технических мероприятий по снижению эмиссий для исследуемых объектов захоронения отходов (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Рекомендованные технические мероприятия по снижению эмиссий для исследуемых объектов захоронения отходов

Объект захоронения отходов	Этап жизненного цикла	Возраст отходов, лет	Э(СВ)/Э(ОСВ)	Техническое мероприятие
Объект «А»	Эксплуатационный	1-5	0,44-0,72	Увлажнение массива полигона водой (рециркуляция фильтрата) Сбор биогаза
Объект «Д»	Эксплуатационный	5-10	0,4-0,65	Сбор биогаза
Объект «Б»	Эксплуатационный	2-6	0,33-0,66	Сбор биогаза
	Постэксплуатационный	30-45	0,1-0,2	Устройство метаноокисляющих покрытий
Объект «В»	Постэксплуатационный	30-40	0,15-0,26	
Объект «Г»	Постэксплуатационный	50-60	0,09-0,13	

Для эксплуатируемых объектов захоронения отходов: объекта «А», объекта «Д», эксплуатируемого участка объекта «Б», отходы которых относятся к классу высокореактивных и реактивных отходов, может быть применена технология сбора биогаза. Расчет экономической целесообразности применения данного технического мероприятия по снижению эмиссий на объектах захоронения отходов должен производиться для каждого полигона индивидуально.

Увлажнение массива полигона может быть рекомендовано только для объекта «А», у остальных объектов захоронения отходов отсутствует гидроизоляция основания, нет природоохранных сооружений по сбору и очистке

фильтрата. Для рекультивированных и закрытых объектов захоронения отходов: объекта «В», рекультивированного участка объекта «Б» и объекта «Г» рекомендовано устройство верхнего метанооксиляющего покрытия. Аэрация массива полигона не возможна на данных объектах захоронения отходов из-за отсутствия гидроизоляции основания, природоохранных сооружений по сбору фильтрата и биогаза.

Обязательным условием внедрения технических мероприятий по снижению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона является проведение мониторинга объектов окружающей среды, оценка текущих и прогнозируемых долгосрочных эмиссий, риски, возможные при реализации технических мероприятий и т.д.

4.2. Эколого-экономическая оценка технических мероприятий по минимизации воздействия твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла полигона

4.2.1. Оценка объемов образования эмиссий биогаза и фильтрата на полигонах захоронения твердых коммунальных отходов

Оценка эмиссий биогаза на полигонах захоронения отходов

Для расчета газообразования на полигонах захоронения ТКО использована модель разложения 1-го порядка Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC).

Многофазная модель разложения 1-го порядка МГЭИК/IPCC [143] разработана группой международных экспертов МГЭИК по изменению климата для подготовки национальных отчетов о выбросах парниковых газов на полигонах захоронения ТКО и считается на сегодняшний день наиболее универсальной моделью. В модели различается несколько типов отходов с индивидуальными константами разложения k_j и различным содержанием биологически разлагаемого углерода (DOC_j), а также используются поправочные коэффициенты для учета окисления метана в поверхностном слое. Преимуществом модели является возможность учета состава отходов,

климатических условий в разных странах, и, в некоторой степени, особенностей эксплуатации полигона.

Согласно модели, выход метана зависит от остаточного количества разлагаемых отходов (формула 4.1):

$$ME_{CH_4,y} = (1 - OX) \cdot 16/12 \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^y \sum_{j=1}^J W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot (e^{-k(y-x)} \cdot (1 - e^{-k_j})) \quad (4.1)$$

где

$ME_{CH_4,y}$ - эмиссия метана с поверхности полигона в год y , т/год;

OX - коэффициент окисления метана в поверхностном слое ($OX=0,1$);

MCF - поправочный коэффициент образования метана, определяющий долю ТКО, находящихся в анаэробных условиях ($MCF=0,4$);

DOC_f - доля биологически разлагаемого углерода;

x - годы захоронения отходов на полигоне (от $x=1$ до $x=y$);

$W_{j,x}$ - количество отходов категории j , вывезенное на полигон в год x , т;

k - скорость образования метана, год⁻¹;

F - содержание метана в биогазе (50 % об.);

i - 1-годовой (j - 0.1-годовой) отрезок времени;

Для расчета потенциала метанообразования использовались данные натурных исследований морфологического состава ТКО г. Перми [144]. Коэффициенты DOC_j и k_j зависят от типа отходов (быстро-, средне- или медленноразлагающиеся отходы) и климата страны (среднегодовой температуры окружающего воздуха (СГО) и соотношения среднегодового уровня осадков и потенциальной эвапотранспирации (ПЭ)). Коэффициенты DOC_j и коэффициенты k_j для влажного умеренного климата ($СГО/ПЭ > 1$, $СГТ \leq 20^\circ\text{C}$) приняты как рекомендуемые для расчета моделью газообразования IPCC. Подкатегории отходов «Подгузники», «Прочее», «Мелкая фракция» содержат биоразлагаемую фракцию, которая не может быть однозначно классифицирована по методике IPCC. Для учета данных подкатегорий был введен тип отходов «Другое» с предполагаемым содержанием органического углерода 10% и скоростью разложения, приравненной к среднеразлагаемым отходам. Оценка содержания

органической фракции и биоразлагаемого углерода в исходных ТКО приведена в таблица 4.5.

Таблица 4.5 – Содержание органически разлагаемых компонентов в вывозимых на полигон отходах [143]

Тип отходов	% ВВ	DOC _j , (%ВВ)	k, 1/год
<i>Быстроразлагаемые</i> (пищевые отходы)	7,0	15	0,185
<i>Среднеразлагаемые</i> (садово-парковые отходы, отсев)	12,9	20	0,1
<i>Медленноразлагаемые:</i>			
- бумага, картон	22,8	40	0,06
- текстиль	5,0	24	0,06
- древесина	1,3	43	0,03

Эмиссия метана с поверхности полигона рассчитана для следующих вариантов технических мероприятий по минимизации эмиссий на эксплуатационном и постэксплуатационном этапах жизненного цикла полигона захоронения отходов:

1. Традиционный полигон (полигон захоронения отходов со стандартным набором защитных сооружений);
2. Управляемый анаэробный полигон, предполагает рециркуляцию фильтрата или увлажнение массива водой;
3. Управляемый анаэробный полигон (со сбором биогаза);
4. Аэрация массива полигона (в течение 5 лет после закрытия полигона);
5. Устройство метаноокисляющих покрытий (через 30 лет после закрытия полигона).

На рисунке 4.3 представлена динамика образования метана при внедрении разных вариантов технических мероприятий на эксплуатационном и постэксплуатационном этапах жизненного цикла полигона захоронения отходов.

В таблице 4.6 представлена оценка образования эмиссий метана при разных вариантах внедрения технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона в сравнении с традиционным полигоном.

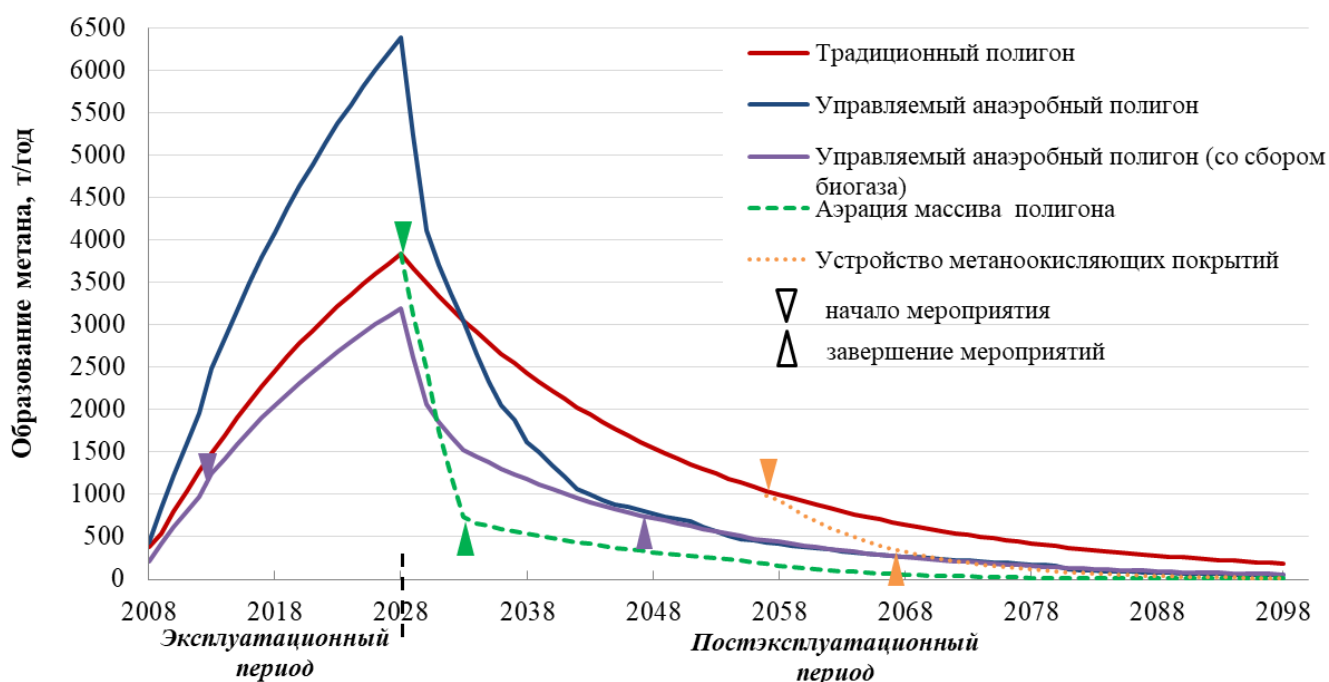


Рисунок 4.3 – Динамика образования метана при разных вариантах эксплуатации и постэксплуатации полигона захоронения отходов

На традиционном полигоне захоронения отходов (полигон со стандартным набором защитных сооружений) образование биогаза и его воздействие на окружающую среду происходит на всех этапах жизненного цикла полигона, на постэксплуатационном этапе эмиссии метана составляют около 60%. Срок достижения 90% эмиссий метана в атмосферный воздух составляет 65 лет.

Эксплуатация полигона захоронения отходов как управляемого анаэробного биореактора позволяет увеличить выход эмиссий биогаза на стадии эксплуатации (около 60%), что в свою очередь приводит к снижению эмиссий на постэксплуатационном этапе, снижается суммарный срок эмиссий биогаза до 40 лет. Увлажнение массива полигона со сбором биогаза позволит снизить эмиссий в сравнении с традиционным полигоном на 20% за период эксплуатации и на 50% на постэксплуатационном этапе жизненного цикла полигона.

Внедрение аэрации массива полигона на постэксплуатационном этапе (в течение 5 лет после закрытия полигона) позволит снизить эмиссии метана на 70% в сравнении с эксплуатацией традиционного полигона. Результаты проведенного моделирования показали, что 90% эмиссий метана выделятся в атмосферу в течение 34 лет.

Таблица 4.6 – Оценка образования эмиссий метана при разных вариантах внедрения технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона захоронения отходов

Параметры	Традиционный полигон	Управляемый анаэробный полигон	Управляемый анаэробный полигон (сбор биогаза)	Аэрация массива полигона	Метаноокисляющие покрытия
Суммарное образование метана на этапах жизненного цикла полигона, тыс.т.	133,49	133,49	79,39	68,92	118,33
Образование метана на эксплуатационном этапе, тыс. т.	48,59	80,32	40,16	48,59	48,59
Эмиссий метана на эксплуатационном этапе, %	36,40	60,17	50,58	70,36	40,98
Образование метана на постэксплуатационном этапе, тыс.т.	73,23	55,66	37,42	23,55	70,64
Эмиссий метана на постэксплуатационном этапе, %	60,90	39,83	49,12	29,64	59,02
Уменьшение эмиссии метана в сравнении с традиционным полигоном, тыс.т.	-	17,57	35,81	49,68	2,58
Срок достижения 90% эмиссий метана, лет	65	40	40	34	48

Устройство метаноокисляющих покрытий на постэксплуатационном этапе жизненного цикла полигона через 30 лет после закрытия, когда эмиссии метана достигнут приемлемого уровня, позволит снизить остаточные эмиссии метана на 15% в сравнении с традиционным полигоном. Суммарный срок эмиссий метана снижается с 65 до 53 лет.

Расчет рассеивания метана на полигоне захоронения отходов

Для расчета рассеивания метана, образующегося на полигоне, при разных вариантах внедрения технических мероприятий была использована программа УПРЗА - Эколог (версия 4.5 Фирма «ИНТЕГРАЛ»), реализующаяся в соответствии с «Методами расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух» (МРР-2017) (утв. приказом МПР России 273 от 06.06.2017).

В соответствии с МРР-2017 принято, что зоной влияния объекта на атмосферный воздух считается территория, на которой суммарное загрязнение атмосферы от всей совокупности источников выбросов объекта превышает 0,05 ПДК. При $\text{ПДК} \leq 0,05$ загрязняющее вещество в атмосферном воздухе не оказывает воздействие на среду обитания и здоровье человека.

Расчет рассеивания выбросов метана в атмосферный воздух при внедрении технических мероприятий выполнен для этапов жизненного цикла полигона без учета фона: завершение эксплуатации полигона (20 лет), постэксплуатационный этап (40 лет), завершение постэксплуатационного этапа (60 лет).

По результатам расчета рассеивания получены значения ПДК метана в границах полигона и на границе СЗЗ (500 м) (таблица 4.7), и зоны влияния выброса метана, попадающего в окружающую среду при внедрении разных вариантов технических мероприятий на полигоне (таблица 4.8).

Таблица 4.7 – Результаты расчета ПДК метана при внедрении технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона

Этап жизненного цикла	Доли ПДК									
	Традиционный полигон		Управляемый анаэробный полигон		Управляемый анаэробный полигон (сбор биогаза)		Аэрация массива полигона		Метаноокисляющие покрытия	
	В границах полигона	На границе СЗЗ	В границах полигона	На границе СЗЗ	В границах полигона	На границе СЗЗ	В границах полигона	На границе СЗЗ	В границах полигона	На границе СЗЗ
Завершение эксплуатационного этапа (20 лет)	0,8	0,2	1,0	0,2	0,7	0,1	Подготовка мероприятия		Не используется	
Постэксплуатационный этап (40 лет)	0,5	0,1	0,2	0,08	0,2	0,08	0,1	0,05	Подготовка мероприятия	
Пассивный постэксплуатационный этап (60 лет)	0,1	0,04	0,05	0,02	0,05	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02

Таблица 4.8 – Зона влияния выброса метана при внедрении технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона

Этап жизненного цикла	Зона влияния, м									
	Традиционный полигон		Управляемый анаэробный полигон		Управляемый анаэробный полигон (сбор биогаза)		Аэрация массива полигона		Метаноокисляющие покрытия	
	0,1 ПДК	0,05 ПДК	0,1 ПДК	0,05 ПДК	0,1 ПДК	0,05 ПДК	0,1 ПДК	0,05 ПДК	0,1 ПДК	0,05 ПДК
Завершение эксплуатационного этапа (20 лет)	758	1325	1174	1834	666	1168	Подготовка мероприятия		Не используется	
Постэксплуатационный этап (40 лет)	392	798	228	423	205	392	68	252	Подготовка мероприятия	
Пассивный постэксплуатационный этап (60 лет)	162	368	0	146	0	138	0	0	0	216

На основании полученных данных было установлено, что внедрение технологии сбора биогаза на полигоне после окончания его эксплуатации (возраст объекта 20 лет) в сравнении с полигоном с традиционным полигоном позволит снизить ПДК метана с 0,8 до 0,7 ПДК в границах полигона и с 0,2 до 0,1 ПДК на границе СЗЗ, уменьшить зону влияния метана с 1325 м до 1168 м. На постэксплуатационном этапе полигона (возраст объекта 40 лет) технология сбора биогаза позволит снизить ПДК метана с 0,5 до 0,2 ПДК в границе полигона, уменьшить зону влияния метана до 392 м (до границ СЗЗ). Аэрации массива отходов на этапе постэксплуатации позволит снизить ПДК метана до 0,1 ПДК на границе полигона и до 0,05 ПДК на границе СЗЗ, уменьшить зону влияния метана до 252 м.

Устройство метанооксиляющих покрытий на этапе пассивной постэксплуатации полигона (возраст объекта 60 лет) позволит снизить ПДК метана с 0,1 до 0,05 ПДК в границах полигона, уменьшить зону влияния метана до 216 м. Аэрация массива полигона на данном этапе позволит добиться минимальных значений ПДК метана в границах полигона (0,02 ПДК) и нулевой зоны влияния метана.

Оценка объемов образования фильтрата на полигонах захоронения отходов

Объем фильтрата зависит от многих факторов: исходной влажности отходов, их пористости, плотности, количества осадков, выпадающих над рабочим телом полигона, их проникновения вглубь отходов, испаряемости и др. [57, 145]. При оценке объема образующегося фильтрата необходимо учитывать входящие (поступление воды) и выходящие (потери) потоки воды с полигона.

Расчет количества образуемого фильтрата рассчитывался в соответствии с методикой расчета водного баланса полигонов захоронения отходов [146].

Объем фильтрата (Q_{ϕ}) определялся по формуле 4.2:

$$Q_{\phi} = (AO - IC - PC - Q_{п} - \Phi_{п}) * S * 0,001 \quad (4.2)$$

где

$Q_{\text{ф}}$ – объем фильтрата, $\text{м}^3/\text{год}$;

AO – атмосферные осадки (700 мм/год);

$ИС$ – испаряемость (300 мм/год);

$ПС$ – поверхностный сток (0 мм/год);

$O_{\text{п}}$ – поглощение воды отходами (150 мм/год);

$\Phi_{\text{п}}$ – утечка через защитный экран (0 мм/год);

S – площадь рабочего тела полигона ($13,00 \text{ га}$ или 130000 м^2).

На рисунке 4.4 представлен объем образования фильтрата при внедрении разных вариантов технических мероприятий по минимизации эмиссий на эксплуатационном и постэксплуатационном этапах жизненного цикла полигона захоронения отходов.

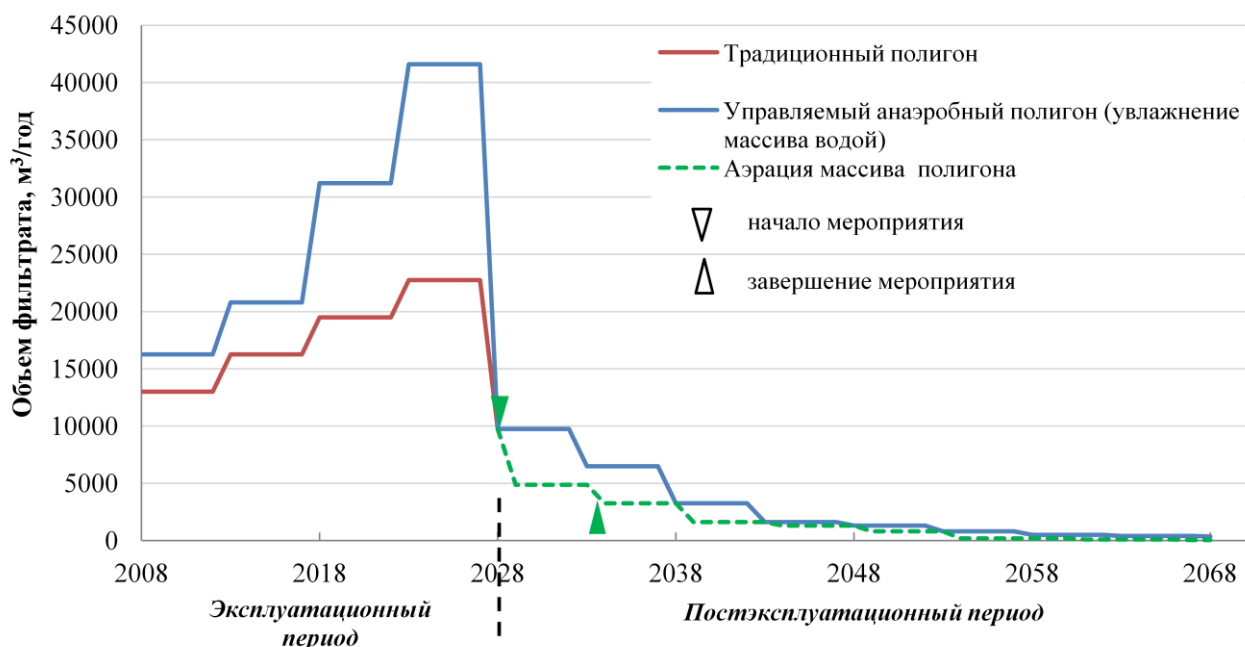


Рисунок 4.4 – Объем образования фильтрата при разных вариантах эксплуатации и постэксплуатации полигона захоронения отходов

В таблице 4.9 представлена оценка объемов образования фильтрата при разных вариантах технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона захоронения отходов.

Таблица 4.9 – Оценка объемов образования фильтрата при разных вариантах технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона

Параметры	Традиционный полигон	Управляемый анаэробный полигон	Аэрация массива полигона
Суммарный объем образования фильтрата на этапах жизненного цикла полигона, тыс.м ³	487,12	678,87	430,10
Объем образования фильтрата на эксплуатационном этапе, тыс.м ³	357,50	549,25	357,50
Объем образования фильтрата на постэксплуатационном этапе, тыс.м ³	129,62	129,62	72,60

При эксплуатации полигона как управляемого анаэробного биореактора (увлажнение массива водой), объем образования фильтрата и содержание в нем загрязняющих веществ будет больше, чем на традиционном полигоне. В отличие от традиционного полигона, эксплуатация полигона-биореактора позволяет контролировать и управлять процессами стабилизации отходов в массиве захоронения, увеличивая или снижая объемы жидкости для орошения массива, в зависимости от технического состояния объекта. Внедрение аэрации массива полигона на постэксплуатационном этапе позволит снизить объемы фильтрата практически на 50% и снизить концентрации органических соединений в фильтрате.

4.2.2. Расчет предотвращенного экологического ущерба от загрязнения объектов окружающей среды

Для эколого-экономической оценки эффективности технических мероприятий по снижению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона может быть использована оценка предотвращенного экологического ущерба, выполненная на

основании «Временной методики определения предотвращенного экологического ущерба» [147].

Расчет предотвращенного экологического ущерба от загрязнения окружающей природной среды полигонами захоронения отходов производился для оценки возможных отрицательных последствий, которые удалось предотвратить или снизить в результате внедрения технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона.

Суммарный предотвращенный экологический ущерб включает ущербы от загрязнения атмосферного воздуха и загрязнения водных ресурсов, которые были рассчитаны для технических мероприятий, внедряемых на полигоне для снижения эмиссий.

Расчет предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха

Эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух при захоронении отходов обусловлены, преимущественно, эмиссиями биогаза [147-149].

Справочный состав биогаза и приведенная масса выбросов загрязняющих веществ представлены в таблице 4.10 [148].

Таблица 4.10 – Состав биогаза и приведенная масса выбросов загрязняющих веществ [148]

Наименование вещества	Содержание метана в биогазе, % по массе	Содержание в биогазе, г/кг метана	Коэффициент опасности	Приведенная масса, г/кг метана
Метан	52,915	1000,0	0,7	700,0
Толуол	0,723	13,7	20	273,3
Аммиак	0,533	10,1	28,5	287,1
Ксилол	0,443	8,4	20	167,4
Углерода оксид	0,252	4,8	0,4	1,9
Азота диоксид	0,111	2,1	16,5	34,6
Формальдегид	0,096	1,8	20	36,3
Этилбензол	0,095	1,8	20	35,9
Ангидрид сернистый	0,07	1,3	20	26,5
Сероводород	0,026	0,5	20	9,8
ИТОГО	55,264	1044,4		1572,8

Размер предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха рассчитывается по формуле 4.3 [147]:

$$Y^A = Y_{yd}^A * M^A * K_{\circ}^A * J_u \quad (4.3)$$

где:

Y^A - предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха, млн. руб.;

Y_{yd}^A - показатель удельного ущерба атмосферному воздуху (47,5 руб./усл. т);

M^A - приведенная масса выброса загрязняющих веществ, не поступивших в атмосферный воздух, кг/т (таблица 4.5);

$K_{\circ}^A$ - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха региона ($K_{\circ}^A=2,0$);

J_u - индекс инфляции (при переводе цен 1998 г. в цены текущего года).

Результаты предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха для внедряемых на полигоне технических мероприятий (в ценах 2018 г.) представлены на рисунке 4.5.

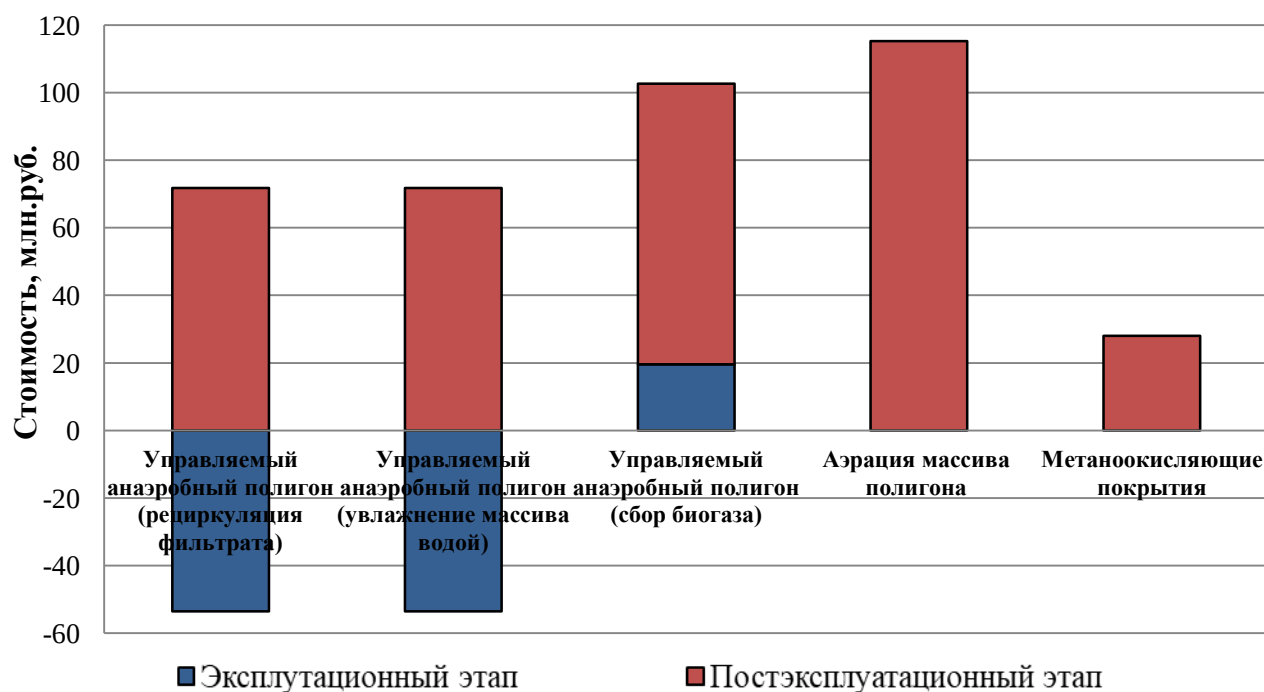


Рисунок 4.5 – Предотвращенный экологический ущерб атмосферному воздуху в результате внедрения технических мероприятий на полигоне

Отрицательные значения предотвращенного экологического ущерба при внедрении технологии увлажнения полигона водой (рециркуляция фильтрата) на эксплуатационном этапе связано с увеличением объемов биогаза. При внедрении технологии сбора биогаза на полигонах возможно предотвратить экологический ущерб атмосферному воздуху на эксплуатационном этапе на 19,5 млн.руб., на постэксплуатационном этапе на 83 млн.руб. в сравнении с традиционным полигоном.

Максимальный предотвращенный экологический ущерб атмосферному воздуху может быть достигнут при внедрении аэрации массива полигона за счет сокращения эмиссии биогаза на постэксплуатационном этапе.

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха при внедрении технических мероприятий по снижению эмиссий на полигонах (в ценах 2018 г.) составил: при увлажнении массива полигона 18,1 млн.руб., при той же технологии со сбором биогаза 102,6 млн. руб., при аэрации массива полигона 115,2 млн.руб., при устройстве метаноокисляющих покрытий 28,0 млн.руб.

Расчет предотвращенного экологического ущерба от загрязнения водных объектов

Загрязнение водных объектов при захоронении отходов на полигоне связано с образованием фильтрата и его поступлением в поверхностные и подземные воды [56,62].

Удельное количество загрязняющих веществ, содержащихся в фильтрате при разных вариантах технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона, представлено в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Удельное количество загрязняющих веществ, содержащихся в фильтрате

Наименование ЗВ	Коэффициент опасности	Приведенная масса, т/куб.м				
		Традиционный полигон		Управляемый анаэробный полигон		Аэрация массива полигона
		Эксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап	Эксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап
Аммоний ион	1	0,0008	0,0008	0,0004	0,0006	0,00035
Железо	1	0,00007	0,00007	0,000005	0,00003	0,000003
Кадмий	550	0,0000044	0,0000044	0,000000275	0,0000033	0,00000022
Кальций	0,5	0,000075	0,000075	0,00001	0,00005	0,000008
Магний	0,5	0,0001	0,0001	0,00003	0,0001	0,000025
Марганец	90	0,0018	0,0018	0,000063	0,0009	0,000036
Медь	550	0,0000044	0,0000044	0,000022	0,0000055	0,0000165
Никель	90	0,0000027	0,0000027	0,0000018	0,00000099	0,0000009
Нитрат-анион	0,2	0,000005	0,000005	0,000002	0,0000036	0,0000016
Нитрит-анион	11	0,000165	0,000165	0,000055	0,000099	0,000044
Ртуть и ее соединения	11	0,000000099	0,000000099	0,000000009	0,000000033	0,000000007
Свинец	0,5	0,000175	0,000175	0,00006	0,0001	0,00005
Сульфат-анион (сульфаты)	0,5	0,0011	0,0011	0,00035	0,00065	0,00025
Хлорид-анион (хлориды)	90	0,000054	0,000054	0,000027	0,000009	0,000009
Цинк	0,3	0,00018	0,00018	0,000066	0,00003	0,000045
БПК полн.	550	0,000022	0,000022	0,000011	0,000022	0,000055
Хром трехвалентный	0,5	0,000775	0,000775	0,0005	0,000675	0,0004
Фосфаты (по фосфору)	0,5	0,0006	0,0006	0,00025	0,0004	0,00015
Кобальт и его соединения	1	0,000000099	0,000000099	0,000000009	0,000000033	0,000000007
Натрий	1	0,000175	0,000175	0,00006	0,0001	0,00005
Калий	550	0,0011	0,0011	0,00035	0,00065	0,00025
Сумма		0,0059	0,0019	0,0037	0,0014	0,0010

Размер предотвращенного экологического ущерба водным объектам рассчитывается по формуле 4.4 [147]:

$$Y^B = Y_{y0}^B * M^B * K_{\text{э}}^B * J_u \quad (4.4)$$

где:

Y^B - предотвращенный экологический ущерб водным ресурсам, млн. руб.;

U_{yd}^B - показатель удельного ущерба водным ресурсам, руб./т;

M^B - приведенная масса сброса загрязняющих веществ, не поступивших (не допущенных к сбросу) в водные объекты, т.;

$K_{\circ}^B$ - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости региона по состоянию водных объектов ($K_{\circ}^B=1,1$);

J_u - индекс инфляции (для перевода цен 1998 г. в текущие цены).

Результаты предотвращенного экологического ущерба водным объектам при внедрении на полигоне технических мероприятий по снижению эмиссий (в ценах 2018 г.) представлены на рисунке 4.6.

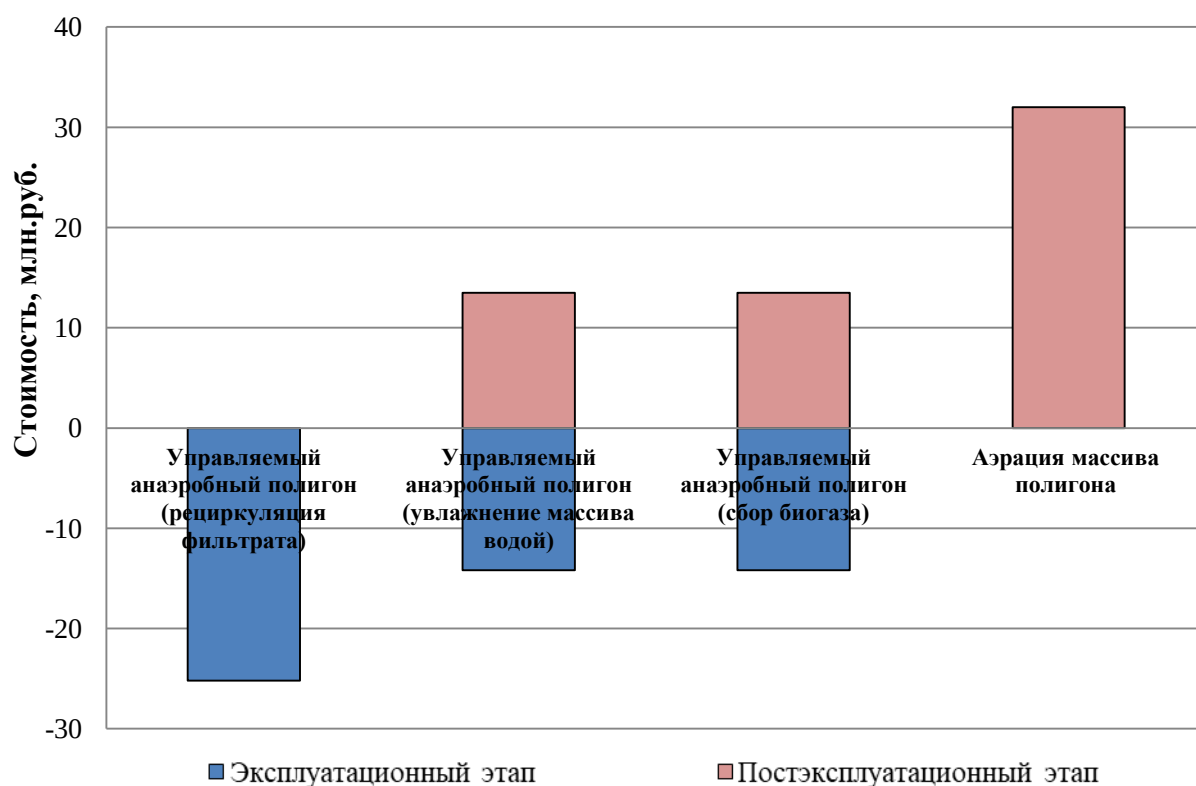


Рисунок 4.6 – Предотвращенный экологический ущерб водным объектам в результате внедрения технических мероприятий на полигоне

Отрицательные значения предотвращенного экологического ущерба при внедрении технологии увлажнения полигона водой на эксплуатационном этапе связаны с увеличением объемов фильтрата и составляет 14,2 млн.руб. При рециркуляции фильтрата на полигоне ущерб водным объектам на эксплуатационном

этапе полигона, также связан с увеличением загрязняющих веществ в фильтрате и составляет 25,2 млн.руб. Максимальный предотвращенный экологический ущерб водным объектам может быть, достигнут при реализации аэрации массива полигона вследствие сокращения объемов фильтрата и содержания в нем органических загрязнителей на постэксплуатационном этапе.

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения водных объектов при внедрении технических мероприятий по снижению эмиссий на полигонах составил: при увлажнении массива полигона водой 1,28 млн.руб., при аэрации массива полигона 32,0 млн.руб.

Сводные данные по предотвращенному экологическому ущербу по разным вариантам внедрения технических мероприятий по снижению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона приведен в таблице 4.12 и рисунке 4.7.

Таблица 4.12 – Предотвращенный экологический ущерб по разным вариантам технических мероприятий

Техническое мероприятие	Предотвращенный экологический ущерб атмосферному воздуху, млн.руб.	Предотвращенный экологический ущерб водным ресурсам, млн.руб.	Суммарный предотвращенный экологический ущерб, млн.руб.
1. Управляемый анаэробный полигон (рециркуляция фильтрата)	18,16	-25,2	-7,04
2. Управляемый анаэробный полигон (увлажнение массива водой)	18,16	1,28	19,44
3. Управляемый анаэробный полигон (сбор биогаза)	102,67	1,28	103,95
4. Аэрация массива полигона	115,29	32,0	147,29
5. Устройство метаноокисляющих покрытий	28,00	0	28,00

Максимальный экологический эффект по результатам оценки предотвращенного экологического ущерба объектам окружающей среды может быть достигнут при реализации аэрации массива полигона за счет сокращения эмиссий биогаза и объема фильтра та на постэксплуатационном этапе и сокращения срока достижения приемлемых для окружающей среды эмиссий.

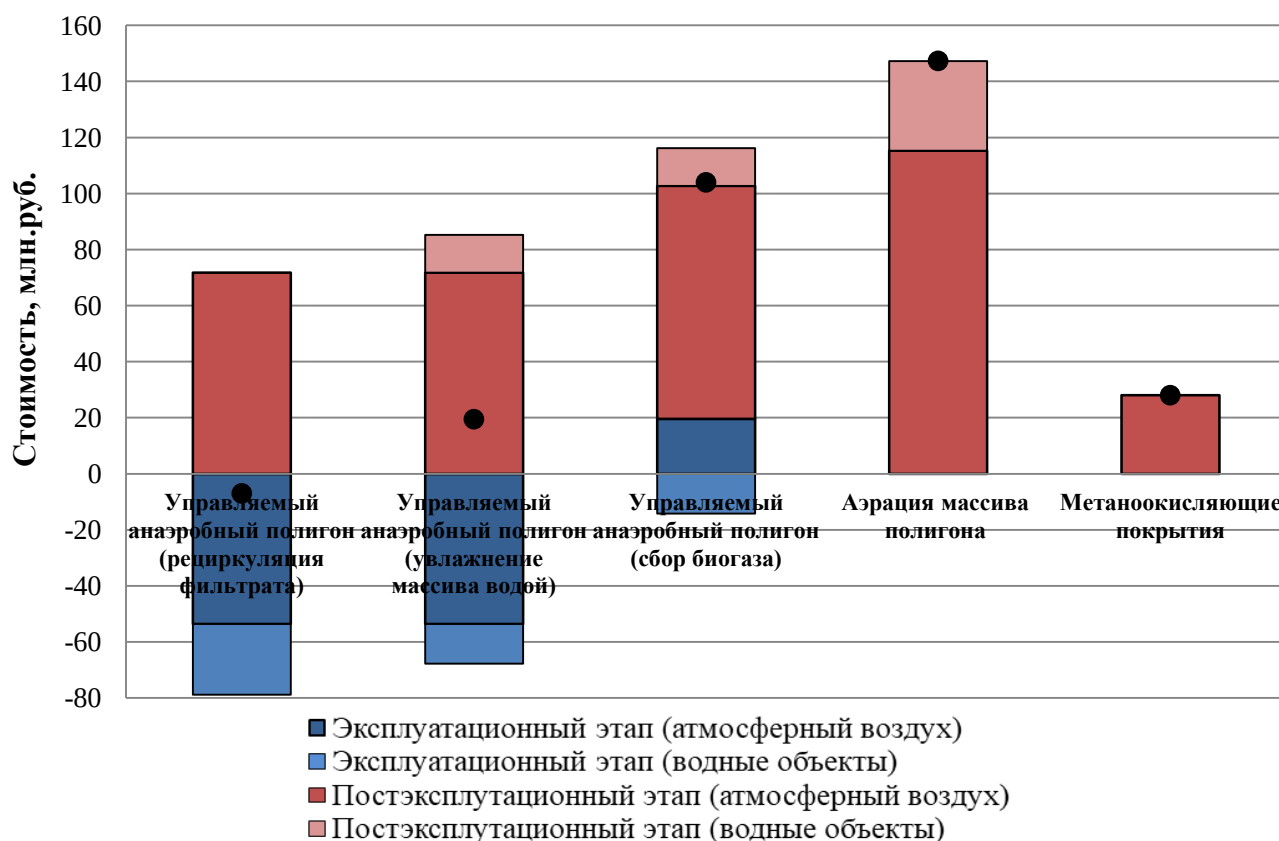


Рисунок 4.7 – Предотвращенный экологический ущерб от внедрения технических мероприятий по снижению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения объектов окружающей среды при внедрении технических мероприятий по снижению эмиссий на полигонах (в ценах 2018 г.) составил: при увлажнении массива полигона водой 19,4 млн.руб., при той же технологии со сбором биогаза на 103,95 млн. руб., при аэрации массива полигона 147,3 млн.руб., при устройстве метаноокисляющих покрытий 28,0 млн.руб.

4.2.3. Расчет платы за негативное воздействие полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на объекты окружающей среды

Расчет платы за негативное воздействие на атмосферный воздух

Плата за негативное воздействие биогаза на атмосферный воздух на этапах жизненного цикла полигона была рассчитана на основании постановления правительства РФ «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» от 13 сентября 2016 г. № 913 [150]. В таблице 4.13 представлена ставка платы за выбросы биогаза в атмосферный воздух.

Таблица 4.13 – Ставка платы за 1 тонну биогаза (в ценах 2018 г.)

Наименование вещества	Содержание в биогазе, %	Содержание в биогазе, т.	Плата за тонну загрязняющего вещества, руб./т.	Плата за тонну биогаза, руб./т.
Азота диоксид	0,089	0,0009	138,8	0,123
Азота оксид	0,014	0,0001	93,5	0,013
Аммиак	0,533	0,0053	138,8	0,740
Ангидрид сернистый	0,070	0,0007	45,4	0,032
Сероводород	0,026	0,0003	686,2	0,178
Углерода оксид	0,252	0,0025	1,6	0,004
Углерода диоксид	44,736	0,4474	0	0
Метан	52,915	0,5292	108,0	57,148
Ксилол	0,443	0,0044	29,9	0,132
Толуол	0,723	0,0072	9,9	0,072
Этилбензол	0,095	0,0010	275,0	0,261
Формальдегид	0,096	0,0010	1823,6	1,751
Итого				60,455

Расчет платы за негативное воздействие биогаза на атмосферный воздух производился для эксплуатационного и постэксплуатационного этапов (до достижения 90% эмиссий биогаза) по разным вариантам технических мероприятий, внедряемых на полигоне захоронения отходов для снижения эмиссий (рисунок 4.8).

Плата за негативное воздействие биогаза на атмосферный воздух на этапе эксплуатации традиционного полигона составит 2,94 млн.руб., на этапе постэксплуатации 4,33 млн.руб. При внедрении на традиционном полигоне технологии увлажнения массива со сбором биогаза плата за негативное воздействие

биогаза на атмосферный воздух снизится на постэксплуатационном этапе на 2,43 млн.руб. (40%), при внедрении аэрации массива полигона на постэксплуатационном этапе плата снизится на 3,51 млн. руб. (50%), при устройстве метаноокисляющих покрытий на 1,02 млн.руб. (15%).

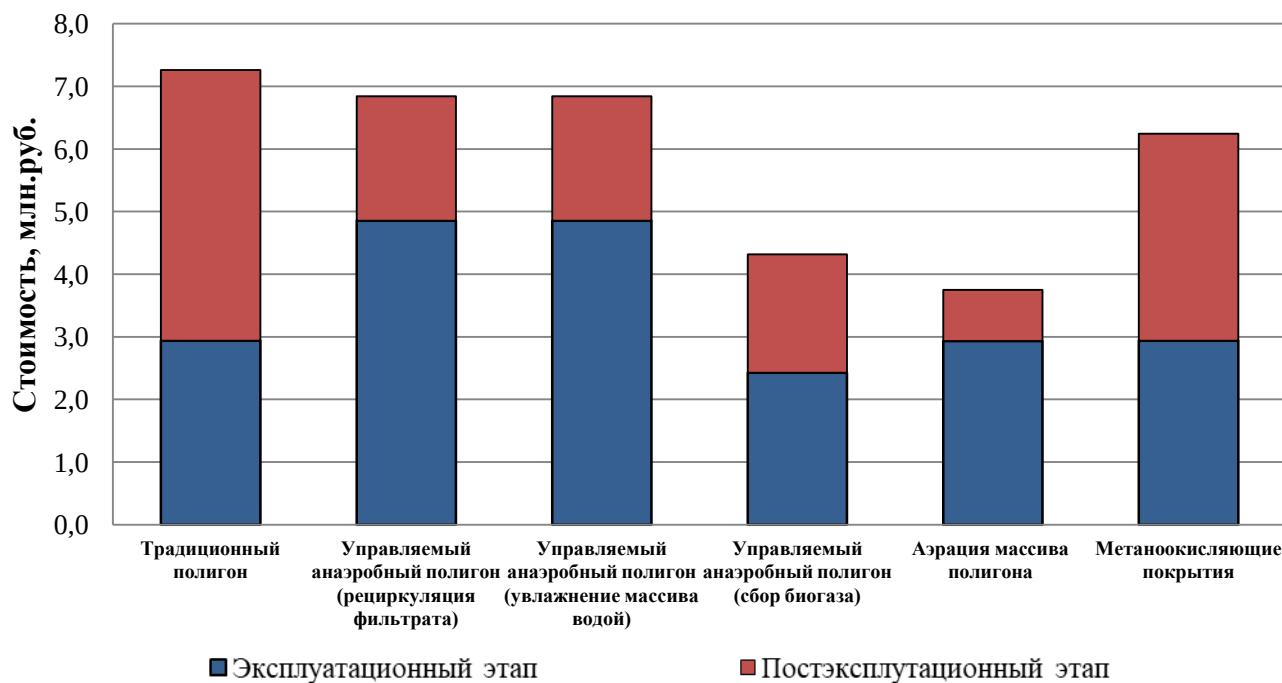


Рисунок 4.8 – Плата за негативное воздействие биогаза на атмосферный воздух по вариантам технических мероприятий на полигоне

Расчет платы за негативное воздействие на водные объекты

Плата за негативное воздействие фильтрата на водные объекты на этапах эксплуатации полигона была рассчитана на основании постановления правительства РФ «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» от 13 сентября 2016 г. № 913 [150]. В таблице 4.14 представлена ставка платы за загрязняющие вещества, входящие в состав фильтрата.

Таблица 4.14 – Плата за негативное воздействие загрязняющих веществ, входящих в состав фильтрата (в ценах 2018 г.) [150]

Наименование загрязняющего вещества	Ставка платы за 1 тонну, руб.
Аммоний ион	1190,2
Железо	5950,8
Кадмий	147106,3
Кальций	3,2
Магний	14,9
Марганец	73553,2
Медь	735534,3
Никель	73553,2
Нитрат-анион	14,9
Нитрит-анион	7439
Ртуть и ее соединения	73553403
Свинец	99172,1
Сульфат-анион (сульфаты)	6,0
Хлорид-анион (хлориды)	14711,7
Цинк	73553,2
БПК полн.	243
Хром трехвалентный	8499,6
Фосфаты (по фосфору)	3679,3
Кобальт и его соединения	4428
Натрий	6,7
Калий	16,6

Содержание загрязняющих веществ в фильтрате полигона принято на основании данных представленных в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Содержание загрязняющих веществ в фильтрате для технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона [40,46]

Показатель	Традиционный полигон		Управляемый анаэробный полигон		Аэрация массива полигона
	Эксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап	Эксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап
NH ₄ -N, мг/л	750	400	675	350	40
Fe (общее), мг/л	50	5	50	5	5
Cd, мг/л	0,006	0,0005	0,006	0,0004	0,0005
Ca ²⁺ , мг/л	100	20	100	16	20
Mg ²⁺ , мг/л	180	60	180	50	60
Mn ²⁺ , мг/л	10	0,7	10	0,4	0,7
Cu, мг/л	0,004	0,04	0,02	0,03	0,04

Показатель	Традиционный полигон		Управляемый анаэробный полигон		Аэрация массива полигона
	Эксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап	Эксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап	Постэксплуатационный этап
Ni, мг/л	0,02	0,02	0,011	0,01	0,02
NO ₃ -N, мг/л	20	10	18	8	4
NO ₂ -N, мг/л	10	5	9	4	5
Pb ²⁺ , мг/л	0,009	0,0008	0,006	0,0006	0,0008
SO ₄ ²⁻ , мг/л	300	120	300	110	120
Cl, мг/л	2100	700	1300	600	700
Zn ²⁺ , мг/л	0,6	0,3	0,132	0,2	0,3
БПК полн.	500	220	120	150	220
Cr, мг/л	0,3	0,2	0,495	0,1	0,2
Na ⁺ , мг/л	1350	1000	1350	800	1000
K ⁺ , мг/л	1100	500	1100	300	500

Расчет платы за негативное воздействие фильтрата на водные объекты производился для эксплуатационного и постэксплуатационного этапов (в течение 30 лет) по разным вариантам внедрения технических мероприятий на полигоне захоронения отходов (рисунок 4.9).

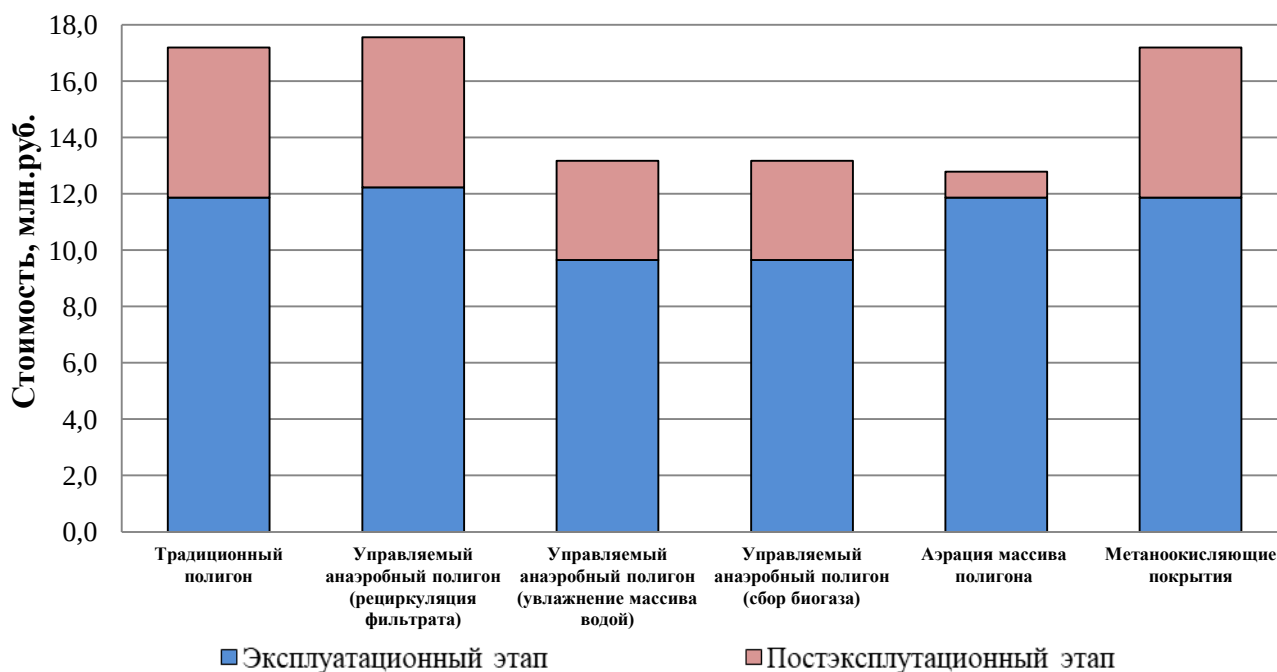


Рисунок 4.9 – Плата за негативное воздействие фильтрата на водные объекты по вариантам технических мероприятий на полигоне

Плата за негативное воздействие фильтрата на водные объекты на этапе эксплуатации традиционного полигона составит 11,87 млн.руб., на этапе постэксплуатации 5,33 млн.руб. При внедрении на традиционном полигоне технологии увлажнения массива водой плата за негативное воздействие фильтрата на водные объекты снизится на 4,02 млн. руб. (14%), при внедрении аэрации массива полигона на постэксплуатационном этапе плата снизится на 4,41 млн. руб. (16%). Снижение платы происходит за счет снижения объемов фильтрата и содержащихся в нем загрязняющих веществ.

Плата за негативное воздействие полигона на объекты окружающей среды по разным вариантам технических мероприятий представлена в таблице 4.16 и рисунке 4.10.

Таблица 4.16 – Плата за негативное воздействие полигона на объекты окружающей среды по разным вариантам технических мероприятий (в ценах 2018 г.)

Техническое мероприятие	Плата за негативное воздействие на атмосферный воздух, млн.руб.	Плата за негативное воздействие на водные объекты, млн.руб.	Плата за негативное воздействие на объекты ОС, млн.руб.	Сравнение с традиционным полигоном, млн.руб.
1. Традиционный полигон	7,26	17,20	24,46	-
2. Управляемый анаэробный полигон (рециркуляция фильтрата)	6,84	17,56	24,40	0,06
3. Управляемый анаэробный полигон (увлажнение массива водой)	6,84	13,18	20,02	4,44
4. Управляемый анаэробный полигон (сбор биогаза)	4,32	13,18	17,50	6,96
5. Аэрация массива полигона	3,75	12,79	16,54	7,92
6. Устройство метанооксиляющих покрытий	6,24	15,87	22,11	2,35

В результате внедрения на традиционном полигоне технических мероприятий плата за негативное воздействие на объекты окружающей среды (в ценах 2018 г.) при увлажнении массива полигона водой снижается на 18%, при той же технологии со сбором биогаза на 28%, при аэрации массива полигона на 32%, при устройстве метаноокисляющих покрытий на 5%.

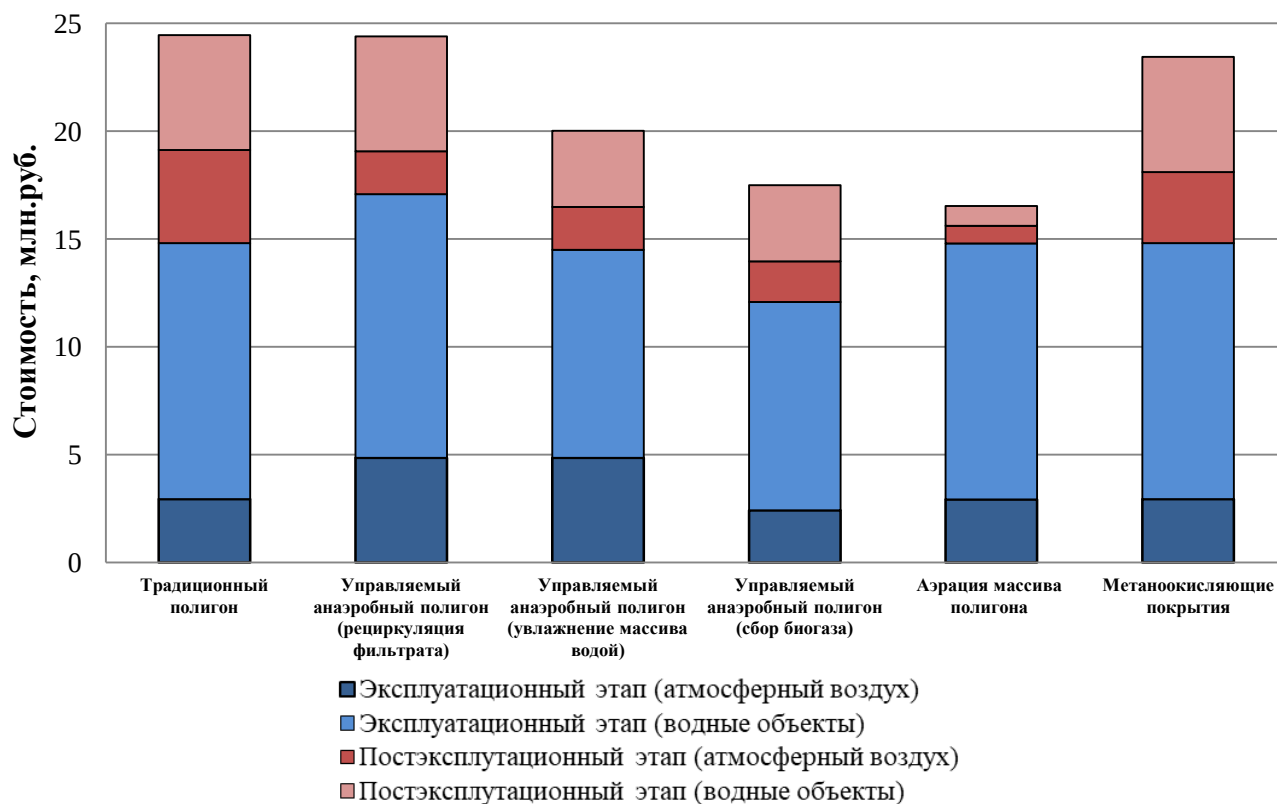


Рисунок 4.10 – Плата за негативное воздействие полигона на объекты окружающей среды по вариантам технических мероприятий на этапах жизненного цикла полигона

Определено, что при аэрации массива полигона на постэксплуатационном этапе может быть достигнуто наибольшее снижение платы за негативное воздействие на объекты окружающей среды.

При использовании комплекса технических мероприятий по снижению эмиссий на этапах жизненного цикла полигона, например при эксплуатации полигона как управляемого анаэробного биореактора со сбором биогаза и дальнейшей аэрацией массива на постэксплуатационном этапе происходит

максимальное снижение эмиссии биогаза и фильтрата, платы за негативное воздействие полигона на 40%.

Выводы по 4 главе:

1. Оценка технических мероприятий по снижению эмиссий на полигонах позволила установить критерии выбора технических мероприятий, граничные условия и особенности их реализации на этапах жизненного цикла полигона. Выбор технических мероприятий по снижению эмиссий на полигонах зависит от результатов оценки стабильности отходов, в том числе от параметров массива захоронения отходов, климатических условий местности, результатов мониторинга компонентов окружающей среды и т.д.

2. Определено, что при эксплуатации полигона, как управляемого анаэробного биореактора, увеличиваются эмиссий метана на стадии эксплуатации до 60%, при аэрации массива отходов на постэксплуатационном этапе снижаются остаточные эмиссии метана на 70% и объем фильтрата на 50%, при устройстве метаноокисляющих покрытий на постэксплуатационном этапе снижаются эмиссии метана на 15%, снижается суммарный срок эмиссий до 40 лет, 34 лет, 53 лет соответственно.

3. Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения объектов окружающей среды при внедрении технических мероприятий по снижению эмиссий на полигонах (в ценах 2018 г.) составил: при увлажнении массива полигона водой 19,4 млн.руб., при организации системы сбора биогаза на 103,95 млн. руб., при аэрации массива полигона 147,3 млн.руб., при устройстве метаноокисляющих покрытий 28,0 млн.руб.

4. В результате внедрения на полигоне технических мероприятий плата за негативное воздействие на объекты окружающей среды (в ценах 2018 г.) при увлажнении массива полигона водой снижается на 18%, при организации системы сбора биогаза на 28%, при аэрации массива полигона на 32%, при устройстве метаноокисляющих покрытий на 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены закономерности протекания процессов стабилизации отходов и формирования эмиссий полигона захоронения ТКО на этапах жизненного цикла. Установлены зависимости термических параметров отходов от их физико-химических и биохимических параметров отходов разного срока захоронения, позволившие установить индикаторные показатели стабильности отходов. На этапах жизненного цикла объекта выявлены логистические зависимости отношения $\Delta(CB)/\Delta(OCB)$ от показателя дыхательной активности, потенциала газообразования отходов, ХПК, БПК₅; экспоненциальные зависимости - от содержания общего и органического углерода в отходах.

2. Обоснована возможность использования СТА для определения стабильности отходов, захороненных на полигонах. Анализ кривых ДСК и ТГ в среде воздуха позволил определить, что интенсивность тепловых потоков и потеря массы снижаются с увеличением срока захоронения отходов и стабильности отходов. На кривых ДСК наблюдается сдвиг температуры начала окисления отходов в интервале $T=300-330^{\circ}\text{C}$. По кривым ДСК в среде аргона выявлено смещение и увеличение интенсивности эндотермических пиков в интервале $T=620-800^{\circ}\text{C}$, что объясняется разложением неорганических компонентов отходов и карбоната кальция.

3. Разработана методика комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения, предназначенная для геоэкологической оценки состояния полигонов захоронения ТКО на этапах жизненного цикла. Предложена классификация стабильности отходов в массиве полигона, основанная на определении термических параметров отходов: величине тепловых эффектов, температуре пиков тепловыделения, скорости потери массы, отношении $\Delta(CB)/\Delta(OCB)$. Отходы, имеющие отношение $\Delta(CB)/\Delta(OCB) > 0,45$, относятся к классу высокореактивных, отходы с отношением $\Delta(CB)/\Delta(OCB) = 0,2-0,45$ относятся

к классу реактивных отходов, отходы с отношением $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}} < 0,2$ относятся к классу стабильных отходов.

4. Установлены критерии выбора технических мероприятий по снижению эмиссий, граничные условия и особенности их реализации на этапах жизненного цикла полигона. Выбор технических мероприятий по снижению эмиссий, зависящий от класса стабильности отходов, параметров массива захоронения отходов, климатических условий местности, эмиссий биогаза и фильтрата, позволяет обеспечить безопасный уровень геоэкологического воздействия полигонов захоронения ТКО.

5. На примере одного из исследуемых объектов захоронения отходов определено, что при эксплуатации полигона, как управляемого анаэробного биореактора увеличиваются эмиссии метана на стадии эксплуатации до 60%, при аэрации массива отходов на постэксплуатационном этапе снижаются остаточные эмиссии метана на 70% и объем фильтрата на 50%, при устройстве метаноокисляющих покрытий на постэксплуатационном этапе снижаются эмиссии метана на 15%, предотвращенный экологический ущерб (в ценах 2018 г.) составит 103,95 млн.руб., 147,3 млн.руб., 28,0 млн.руб. соответственно.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БПК – биологическое потребление кислорода

ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия

ЛЖК – летучие жирные кислоты

МБО – механо-биологическая обработка

ОСВ – органическое сухое вещество

ПДК – предельно-допустимая концентрация

ПТС – природно-техногенная система

ТКО – твердые коммунальные отходы

СВ – сухое вещество

СЗЗ – санитарно-защитная зона

СТА – синхронный термический анализ

ТГ – термогравиметрия

ХПК – химическое потребление кислорода

GS₂₁ – потенциал газообразования отходов

RI₄ – показатель дыхательной активности отходов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев Г.Н. Геоэкология. Учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Изд-во ГЕОС. 1999. – 338 с.
2. Тупицына О.В. Оценка и восстановление природно-техногенных систем, нарушенных строительно-хозяйственной деятельностью: дис... д-ра. техн. наук, Самара, 2014. – 323 с.
3. Суздалева А.Л. Создание управляемых природно-технических систем - М.: ООО ИД ЭНЕРГИЯ, 2016. – 160 с.
4. Суздалева А.Л. Управляемые природно-технические системы энергетических и иных объектов как основа обеспечения техногенной безопасности и охраны окружающей среды (темы магистерских диссертаций): учебное пособие / А.Л.Суздалева. – М.: Изд-во ИД ЭНЕРГИЯ, 2015. – 160 с.
5. Гальперин А.М., Фепстер В., Шеф Х. Ю. Техногенные массивы и охрана окружающей среды [Текст] / А. М. Гальперин, В. Фепстер, Х. Ю. Шеф. – 2-е изд. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2001. – 534 с.
6. Кашников В.И. Геологический анализ техногенно-природных геосистем: автореф. дис.... канд. географ. наук, Воронеж, 2007. – 24 с.
7. Савельев А.А. Оценка и обеспечение геоэкологической устойчивости массивов твердых коммунальных отходов для строительно-хозяйственного освоения: дис. ... канд. техн. наук, Самара, 2014. – 323 с.
8. Щербина Е.В. Научно-методологические основы геоэкологического проектирования полигонов твердых бытовых отходов: дис. ... д-ра. техн. наук, Москва, 2005. – 306 с.
9. Пряхин С.И. Методика геоэкологического анализа природно-технических геосистем юга Приволжской возвышенности (в пределах Волгоградской области) // Вестник Воронежского государственного университета. – 2007. – № 2. – С.78-86.
10. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б. Антропогенный фактор в геоэкологической оценке территорий // Геоэкология. Инженерная геоэкология. Гидрогеоэкология. Геокриология, 2014, №3. – С.270-276.

11. Гапонов Д.А. Исследование полигонов и свалок: геофизические метода / Твердые бытовые отходы, 2010. – №7. - С.38-41.
12. Шаимова А. М., Насырова Л. А., Ягафарова Г. Г. Анализ жизненного цикла природно-промышленной системы «Полигон ТБО» // Материалы 21-й Международной научно-технической конференции «Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии». - Уфа: Реактив, 2008. – С. 216–217.
13. Кириллов В. М. Теория и практика оценки экологической безопасности действующих и проектируемых предприятий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук, М., 1992. – 34 с.
14. Графкина М. В. Теория и методы оценки геоэкологической безопасности создаваемых природно-технических систем: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук, М., 2009. – 40 с.
15. Гульков А. Н., Никитина А. В., Щека О. О. К разработке матричной математической модели оценки состояния природно-технической системы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. - №1(6) – С. 1326-1329.
16. Фалейчик Л. М. Методы и технологии для оценок экологического состояния природно-технических систем с использованием математического и геоинформационного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук, Чита, 2010. – 24 с.
17. Ясовеев М. Г. Оценка основных подходов и методов геоэкологического исследования природно-техногенных систем / М. Г. Ясовеев, А. И. Андрухович // Экологический вестник. – 2013. – № 3. – С. 5-12.
18. Laner D. Understanding and evaluating long-term environmental risks from landfills. PhD Thesis, 2011. – 243 p.
19. Коротаев В.Н. Научно-методические основы и технические решения по снижению экологической нагрузки при управлении движением твердых бытовых отходов: дис. ... д-ра. техн. наук, Пермь, 2000. – 319 с.
20. Huber-Humer M., Roeder S., Lechner P. Approaches to assess biocover performance on landfills // Waste Management 29. – 2009. – pp.2092–2104.

21. Belevi H., Baccini P. Long-term behavior of municipal solid waste landfills// Waste Management and Research, 1989. – № 7. – pp. 43-56.

22. Управление отходами. Полигонные технологии захоронения твердых бытовых отходов. Рекультивация и постэксплуатационное обслуживание полигона / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, В.Ю. Петров и др.; ред. Я.И. Вайсман. – Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2012. – 244 с.

23. Костарев С.Н. Математическая модель управления состоянием полигона твердых бытовых отходов: дис. ... д-ра. техн. наук, Пермь – 2004. - 199 с.

24. Письменная С.В. Экономический аспект утилизации ТБО // Экология производства. – 2011. – №5. – С.10-14.

25. Пляскина Н.И., Харитонов В.Н., Вижина И.А. Утилизация твердых коммунальных отходов: эколого – экономическая оценка использования инновационных технологий // Экологический вестник России. – 2016. – №2. – С. 34-39.

26. Малышевский А.Ф. Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России [Электронный ресурс]. - URL: http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad_po_tbo.pdf (дата обращения 25.12.2014).

27. Мирный А.Н. Критерии выбора технологии обезвреживания и переработки твердых бытовых отходов // Чистый город. – 1999. – №1. – С.8-14.

28. Федоров П.М. Мониторинг геоэкологической системы «полигон твердых бытовых отходов» на примере г.Санкт-Петербурга, дис. ... канд. техн. наук, Санкт- Петербург. – 131 с.

29. Municipal waste generation and treatment, by type of treatment method. Statistical office of the European Union [Электронный ресурс]: сайт Eurostat. – Режим доступа:<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&code=tsdpc240&plugin=1> (дата обращения: 10.01.15).

30. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22.08.2016 N 664 «Об утверждении Концепции создания мощностей по производству

альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов и его использования».

31. Тертышная Ю.В., Шибряева Л.С. Биоразлагаемые полимеры: перспективы их масштабного применения в промышленности России // Экология и промышленность России. – 2015. – №8. – С. 20-27.

32. Санитарная очистка и уборка населенных мест. Справочник / Под ред. А.Н. Мирного. – М.: АКХ им. К.Д. Памфилова, 1997. – 303 с.

33. Разнощик В.В. Проектирование и эксплуатация полигонов для твердых бытовых отходов. - М.: Стройиздат, 1981. – 104 с.

34. Зомарев А.М. Санитарно-гигиенический мониторинг полигонов захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) на этапах жизненного цикла, дис. ... д-ра. мед. наук, Пермь, 2010. – 307 с.

35. Перфилов Е.В. Снижение антропогенного воздействия полигонов твердых бытовых отходов на воздушную среду: дис. ... канд.техн. наук, Волгоград, 2006. – 140 с.

36. Матросов А.С. Управление отходами. М.: Гароарики, 1999.- 405 с.

37. Федеральный закон от 10 января 2002 г. N 7-ФЗ (ред. от 12.03.2014) «Об охране окружающей среды».

38. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. - М., 1998.

39. ГОСТ Р 56598-2015 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Общие требования к полигонам для захоронения отходов».

40. СНиП 2.01.28-85 «Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию».

41. СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления».

42. СП 2.1.7.1038-01 "Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов".

43. ТСН 30-308-2002 «Проектирование, строительство и рекультивация полигонов твердых бытовых отходов в Московской области».

44. Council directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. [Электронный ресурс]: сайт United States Environmental Protection Agency. – Режим доступа: <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/wte/pubs/wte-euro.pdf> (дата обращения: 24.01.15).

45. Максимова С. В. Экологические основы освоения территорий закрытых свалок и полигонов захоронения твердых бытовых отходов: дис. ... д-ра. техн. наук, Пермь, 2004. – 285 с.

46. Karanjekar R. V. An improved model for predicting methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature and waste composition / Doctor of philosophy the University of Texas at Arlington August, 2012. – 314 p.

47. Штриплинг Л.О., Туренко Ф.П. Основы очистки сточных вод и переработки твердых отходов // Учебное пособие – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 192 с.

48. Лифшиц А.Б. Современная практика управления твердыми бытовыми отходами // Чистый город. – 1999. – № 1. – С.2-14.

49. Игнатович Н.И., Рыбальский Н.Г. Что нужно знать о твердых бытовых отходах // Экологический вестник России. 1998. – № 1. – С.53-60.

50. Popow V., Power H. Landfill emission of gases into the atmosphere. Boundary element analysis// WIT press Boston Southampton Computational Mechanics Publications. –1994. – 189 p.

51. Valsky A. Material Flux Analysis of a Sanitary uhder Semi Arid with Special Cohsideration of the Water Balance: Diplomarbeit // Wien: Technische Universitat. - 1998. – 155 p.

52. Вайсман Я.И., Вайсман О.Я., Максимова С.В. Управление метаногенезом на полигонах твердых бытовых отходов / Из-во Перм. гос.техн.ун-та. Пермь. – 2003. – 228 с.

53. Шубов Л.Я., Ставронский М.Е., Шехирев Д.В. Технологии отходов (Технологические процессы в сервисе). Учебное пособие. – М., 2006.

54. Ерошина Д.М., Ходин В.В., Зубрицкий В.С., Демидов А.Л. Экологические аспекты захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах. Минск: «Бел НИЦ «Экология», 2010. – 152 с.

55. Barlaz M., Camobreco V. Life - cycle inventory of modern municipal solid waste landfill / Environmental impact, aftercare and remediation of landfills // 7 International waste management and landfill symposium. Sardinia, – 1999. – Vol. II. – pp.394-408.

56. Andreotolla G., Cannas, P. Chemical and Biological Characteristics of Landfill leachate. In: Landfilling of waste: leachate, ed. T.H. Christensen, R. Cossu & R. Stieglmann. Academic Press, London, 1990. – pp. 65-89.

57. Управление отходами: Сточные воды и биогаз полигонов захоронения твердых бытовых отходов: монография / Я.И. Вайсман [и др.] под ред. Я.И. Вайсмана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 259 с.

58. Bjorklund A. Environmental systems analysis waste management // AFR Report, 1998.

59. Barlaz M., Ham R. Methane production from municipal refuse. // Critical reviews in environmental control, 1990. – Vol. 19. – pp.557-584.

60. Christensen T., Kjeldsen P., Stieglmann R. Basic biochemical processes in landfills // Sanitary Landfilling: Process, Technology and environmental impact. London: Academic Press, 1989. – 220 p.

61. Belevi H., Baccini P. Long-term emissions from Municipal Solid Waste Landfills. In Landfilling of waste: Leachate. London & New York. – 1992.

62. Aprili P., Bergonzoni M., Buttol P. Life-cycle assessment of a municipal solid waste landfill / Environmental impact, aftercare and remediation of landfills // 7 International waste management and landfill symposium. Sardinia, 1999. – Vol. IV. – pp. 345-352.

63. Глушанкова И.С. Очистка фильтрационных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов на различных этапах жизненного цикла: дис. ... д-ра техн. наук. Пермь, 2003. – 331 с.

64. Середа Т.Г. Обоснование технологических режимов функционирования искусственных экосистем хранения отходов: дис. ... д-ра. техн. наук, Москва, 2006. – 445 с.

65. Kinman R.N., Nutini D.L., Walsh J.J., Vogt E.G., Stamm J., Richabaugh J. Gas enhancement techniques in landfill simulators. *Waste Management & Research*, 5 – 1987. – pp. 13-26.

66. Municipal solid waste generation, recycling and disposal in the United States: facts and figures for 1998 // EPA, Cincinnati, 2000.

67. El-Fadel M., Findikakis A.N., Leckie J.O. A numerical model for methane production in manage sanitary landfills.// *Waste management research*, – 1989. – №7. – pp.31-42.

68. Tchobanoglous I., Theisen H, Eliassen R. Solid waste - New-York: Mc.Irow-Hill. – 1977.

69. Зайцева Т.А. Закономерности изменения микробиоценозов на полигонах депонирования твердых бытовых отходов в процессе деструкции органических веществ: дис...д-ра. биол. наук. Пермь, 2006. – 289 с.

70. Buivid M.G. Laboratory Simulation of fuel gas production enhancement from municipal Solid Waste landfills / Dynatech R and D Co. – Cambridge, MA, 1980.

71. Rees J.F. The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organik matter // *Journ. of Chemical Technology and Biotechnology*. – 1980. – Vol. 30.

72. Stone R., Kahle R. L. Water and Sewage Sludge Absorption by Solid Waste // *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 98(5). – 1972. pp. 731-743.

73. Parkin G. F., Owen, W. F. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludge // *J. Environ. Engr.* 112. – 1986. – pp.867-920.

74. Kjeldsen P., Barlaz, M., Rooker, A., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4). 2002. – pp.297-336.

75. Chu L., Cheung K., Wong M. Variations in the Chemical Properties of Landfill Leachate // *Environmental Management*, 18. – 1994. – pp. 105-114.

76. Krung M., Ham R. Analysis of Long-Term Leachate Characteristics // Sardinia International Landfill Symposium, Calgary, Italy, 1991. – pp. 9-12.
77. Bingemer H., Crutzen P.J. The production of methane from solid wastes // Journal of Geophysical Research, 92 (D2), 1987. – pp. 2181-2187.
78. Воронкова Т.В. Схема мероприятий по снижению эмиссии загрязняющих веществ при захоронении твердых бытовых отходов. // Материалы 3-го международного конгресса по управлению с отходами и природными технологиями. Вейст-Тэк, М., 2003. – С. 263-264.
79. Горбатюк О.В., Минько О.И., Лифшиц А.Б., Елютина Н.Ю. Ферментеры геологического масштаба // Микробиология. Охрана природы, С. 71-79.
80. Rees J.F., Grainger J.M. Rubbish dump fermenter? Prospects for the control of refuse fermentation to methane in landfills // Process Biochemistry, 17 (6). – 1982. – pp. 41-48.
81. Донченко В.К., Скорик Ю.И., Венцюлис Л.С., Оников В.В., Пименов А.Н., Бухтеев Б.М. Факторы риска от полигонов твердых бытовых отходов // Материалы 3-го международного конгресса по управлению с отходами и природными технологиями. Вейст-Тэк, М., 2003. – С. 150-151.
82. Мелкумов Ю.А. Управление твердыми бытовыми отходами в Московской области // Экология и промышленность России, 1999. – № 4. – С. 28-30.
83. Сметанин В.И. Защита окружающей среды от отходов производства и потребления. М., 2003. – 312 с.
84. Шершнева Е.С., Ларионов В.Г., Куркин П.Ю. Масштабы, структура и проблемы утилизации городских мусорных свалок. // Экология и промышленность России, 1999. – № 2. – с. 29-32.
85. Ehrig H. J., Brinkmann U. Verbundvorhaben Deponiekörper - Zusammenfassender Abschlussbericht zum Arbeitsgebiet Siedlungsabfälle. Wuppertal, BUGH Wuppertal: 110, 1999.

86. Rosqvist H., Bendz D. An experimental evaluation of the solute transport volume in biodegraded municipal solid waste // *Journal of Hydrology and Earth System Sciences* 3(3). – 1999. – pp. 429-438.

87. Fellner J., Döberl G., Allgaier G., Brunner P. H. Comparing field investigations with laboratory models to predict landfill leachate emissions // *Waste Management* 29(6). – 2009. – pp.1844-1851.

88. Kjeldsen P., Barlaz M.A., Rooker A.P., Baun A., Ledin A., Christensen H. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 32(4), 2002. – pp. 297-336.

89. Reinhart D.R., Townsend T. G. *Landfill Bioreactor Design & Operation*. Boca Raton - London - New York - Washington, D.C., CRC Press LLC. – 1997.

90. Öman C. B., Junestedt C. Chemical characterization of landfill leachates - 400 parameters and compounds. *Waste Management* 28(10), 2008. – pp.1876-1891.

91. Weber R., Watson A., Forter M., Oliaei F. Review Article: Persistent organic pollutants and landfills - a review of past experiences and future challenges. *Waste Management & Research* 29(1): 2011. – pp. 107-121.

92. Krümpelbeck I. Untersuchungen zum langfristigen Verhalten von Siedlungsabfalldeponien. Fachbereich Bauingenieurwesen. Wuppertal, Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal: 216. – 2000.

93. Kruse K. Langfristiges Emissionsverhalten von Siedlungsabfalldeponien. Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig: 228. – 1994.

94. Рекомендации по выбору систем дегазации и разработке технологий очистки фильтрационных вод полигонов захоронения ТБО – Пермь, 2004.

95. Технология исследования биогазовых месторождений // ГЕОПОЛИС, научно-исследовательские и внедренческие работы в области экологии, М., 1990. – С. 3-10.

96. Smidt E., Lechner P. Study on the degradation and stabilization of organic matter in waste by means of thermal analyses // *Thermochimica Acta* 438. – 2005. – pp. 22-28.

97. Пухнюк А.Ю., Матвеев Ю.Б., Хубер-Хумер М. Применение спектральных и термических методов анализа для эколого-энергетической оценки полигонов твердых бытовых отходов // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – №4. – С.49-59.

98. Stegmann R., Heyer K.-U., Hupe K., Willand A. Deponienachsorge - Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. Dessau, Umweltbundesamt.- March. – 2006.

99. Cossu R., Lai T., Piovesan E. Proposal of a methodology for assessing the final storage quality of a landfill // Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA. – 2007.

100. Knox K., P. Braithwaite, M. Caine and B. Croft Broxborough landfill test cells: The final chapter. A study of landfill completion in relation to final storage quality (FSQ) criteria // Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA. – 2005.

101. Офрихтер В.Г. Оценка геотехнических характеристик ТБО полевыми методами // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. №3. – 2015. – С.58-65.

102. Тагилова О. А. Повышение экологической безопасности полигонов твердых бытовых отходов на основе анализа потоков органического углерода, дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2006. - 186 с.

103. Синхронный термический анализ [Электронный ресурс]. - URL: http://www.spectrosystems.ru/methods/sinc_tga_tda.shtml (дата обращения 21.01.2015).

104. Strezov V., Moghtaderi B., Lucas J.A. Computational calorimetric investigation of the reactions during thermal conversion of wood biomass, Biomass and Bioenergy. – 2004. – №27 (5). – pp.459–465.

105. Melis P., Castaldi P. Thermal analysis for the evaluation of the organic matter evolution during municipal solid waste aerobic composting process // Thermochimica Acta 413. – 2004. – pp.209–214.

106. Zhu Y., Chai X., Li H., Zhao Y., Wei Y. Combination of combustion with pyrolysis for studying the stabilization process of sludge in landfill // *Thermochimica Acta*, 464. – 2007. – pp.59-64.

107. Smidt E., Meissl K., Tintner J. Investigation of 15-year-old Municipal Solid Waste Deposit Profiles by Means of FTIR Spectroscopy and Thermal Analysis // *Journal of Environmental Monitoring*, 2007. – Vol. 9. –Issue 12. – pp. 1387-1393.

108. Smidt E., Boehm K., Tintner J. Evaluation of old landfills – a thermoanalytical and spectroscopic approach // *J. Environmental Monitoring*. – 2011. – Vol. 13 – pp.362-369.

109. Проект Тасис - Совершенствование системы управления твердыми бытовыми отходами в Донецкой области Украины Пособие по мониторингу полигонов ТБО. Thales E&C - GKW - Consult, 2004. – 271 с.

110. Завизион Ю.В., Слюсарь Н.Н., Коротаев В.Н. Критерии выбора комплекса технических мероприятий снижения эмиссий на полигонах захоронения твердых коммунальных отходов // *Экология и промышленность России*. – 2018. – №9. – С.52-57.

111. Слюсарь Н.Н., Коротаев В.Н., Галкина О.А., Матвеев Ю.Б., Пухнюк А.Ю. Оценка влияния предварительной сортировки твердых бытовых отходов на образование метана в массиве полигона захоронения // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2014. – № 1 (13). – С. 17-28.

112. Слюсарь Н.Н., Пухнюк А.Ю. Принципы управления полигоном захоронения твердых коммунальных отходов на разных этапах жизненного цикла // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. 2016. – № 2 (22). – С. 148-164

113. Mechanical-biological-treatment a guide for decision makers. Process, policies and markets. Annex D: process review. Juniper consultancy service ltd, 2005, UK, p. 355.

114. Binner E. Mechanical biological pre-treatment of residual waste in Austria // Sustainable Waste Management, Proceedings of the International Symposium, University of Dundee, Scotland, UK 9-11 September 2003, pp. 213-224.

115. Binner E., Zach A. Beurteilung der Reaktivität von Endprodukten aus mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen // Waste Magazin 1, 1999. – pp. 48-53.

116. Управление отходами. Механо-биологическая переработка твердых бытовых отходов. Компостирование и вермикомпостирование органических отходов: Монография; под. редакцией Я.И. Вайсмана. – Пермь: изд-во Перм. национального исследовательского политехн. ун-та.- Пермь, 2012 – 224 с.

117. Spokas K., Bogner J., ChaAnton J., Morcet M., Aran C., Graff C., Moreaule-Golván Y., Bureau N., Hebe I. Methanemass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? // Waste Management, 26, 2006. – pp. 516–525.

118. Huber-Humer M. Utilization of landfill gas and emissions mitigation, In: Lechner, P. (ed.): Waste matters. Integrating views. Proc. of the 2nd BOKU Waste Conference 2007, Austria, Vienna, – pp. 349-358.

119. Heyer K.-U., Koop A., Hupe K., Stegmann R. Wege und Kriterien zur Entlassung aus der Deponienachsorge // Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft – Stilllegung und Nachsorge von Deponien. - Verlag Abfall aktuell, 2011. – Band 20. – pp. 99-117.

120. Hupe K., Heyer K.-U., Stegmann R. Gezielte Befeuchtung/Bewässerung von Altdeponien zur Beschleunigung der biologischen Umsetzungsprozesse // In: Deponietechnik 2002, Hamburger Berichte 18 – Stuttgart: Verlag Abfall aktuell, 2002. – pp. 237-264.

121. Bioreactor Landfill Operation. A Guide For Development, Implementation and Monitoring. V.1.0, 2008. URL: <http://www.bioreactorlandfill.org/BioreactorFinalReport/>.

122. Heyer K.-U. Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge. Hamburger Berichte, Band 21, Stegmann (Ed), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart. – 2003.

123. Cossu C., Doyotte A., Jacquin M.C., Babut M., Exinger A., Vasseur P. Glutathione reductase, selenium-dependent glutathione peroxidase, glutathione levels, and lipid peroxidation in freshwater bivalves, *Unio tumidus*, as biomarkers of aquatic contamination in field studies // *Ecotoxicol. Environ. Safety*. – 1997. – 38, N 2. – pp. 122-131.

124. Ritzkowski M., Heyer K.U., Stegmann R. Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills // *Waste management*, New York, N.Y. 2006.

125. Ritzkowski M. How does landfill aeration impact on leachate composition? // *Proceedings Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3 - 7 October 2011*.

126. Spokas K., Bogner J., Chanton J., Morcet M., Aran C., Graff C., Moreau-le-Golvan Y., Bureau N., Hebe I. Methanemass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? // *Waste Management*. 2006. – V. 26. – pp. 516–525.

127. Huber-Humer M., Gebert J., Hilger H. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. *Waste Management & Research* 26. – 2008. – pp.33-46.

128. Technischer Leitfaden Methanoxidationsschichten [Электронный ресурс]: Erstellt im Rahmen der ÖVA-Arbeitsgruppe «Leitfaden Methanoxidationsschichten» / M. Huber-Humer [et al.]. - Wien, 2009. – 37 p. – Zugang: <http://www.altlastenmanagement.at/>.

129. Scheutz C., Fredenslund A.M., Nedenskov J., Kjeldsen P. Field measurements of methane emissions and oxidation at a modern disposal site receiving waste with a low organic content // *Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, 3-7 October 2005, S. Margherita di Pula, Italy, published by CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy*.

130. Армишева Г.Т. Рекуперация ресурсов при захоронении твердых бытовых отходов: дис. ... канд. техн. наук / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2008. – 179 с.

131. Завизион Ю.В., Слюсарь Н.Н. Анализ термических характеристик твердых коммунальных отходов разного срока захоронения // Материалы XVI Междунар. конфер. «Химия и инженерная экология». Казань, 2016. – С. 140-143.

132. Загорская Ю.М., Слюсарь Н.Н., Паршакова С.В., Завизион Ю.В. Изучение состава отходов массива полигона ТБО // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2013. – № 4. – С. 144-154.

133. Загорская Ю.М., Завизион Ю.В. Оценка степени разложения твердых коммунальных отходов разного срока захоронения по данным состава // Экология урбанизированных территорий. 2016. – №2. – С.49-54.

134. Слюсарь Н.Н., Загорская Ю.М., Ильиных Г.В., Изучение фракционного и морфологического состава отходов старых свалок и полигонов // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. 2014. – №3 (15). – С.77-85.

135. Завизион Ю.В., Слюсарь Н.Н., Глушанкова И.С., Загорская Ю.М. Оценка физико-химических параметров отходов разного срока захоронения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2015. – № 3 (19). – С. 82-96.

136. Завизион Ю.В., Слюсарь Н.Н., Глушанкова И.С., Загорская Ю.М., Коротаев В.Н. Оценка состояния полигонов захоронения ТБО по изменению органической составляющей // Экология и промышленность России. 2015. – № 7. – С. 26-31.

137. Загорская Ю.М., Слюсарь Н.Н., Глушанкова И.С., Завизион Ю.В. Исследование свойств отходов разного срока захоронения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 1. – С. 40-50.

138. Завизион Ю.В., Слюсарь Н.Н. Оценка изменения показателя зольности и содержания органического углерода в массиве захоронения отходов // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. 2014. – № 1. – С. 84-90.

139. Завизион Ю.В. Оценка состояния полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла - термоаналитический и спектроскопический подход // Вестник Пермского национального

исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. – № 3. – С.90-109.

140. Tchobanoglous G. Integrated Solid Waste Management, McGraw-Hill, New Jersey. 1993. – 978 p.

141. Whitworth A. P. Thermal breakdown characteristics of municipal solid waste components in varying oxygen environment and municipal solid waste management in China, New York, September, 2005. – 52 p.

142. Завизион Ю.В., Глушанкова И.С., Слюсарь Н.Н., Вайсман Я.И. Применение синхронного термического анализа для оценки стабильности захороненных на полигонах твердых коммунальных отходов // Экология и промышленность России. 2016. – №6. – С. 43-49.

143. Methodological tool «Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site» (Version 06.0.1) [Electronic resource] // UNFCCC CDM Executive Board, EB 66 Report, Annex 46. – 2012. – 16 p. – Access mode: http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v6.0.1.pdf/history_view.

144. Ильиных Г.В., Слюсарь Н.Н., Коротаев В.Н. Морфологический состав отходов: основные тенденции изменения // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 8. – С. 38-41.

145. Рудакова Л.В. Научно-методическое обоснование снижения эмиссии загрязняющих веществ полигонов захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) биотехнологическими методами, дис. ... д-ра. техн. наук. Пермь, 2000. – 320 с.

146. Тагилов М.А., Вострецов С.П. Разработка методики расчета водного баланса полигонов ТБО // Отходы-2000: материалы 2-й всерос. науч.-практ. конф. –Уфа, 2000. – С. 32–34.

147. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба, М., 1999 г.

148. Технологический регламент получения биогаза с полигонов твердых бытовых отходов, Отдел научно-технической информации АКХ, Москва, 1990.

149. Временные рекомендации по расчету выбросов вредных веществ в атмосферу в результате сгорания на полигонах твердых бытовых отходов и размера предъявляемого иска за загрязнение атмосферного воздуха (утв. Министерством экологии и природных ресурсов Российской Федерации 2 ноября 1992 г.).

150. Постановление правительства РФ «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» от 13 сентября 2016 г. № 913.