

На правах рукописи



ЖАЖКОВ ВЯЧЕСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ

**УТИЛИЗАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СМЕСЕЙ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ
ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ БИОМЕТАНА**

1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Политаева Наталья Анатольевна
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Шершнева Мария Владимировна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная химия и естествознание», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Ковалев Андрей Александрович; доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории биоэнергетических и сверхкритических технологий, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский университет ИТМО**», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «30» мая 2024г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета У.1.6.21.46 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, к.10, Гидрокорпус-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте <https://www.spbstu.ru>.

Автореферат диссертации разослан «22» апреля 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета У.1.6.21.46,
кандидат технических наук, доцент

Чусов Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

На современном этапе наиболее актуальной проблемой является рациональное управление отходами производства и потребления путем внедрения инновационных способов их переработки с целью получения ценных компонентов и энергии. В России из-за отсутствия отдельного сбора мусора органические отходы (ОО) поступают на полигоны с общим потоком твердых коммунальных отходов (ТКО). В то же время органическая фракция отходов при анаэробном разложении выделяет биогаз, который в своем составе содержит метан – парниковый газ и, одновременно, ценный вид топлива, который может использоваться в качестве энергоресурса и давно используется в ряде зарубежных стран. Биогаз является низкокалорийным энергетическим ресурсом из-за невысокого содержания в нем метана (50 %), основной решаемой задачей диссертации является повышение содержания метана в биогазе за счет использования отходов производства ценных компонентов из биомасс – это остаточная биомасса микроводорослей, образованная после получения биодизеля, остаточная биомасса ряски, после получения пигментов, пивная дробина, после использования ее в качестве фильтрующей загрузки при очистке вод пивоваренного производства.

На данном этапе не изучены процентное соотношение добавок, кинетика и механизм переработки отходов с использованием добавок из остаточных биомасс их влияние на эмиссию биогаза. В связи с этим *актуальной* является разработка способа утилизации отходов производства и потребления с получением биогаза с высоким содержанием метана за счет использования добавок из остаточных биомасс.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам обезвреживания и утилизации отходов на полигонах, их влиянию на биосферные комплексы и здоровье населения; исследованием деструкции ТКО, способам очистки фильтрата, сбора и утилизации биогаза занимаются многие зарубежные и российские ученые. Весомый вклад в решение этих вопросов внесли: М.П. Федоров, Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, Л.В. Рудакова, Н.Н. Слюсарь, Е.Г. Семин, В.И. Масликов, А.Н. Чусов, R. Cossu, R. Stegmann, M. Ritzkowski и др.

Однако до сих пор не решены задачи комплексной переработки органосодержащей части ТКО для получения энергии и биогумуса. В России слабо проработана технология получения биогаза из органических отходов, а существующие системы анаэробного сбраживания позволяют получать биогаз с низким энергетическим потенциалом.

Гипотеза работы: Комплексная утилизация отходов производства и потребления с получением биогаза за счет использования добавок из остаточной биомассы и регулирования активной фазы эмиссии биогаза на полигоне.

Цель работы: разработать новые способы утилизации композиционных смесей отходов производства и потребления с получением биометана путем применения добавок из остаточных биомасс (микроводоросли *Chlorella*

sorokiniana (*C. sorokiniana*), ряски *Lemna minor* (*L. minor*), пивной дробины) и регулирование эмиссии биогаза на полигоне ТКО.

Для осуществления поставленной цели необходимо решение **задач**:

1. Изучить влияние добавок микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor* и пивной дробины при утилизации композиционных смесей отходов производства и потребления на получение биогаза и концентрацию в нем метана;

2. Провести мониторинг зональной эмиссии биогаза на полигоне ТКО, расположенном в северо-западном регионе РФ;

3. Разработать рациональную схему управления полигоном ТКО с целью снижения эмиссии вредных выбросов в окружающую среду и получения энергии;

4. Разработать предложения по отделению органической фракции от ТКО и использовать её для анаэробной переработки в метантенках с целью получения биогаза и биогумуса.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 1.6.21 – «Геоэкология» по пункту 17 «Ресурсосбережение, санация и рекультивация земель, утилизация отходов производства и потребления, в том числе возникающих в результате добычи, обогащения и переработки полезных ископаемых, строительной, хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ. Геоэкологическое обоснование безопасного размещения, хранения и захоронения токсичных, радиоактивных и других отходов».

Научная новизна работы:

1. Впервые экспериментально обоснован способ утилизации отходов производства - остаточных биомасс (микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor*, пивной дробины) и потребления - ТКО, путем комбинирования их состава с целью получения максимальной эмиссии биометана.

2. Впервые проведены лабораторные исследования процессов анаэробного сбраживания композиционных смесей отходов производства (остаточных биомасс: микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor*, пивной дробины) и потребления (ТКО) с оценкой их интенсивности, удельного объема и компонентного состава газовых эмиссий, позволившие определить оптимальный состав для получения биогаза.

3. Для утилизации отходов производства и потребления на полигонах предложен способ управления процессами биоразложения путем подачи в тело полигона жидкой фракции отходов производства (микроводоросли, ряски, пивной дробины), получаемой внесением в очищенный фильтрат добавок биомассы с отводом газовых эмиссий для дальнейшего использования, что позволит минимизировать загрязнение природной среды.

Положения, выносимые на защиту:

1. Выявленные закономерности влияния добавок остаточных биомасс (микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor* и пивной дробины) на

биогазовый потенциал анаэробной переработки органических отходов в биоэнергоресурсы.

2. Технологические решения и комплекс мер по зонированию территории полигона, расположенного в северо-западном регионе РФ, при переработке органических отходов путём применения замкнутой схемы с системами дегазации, сортировки и использования для анаэробного сбраживания с получением биогаза.

3. Результаты мониторинга эмиссии состава биогаза на исследуемом полигоне и зонирования его поверхности с учетом концентрации при выходе веществ (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2 , CO , H_2S), содержащихся в биогазе.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Научно обоснован способ переработки отходов производства и потребления с целью получения энергии и активизации эмиссии биогаза на полигонах ТКО, который в итоге улучшил состояние природной среды: снизил загрязнение атмосферы, позволил предотвратить возникновение возгорания отходов и превратил полигон ТКО в источник биоэнергоресурсов.

2. Разработан способ повышения биогазового потенциала, который позволяет получить биогаз с содержанием метана более 50 %, путем анаэробного сбраживания органических отходов за счет добавления остаточных биомасс (микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor* и пивной дробины). Разработаны технологические рекомендации получения биогаза с использованием биомассы микроводорослей *C. sorokiniana*.

3. Предложена схема сортировки и использования органических отходов для анаэробного сбраживания в метантенках с получением биоэнергии и биогаза.

4. Результаты работы используются в учебном процессе ФГАОУ ВО «СПбПУ» (чтение лекций, проведение практических занятий по дисциплинам «Переработка и утилизация твердых коммунальных отходов, российский и международный опыт», «Экологическая безопасность в промышленности»; при проведении курсовых и выпускных квалификационных работ) для магистров направления 20.04.01 «Экологическая безопасность в промышленности» (Акт внедрения №31/2567 от 01.03.2024).

Предмет исследования: процессы анаэробного разложения органических отходов.

Объекты исследования: отходы производства (остаточные биомассы микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor* и пивной дробины); отходы потребления (органические отходы), полигон ТКО.

При выполнении диссертации использованы широко применяемые в научных исследованиях методы для установления компонентов биогаза и физико-химических свойств биомасс микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor* и пивной дробины с применением современного оборудования. Проведены исследования в лабораториях: «Промышленная экология», «Переработка твердых бытовых отходов» и опытно-промышленные испытания на полигоне ТКО. Используются методы системного анализа и обобщения информации, метод экспертных оценок. Математическую обработку для установления случайных

погрешностей и средних значений величин полученных данных, проводили с использованием программы EXCEL (доверительный интервал составлял $\approx 0,95$)

Степень достоверности и апробация полученных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается значительным объемом проведённых лабораторных и опытно-промышленных исследований по определению компонентов биогаза, исследованию свойств биомассы микроводоросли с применением аттестованных приборов и высокоточного оборудования.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях различного уровня для молодых ученых и аспирантов: Всероссийской конференции «Неделя науки СПбПУ» (С-Пб, 2014, 2023), Международной научной конференции «Urban Civil Engineering and Municipal Facilities. (С-Пб, 2015); Всероссийском форуме «Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения» (Саратов, 2022).

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, проведении экспериментальных исследований, обобщении и апробации полученных результатов и подготовке публикаций.

Связь с проектами

Часть диссертационной работы выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Технологические вызовы и социально-экономическая трансформация в условиях зеленых переходов» (Соглашение № 075-15-2022-1136 от 01.07.2022).

Объём и структура работы. Диссертационная работа изложена на 170 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы, включающего 159 наименований, содержит 61 рисунок, 36 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлены: актуальность исследования, цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** (литературно-аналитический обзор) проанализированы проблемы образования и накопления ТКО на свалках и полигонах; дана оценка влияния многокомпонентных фракций отходов на биосферные комплексы, их влияние на экосистему. Изучены сведения о составе и свойствах ТКО; проведен анализ способов их обезвреживания, утилизации и переработки. Обоснованы основные направления использования ТКО для получения биогаза и биогумуса.

Анализ образования отходов в Ленинградской области (ЛО) показал, что максимальный вклад вносят пищевые отходы (20 %), которые селективно не собираются и не утилизируются, попадая на полигон вместе с другими ТКО. При таком обращении на полигонах ТКО происходят неконтролируемый выброс биогаза и потеря ценного сырья для организованного процесса получения биоэнергии и биогумуса за счет анаэробного сбраживания органических отходов в метантенках. На данный момент, на полигон вывозится

отход код ФККО 73610001305 «Пищевые отходы кухонь и организаций общественного питания, несортированные», который нами предлагается использовать в качестве сырья для процесса анаэробного сбраживания ТКО, а не отправлять в общий поток отходов. Это является экологически целесообразным и экономически выгодным.

Проанализированы российский и международный опыт обращения с ТКО, современные методы проектирования и рекультивации полигонов ТКО.

Во **второй главе** представлены методология работы, методы и объекты исследований. Методология данной работы основывается на следующих методах научных исследований: наблюдение, анализ, измерение, эксперимент, сравнение, обобщение, моделирование, доказательство. Представлены применяемые в работе физико-химические методы анализа (газовая хроматография, ИК-спектрофотометрия) с использованием приборов: газоанализатора GA2000+, хроматографа Хроматэк-Кристалл 5000, уникальной экспериментальной установки «Лабораторный комплекс для исследования процессов получения и преобразования биогазов из органосодержащих отходов». Этот комплекс позволяет оценить биогазовый потенциал различных по составу и свойствам ТКО, динамику образования биогаза, изучить процессы его очистки с выделением метанового компонента до 95 % об.

Объектами исследования служили:

1. Исходные и остаточные биомассы (микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor*, пивной дробины).

2. Органические отходы (ОО), моделирующие отходы полигона ТКО.

3. Полигон ТКО, с площадью захоронения 16,8 га, мощностью 1,5 млн т;

Эксперименты проводили в трехкратном повторении, сходимость результатов составляла более 95 %.

В **главе 3** проанализировано использование методики интенсификации биогазового потенциала ТКО за счет применения добавок из биомасс (микроводоросли *C. sorokiniana*, ряски *L. minor* и пивной дробины).

В 3.1 показано, что для повышения биогазового потенциала используются различные органические добавки, одной из них является биомасса микроводорослей. Применение исходной биомассы микроводорослей не рационально, так как в ней содержится большое количество ценных компонентов (липиды, протеины, пигменты и др.). Поэтому использовали остаточную биомассу хлореллы (ОБХ) – отход, образующийся после получения биодизеля из биомассы микроводорослей.

Было подготовлено 6 биореакторов емкостью 1 л. каждый, в которые помещали образцы добавок остаточных биомасс (микроводорослей *C. sorokiniana*, ряски *L. minor*) и инокулянта. В качестве инокулянта использовали свежий коровий навоз влажностью 82 % с содержанием органического углерода 92 %. В Таблице 1 представлен количественный состав загружаемой добавки с расчетом содержания в ней органического углерода.

Таблица 1 –Содержание композиционных смесей из микроводоросли *C. sorokiniana*, выход биогаза и содержание метана (с 95 % доверительным интервалом)

№ био-реактора	ПБХ, *г/ %	ОБХ, **г/ %	Пищевые отходы, г/ %	Инокулянт, г/ %	Удельный выход биогаза, л/г орг углерода	% метана в биогазе
1	4/50	-	-	4/50	0,11	58.7
2	-	4/50	-	4/50	0,11	58.3
3	-	4/33,3	4/33,3	4/33,3	0,12	59.0
4	-	2/25	2/25	4/50	0,09	56.0
5	-	-	-	4/100	0,04	8.1
6	-	-	4/50	4/50	0,02	5.1

*ПБХ-первичная биомасса хлореллы. **ОБХ - остаточная биомасса хлореллы, после получения биодизеля.

В биореакторы заливали по 600 мл отфильтрованной водопроводной воды (рН=6,3). Для измерения объемов образующегося биогаза использовали счетчики. Биореакторы (метантенки), счетчики и газовые линии предварительно продували азотом для удаления кислорода. Полученный биогаз хранили в газовых мешках. Биореакторы находились в термобоксе при постоянной температуре ($t=35\pm 2$ °С) для обеспечения мезофильного режима брожения. Периодически осуществляли контроль состава биогаза в реакторах при использовании газовых линий для подключения газоанализатора. Для предотвращения образования плавающей корки содержимое биореакторов ежедневно перемешивали. Эксперименты продолжались до 32 суток.

Удаленный контроль процессов биоразложения проводили с использованием разработанной системы с программным обеспечением, установленным на персональном компьютере. Данные по объему выделенного биогаза со счетчиков фиксировали программным обеспечением. Схема разработанной лабораторной установки представлена на Рисунке 1. Для определения компонентного состава биогаза непосредственно в биореакторе, предложена схема (Рисунок 2) с использованием портативного газоанализатора GA2000.

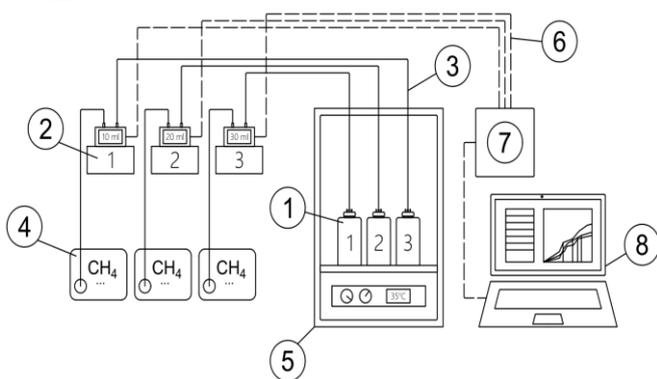


Рисунок 1 – Схема для определения выделяемого биогаза: 1 – биореакторы; 2 – газовые счетчики; 3 – газовые линии; 4 - мешки для сбора биогаза; 5 - термобокс; 6-8 информационно-аналитический комплекс

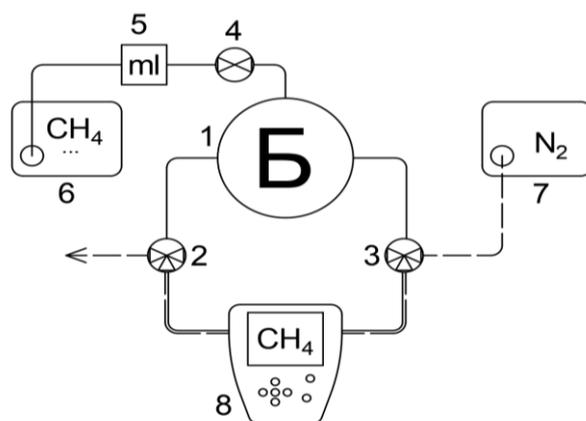


Рисунок 2 – Схема определения компонентного состава биогаза с газоанализатором GA2000: 1 – биореактор; 2,3 – трехходовые краны; 4 – двухходовой кран; 5 – газовый счетчик; 6,7 – газовые мешки; 8 – газоанализатор

Для установления влияния добавок биомассы микроводорослей использованы следующие композиционные смеси для закладки в биореакторы:

- 1 - первичная биомасса микроводоросли *C. sorokiniana* + инокулянт;
- 2 - остаточная биомасса микроводоросли *C. sorokiniana* + инокулянт;
- 3, 4 - остаточная биомасса микроводоросли *C. sorokiniana* с добавлением пищевых отходов и инокулянта;
- 5 – инокулянт;
- 6 - пищевые отходы и инокулянт (контроль).

Композиционные смеси в пересчете на органический углерод загружали в биореакторы во влажном состоянии (Таблица 1).

На Рисунке 3 приведены данные удельной эмиссии биогаза (л/г орг. углерода) при различной закладке смесей (Таблица 1). Анализ данных, представленных на Рисунке 3 и в Таблице 1, показал, что низкая интенсивность выхода биогаза практически из всех биореакторов происходила в течение первых 10 дней. Из биореакторов №1 и №2 выход биогаза интенсифицировался только на 10-е сутки с момента их загрузки; в биореакторах №3 и №4 интенсификация наблюдалась только на 18-е сутки.

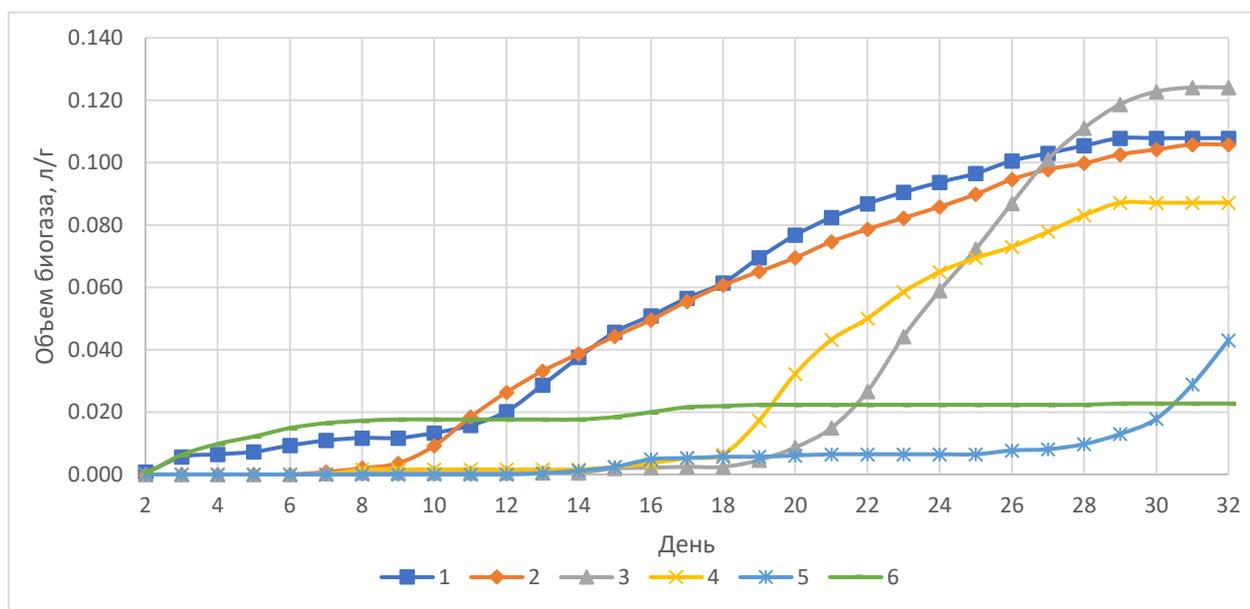


Рисунок 3 – Графики удельной эмиссии биогаза из биореакторов с остаточной биомассой микроводоросли *C. sorokiniana*. 1-6 номера биореакторов (см. Таблицу 1) (с 95 % доверительным интервалом)

Замедленный выход биогаза из реактора № 6 начался на 2-е сутки и прекратился на 9-е сутки. По результатам проведенных экспериментов (таблица 1) установлено, что оптимальный состав композиционной смеси «**ОБХ+ инокулянт + пищевые отходы**» определяется соотношением **33,3/33,3/33,3 %** по органическому углероду.

Следует отметить, что содержание инокулянта в композиционной смеси оказывает более существенное влияние на удельный выход биогаза, по сравнению с пищевой добавкой. В Таблице 2 приведены данные состава биогаза в биореакторах на 32-е сутки с начала эксперимента. Биогаз, полученный из всех биореакторов, содержит, кроме метана, сероводород, углекислый газ, кислород и др.

Таблица 2 – Компонентный состав биогаза из биореакторов с различной закладкой композиционных смесей (Таблица 1) (с 95 % доверительным интервалом)

№ био-реактора	Метан CH ₄ , % об.	Диоксид углерода CO ₂ % об.	Кислород O ₂ % об.	Серо-водород H ₂ S (ppm)	Остальные газы % об.	Эмиссия биогаза (л) за 32 дня	Удельная эмиссия, л/г орг. углерода
1	58,6	20,4	0,3	146	20,7	0,84	0,12
2	59,0	19,6	0,2	40	21,2	0,85	0,11
3	58,3	27,0	0,2	280	14,5	1,49	0,12
4	56,1	22,5	0,2	55	21,2	0,70	0,09
5	8,2	12,9	1,7	110	77,2	0,34	0,04
6	5,3	23,3	0,1	37	23,5	0,18	0,02

В 3.2 представлено исследование процессов разложения ОО композиционной смеси остаточной биомассы ряски рода *L. minor* (ОБР, отход после получения пигментов) для получения биогаза с высоким содержанием метана. ПБР – первичная биомасса ряски.

Программой проведения лабораторных экспериментов с биомассой ряски *L. minor* была предусмотрена подготовка следующих композиционных смесей для закладки в биореакторы: 1- ПБР +инокулянт; 2-ОБР + инокулянт; 3,4 - ОБР+инокулянт+ пищевые отходы; 5-инокулянт (контрольный образец).

На Рисунке 4 и в Таблицах 3, 4 даны результаты по эмиссии биогаза (л/г орг. углерода) из биореакторов в течение 32 суток в зависимости от содержания и состава смесей; приведены сведения о содержании в биогазе метана и других газовых составляющих (диоксид углерода, кислород, сероводород).

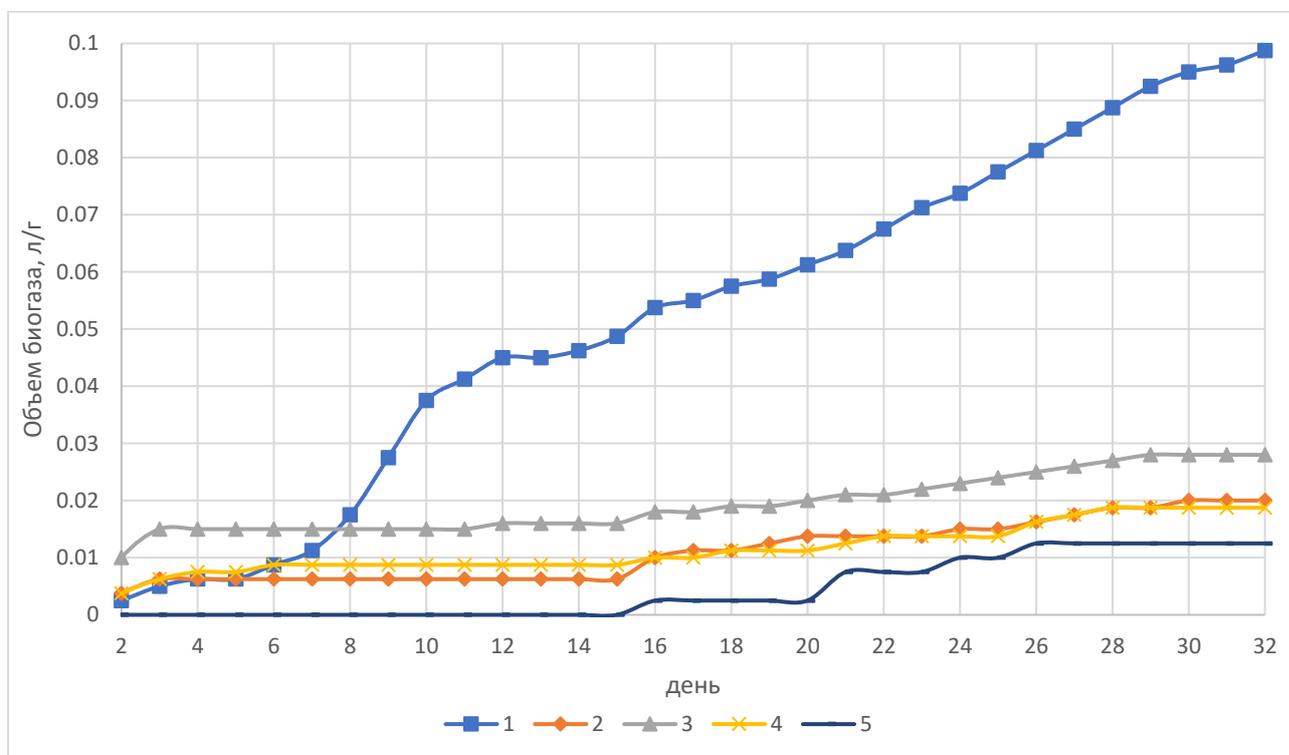


Рисунок 4 – Графики удельной эмиссии биогаза из биореакторов с добавкой ОБР *Letna minor*. 1-5 - номера биореакторов (Таблица 2) (с 95 % доверительным интервалом)

Таблица 3 –Содержание композиционных смесей при добавке ряски *L. minor*, выход биогаза, содержание метана (с 95 % доверительным интервалом)

№ биореактора	ПБР*, г/%	ОБР**, г/%	Пищевые отходы, г/%	Инокулянт, г/%	Удельный выход биогаза, л/г орг. углерода	% СН ₄ в составе биогаза
	по органическому углероду					
1	4/50	-	-	4/50	0,099	45,5
2	-	4/50	-	4/50	0,020	6,2
3	-	2/20	4/40	4/40	0,028	11,0
4	-	2/25,5	2/25,5	4/50	0,019	2,3
5	-	-	-	4/100	0,013	7,6

*ПБР - первичная биомасса ряски; **ОБР- остаточная биомасса ряски, после извлечения пигментов

Полученные результаты свидетельствуют о том, что за период проведения эксперимента наибольший удельный выход биогаза (0,078 л/г орг. углерода) наблюдался из биореактора №1, загруженного ПБР (50 %) + инокулянт (50 %). Содержание метана на 32-е сутки составило 45,5 % об.

По сравнению с остаточной биомассой микроводоросли *C. sorokiniana*, биогазовый потенциал которой составил 0,063-0,088 л/г орг. углерода, при содержании метана 56-59 % об., биогазовый потенциал ОБР *L. minor* в 4-5 раз ниже и составил 0,015-0,02 л/г орг. углерода, при содержании метана 2,3-11 % об., что определяет нецелесообразность её использования при сбраживании органических отходов для получения биогаза.

Таблица 4 – Компонентный состав биогаза из биореакторов с различной закладкой композиционных смесей (Таблица 4) (с 95 % доверительным интервалом)

№ био-реактора	СН ₄ , % об.	СО ₂ , % об.	О ₂ , % об.	Н ₂ S (ppm)	Остальные газы % об.	Эмиссия биогаза (л.) за 32 дня	Удельная эмиссия л/г орг. углерода
1	45.5	19.1	0.20	7	35.2	0,79	0,099
2	6.2	17.9	0.30	146	75.6	0,16	0,020
3	11,0	22,9	0,04	21	65,7	0,28	0,028
4	2.3	18.3	0.30	26	79,0	0,15	0,019
5	7.6	10.1	0.40	38	81.9	0,05	0,013

В 3.3 представлено исследование процессов разложения ОО для получения биогаза с высоким содержанием метана при добавлении пивной дробины (ПД), образующейся после изготовления пивной продукции и отработанной (ОПД_ф), после фильтрации пивной дробинной сточной воды предприятия пивоваренного производства. Доля ПД в отходах пивоваренного производства доходит до 80 %.

В 8 биореакторов загружались ПД (биореакторы 1-4), ОПД_ф (5-8) и инокулянт в различных пропорциях. Общая масса загружаемых в биореакторы образцов в пересчете на органический углерод, составила 8-12 г. Эксперимент продолжался 32 дня. На Рисунке 5 приведены кривые удельной эмиссии биогаза (л/г орг. углерода) при различной закладке смесей в реакторах.

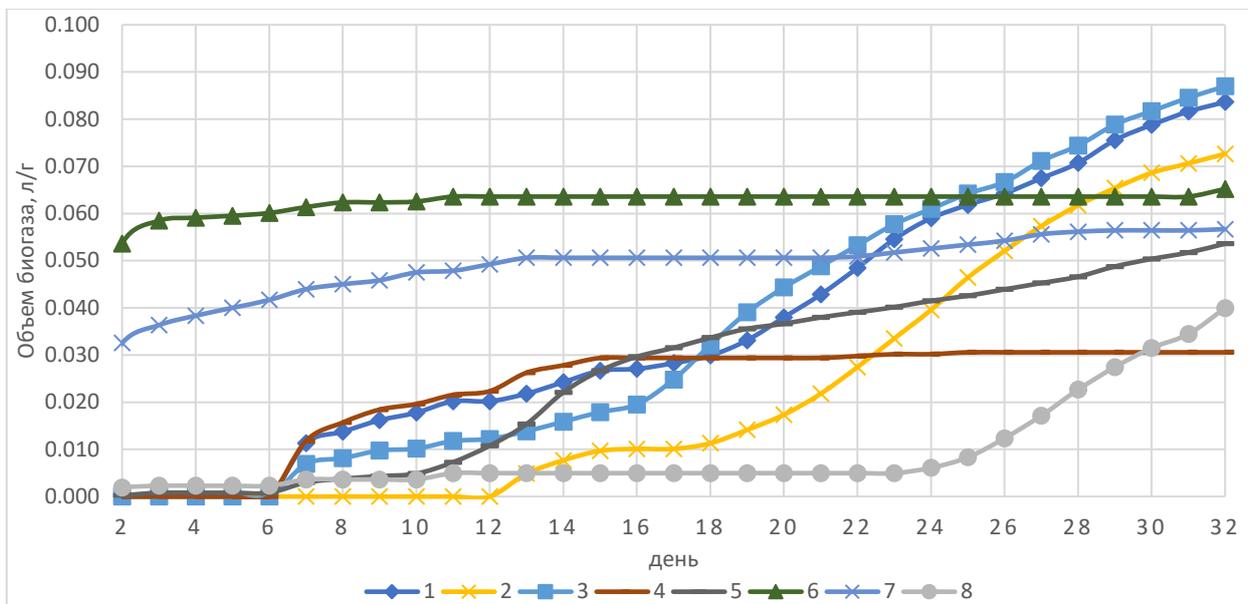


Рисунок 5 – Эмиссия биогаза из биореакторов № 1-8 (состав композиций соответствует данным Таблицы 6)

В Таблице 6 приведены данные об эмиссии биогаза (л/г орг. углерода) и концентрации метана из биореакторов в течение 32 суток в зависимости от содержания и состава композиционных смесей.

Таблица 5 – Содержание композиционных смесей при добавке пивной дробины, выход биогаза и содержание метана (с 95 % доверительным интервалом)

№ биореактора	ПД*, г/%	ОПДф**, г/%	Пищевые отходы, г/%	Инокулянт, г/%	Удельный выход биогаза л/г орг углерода	% метана в составе биогаза
	по органическому углероду					
1	4/50	-	-	4/50	0,084	46,2
2	6/75	-	-	2/25	0,073	23,4
3	2/25	-	-	6/75	0,087	30,3
4	8/100	-	-	-	0,031	8,2
5	-	4/33,3	4/33,3	4/33,3	0,054	40,4
6	-	6/60	-	4/40	0,065	6,7
7	-	2/16,6	6/50	4/33,3	0,057	27
8	-	-	-	8/100	0,040	17,1

*ПД-пивная дробина, **ОПДф-остаточная пивная дробина, образующейся после фильтрации пивной дробинной сточной воды предприятия пивоваренного производства

Наибольший удельный объем биогаза биореакторах с добавкой из ПД образовался в биореакторах № 1 и 3 и составил: $\approx 0,084$ и $0,087$. В биореакторах с добавкой из ОПДф - в биореакторе №6 ($0,065$ л/г орг. углерода), однако концентрация метана составила лишь $6,7$ %. Наибольшая концентрация метана на 32-е сутки эксперимента в биореакторах с добавками из ОПДф составила $40,4$ % (биореактор №5) при удельной эмиссии $0,054$ л/г орг. углерода.

Для повышения точности анализ биогаза проводили на газоанализаторе GA2000+ и на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000, при этом были получены схожие результаты (Рисунок 6, Таблица 6).

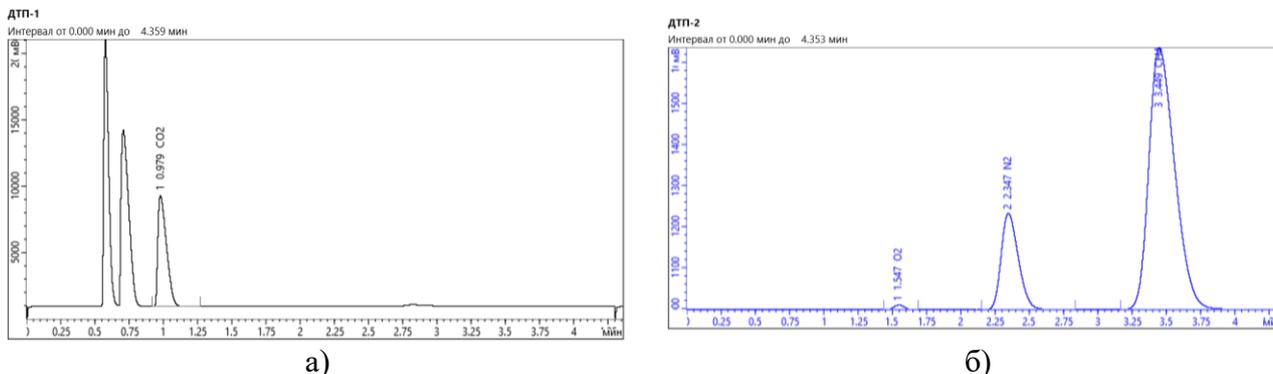


Рисунок 6 - Хроматограмма биогаза из биореактора №5: а – детектор ДТП-1 (CO₂); б – детектор ДТП-2 (O₂, N₂, CH₄)

Таблица 6 - Сравнительный анализ состава биогаза методом газовой хроматографии и с помощью газоанализатора

№ биореактора	Хроматэк-Кристалл 5000		GA2000+	
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
1	41,17	21,77	40,4	22,3
6	2,8	5,39	6,7S	11,6
7	30,05	23,54	27,0	21,4

Сравнением использованных добавок для увеличения биогазового потенциала ОО установлено, что наиболее эффективной добавкой является ОБХ; далее следует ОПДф, используемая для фильтрации сточных вод пивоваренного производства, и замыкает ряд добавка ОБР (Таблица 8).

Таблица 7 - Сравнительный анализ влияния различных добавок в композиционных смесях на выход биогаза и содержание в нем метана (с 95 % доверительным интервалом)

Добавка	Пищевые отходы, г/%	Инокулянт, г/%	Удельный выход биогаза, л/г орг углерода	% метана в составе биогаза
ОБХ 4/33,3	4/33,3	4/33,3	0,12	59,0
ОПДф 4/33	4/33	4/33	0,054	40,4
ОБР 2/20	4/40	4/40	0,028	11,0

Из Таблицы 7 видно, что наибольшая эмиссия биогаза (0,12 л/г орг. углерода) с высоким содержанием метана (59 %) образуется при добавке в композиционные смеси ОБХ. При сравнительном анализе отработанных материалов, которые являются отходами производств, установлено, что удельный выход биогаза и концентрация в нем метана увеличиваются в ряду:

$$\text{ОБР} - (V=0,028 \text{ л/г, CH}_4=11 \%) < \text{ОПДф} (V=0,054 \text{ л/г, CH}_4=40,4 \%) < \text{ОБХ} (V=0,12 \text{ л/г, CH}_4=59 \%)$$

Для материалов, которые являются ресурсами, удельный выход биогаза и концентрация в нем метана увеличиваются в ряду:

$$\text{ПД} - (V=0,087 \text{ л/г, CH}_4=46,2 \%) < \text{ПБР} (V=0,099 \text{ л/г, CH}_4=45,5 \%) < \text{ПБХ} (V=0,11 \text{ л/г, CH}_4=58,7 \%)$$

Для всех материалов удельный выход биогаза и концентрация в нем метана при общем сравнении увеличиваются в ряду:

$$\text{ОБР} - (V=0,028 \text{ л/г, CH}_4=11 \%) < \text{ОПДф} (V=0,054 \text{ л/г, CH}_4=40,4 \%) < \text{ПД} - (V=0,087 \text{ л/г, CH}_4=46,2 \%) < \text{ПБР} (V=0,099 \text{ л/г, CH}_4=45,5 \%) < \text{ПБХ} (V=0,11 \text{ л/г, CH}_4=58,7 \%) < \text{ОБХ} (V=0,12 \text{ л/г, CH}_4=59 \%)$$

Полученные результаты в лабораторных метантенках, позволяющие получать биогаз с высоким содержанием метана (до 59 %), моделируют процессы, происходящие в теле полигона ТКО. Поэтому нами в дальнейшем предлагается интерпретировать данные исследования на полигоны ТКО.

В главе 4 приведены результаты мониторинга эмиссии биогаза с полигона ТКО.

В 4.1 проанализированы работы по зонированию поверхности полигона ТКО, измерению валового выброса биогаза на участках его поверхности и определению концентрации входящих в состав биогаза компонентов. Для этого проводили работы по измерению эмиссии биогаза и установлению процентного содержания компонентов в его составе. На основании полученных данных при помощи алгоритма IDW в программном комплексе MapInfo 12 строили двухмерные тематические карты содержания компонентов биогаза (CH_4 , CO_2 , O_2 и H_2S) на глубине 50 см от поверхности полигона (Рисунок 7). Результаты анализа показали, что во многих точках отбора биогаз содержит метан более 50 % (Рисунок 7 а, красный цвет), что позволяет рекомендовать эти точки как основные при установке скважин для выхода биогаза. По результатам измерений концентраций компонентов биогаза был выявлен перспективный участок для бурения скважин выхода биогаза из внутреннего «метанового пузыря» с высокой концентрацией метана (50 и более % (об.) (Рисунок 7 б, зелёная линия). Бурение скважин позволит обеспечить выход биогаза, снижая взрыво - и пожароопасность полигона при одновременном снижении загрязнения атмосферы парниковым газом.

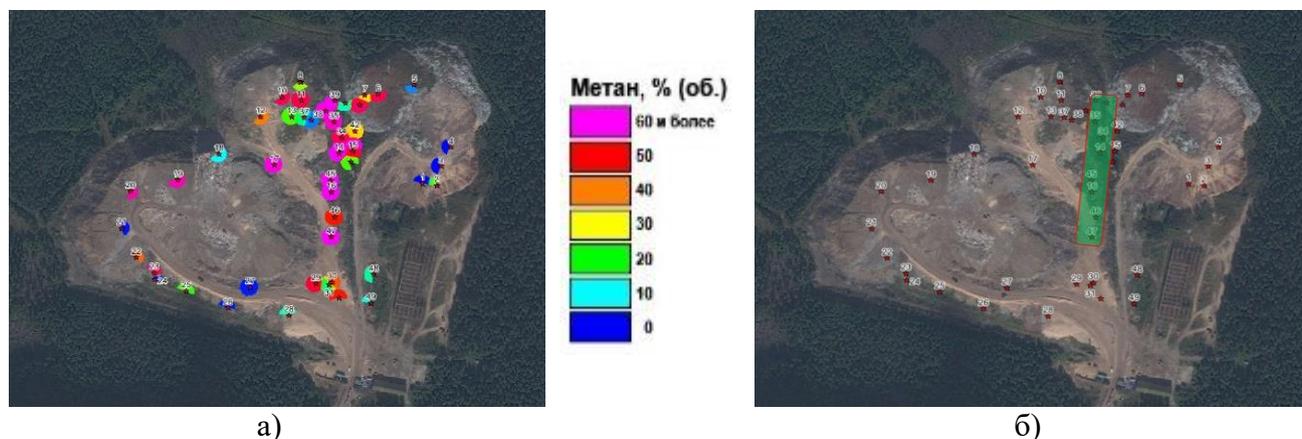


Рисунок 7 - Фото полигона с указанием: а - концентрации метана на глубине 50 см от поверхности полигона; б - зоны для бурения скважин

В 4.2 представлены разработанные предложения по повышению биогазового потенциала существующих полигонов ТКО. Для обеспечения безопасности полигона и получения дополнительной энергии разработана система дегазации (Рисунок 8). В теле полигона (1) с высокой концентрацией метана (Рисунок 7 б, зеленый участок) бурят скважины (2) и устанавливают трубы на глубину 35 - 50 м с шагом 20 - 25 м. Их соединяют с системой трубопроводов для откачки биогаза на газосборную станцию (5). Конденсат с помощью конденсатоотводчиков (3, 6) возвращают в тело полигона. Биогаз направляют на компрессорную станцию (7) для получения сжатого газа для

теплоэлектростанции (10) и выработки электроэнергии. Остаточный газ сжигают в факельной установке (8). Электроэнергия через трансформатор (11) и линию электропередач (12) используется на полигоне.

Для повышения биогазового потенциала полигонов ТКО можно также внедрить систему орошения свалочных масс (Рисунок 9) очищенным фильтратом (4) и с добавлением ОБХ (5). При этом одновременно решается несколько важнейших эколого-энергетических проблем: 1- утилизация ОБХ; 2- повышение биогазового потенциала полигонов ТКО путем ускорения анаэробного разложения ОО.

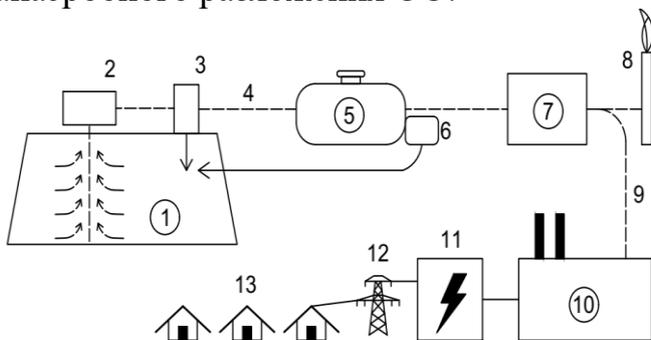


Рисунок 8 - Схема активной дегазации и утилизации свалочного газа в электроэнергию:

- 1-полигон; 2-газовая скважина;
- 3,6 – конденсатороотводчики; 4 - газосборный трубопровод; 5 – газосборная станция;
- 7 – компрессорная станция; 8 - факельная установка; 9 – газовый трубопровод;
- 10 – теплоэлектростанция; 11 - трансформатор;
- 12 – линия электропередач;
- 13 – административные здания

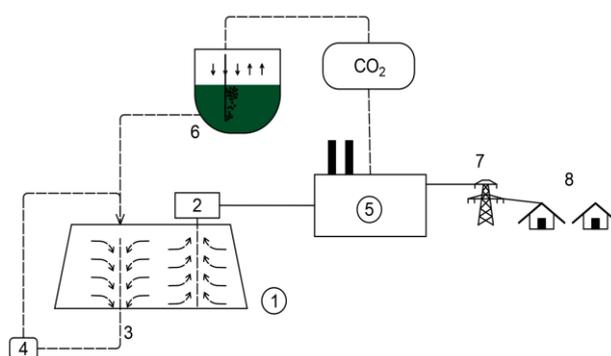


Рисунок 9 – Схема системы орошения полигона с целью увеличения активной дегазации свалочного газа:

- 1 – полигон ТКО; 2- система дегазации;
- 3- фильтрат; 4 – система очистки фильтрата; 5 – ТЭЦ; 6 – культиваторы микроводорослей; 7- ЛЭП;
- 8 – потребители электроэнергии

Помимо орошения очищенным фильтратом с добавкой ОБХ предлагается проводить дополнительную продувку воздухом. В результате предложенных мероприятий время эмиссии газов от полигона сократится с 50 до 30 лет. А активная фаза эмиссии биогаза сократится с 30 до 20 лет.

Для сравнительного анализа биогазового потенциала ТКО на полигоне по расчетам различных моделей эмиссии биогаза без и с добавкой ОБХ (Таблица 8) за основу была взята «Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов» от 01.01.2021.

$$Q = 10^{-6}R(100 - W)(0,92Ж + 0,62У + 0,34Б)$$

где Q – удельный выход биогаза за период его активной генерации, кг/кг отходов; R - содержание органической составляющей в отходах, %; $Ж$ - содержание жироподобных веществ в органике отходов, %; $У$ - содержание углеводов в органике отходов, %; $Б$ - содержание белковых веществ в органике отходов, %; $R, Ж, У$ и $Б$ - определяются анализами отбираемых проб отходов, W - влажность отходов.

Таблица 8 - Сравнительный анализ биогазового потенциала ТКО на полигоне по расчетам различных моделей эмиссии биогаза из полигонов ТКО без и с добавкой ОБХ

Модели	Эмиссия биогаза, м ³ /т ТКО	Эмиссия СН ₄ , м ³ /т ТКО	Содержание СН ₄ , %
Табасарана - Ретгенбергера	187,0-247,0		
LandGEM	200,0-340,0	100,0-170,0	50
IPCC	120,0-130,0	60,0-65,0	50
CLEEN	-	24,7-113,6	-
Методика РФ (ТКО полигонов)	100,0-180,0	53,0-95,4	53
Методика РФ (ТКО полигонов +33% ОБХ)	100,0-180,0	59,0-106,0	59

Из Таблицы 8 видно, что добавка ОБХ увеличивает выход метана более чем на 6 м³ с тонны ТКО. Следовательно, используя добавки ОБХ, мы можем управлять биогазовым потенциалом полигонов ТКО.

В 4.3 Предложена комплексная схема обращения с ТКО с отделением органических отходов и их дальнейшей анаэробной переработкой в метантенках с получением биогаза и биогумуса. На сегодняшний момент органические отходы не собираются селективно и попадают в общую массу на линию сортировки и затем на полигон ТКО, что приводит к нерегулируемым выбросам биогаза из тела полигона. Согласно Указу Президента РФ № 474 от 21 июня 2020 г. к 2030 г., захоронение отходов, которые возможно перевести во вторичные ресурсы и вторичное сырье, на полигонах должно быть запрещено.

Пищевые отходы могут быть использованы в качестве вторичного сырья для получения биогаза и биогумуса. Биогаз может использоваться в качестве топлива для получения энергии, а биогумус - в качестве удобрений для повышения плодородия почв или при ремедиации грунта полигона после переработки и утилизации накопленного экологического вреда. При существующей схеме обращения с ТКО пищевые отходы загрязняются остальными компонентами ТКО и становятся непригодными для получения чистого биогумуса. Следовательно, внесение изменений в схему обращения с ТКО становится необходимым и рациональным процессом. Поэтому нами предложена схема сортировки и использования органических отходов (Рисунок 10, выделение красной линией), в которой предусмотрены селективный сбор и отделение органических отходов на месте образования. Это позволит избежать загрязнения других вторично используемых компонентов ТКО (бумага, пластик, металл и др.). Селективно собранные ОО предлагается подвергать анаэробному сбраживанию в метантенках с целью получения биогаза и биогумуса. Для повышения биогазового потенциала ОО в процессе анаэробной обработки предлагается вносить добавку из ОБХ, а СО₂, образованный при сжигании биогаза, рекомендуется использовать в качестве источника неорганического углерода для культивирования микроводоросли. Полученная биомасса микроводоросли используется для получения биодизеля, а остаточная биомасса в качестве добавки подается в метантенк. Данная схема соответствует принципам циркулярной экономики и позволяет получить несколько ценных

компонентов (биогаз, биогумус, биодизель) с высокой добавленной стоимостью.



Рисунок 10 - Схема сортировки и анаэробной переработки ОО с со- субстратом из микроводоросли (-----предложения по изменению обращения с ОО)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнение влияния добавок биомасс выявило наиболее эффективную - остаточную биомассу *C. sorokiniana*. Установлен оптимальный состав композиционной смеси для получения биогаза с использованием добавки ОБХ, который определяется соотношением по органическому углероду, %: ОБХ (33,3 %) + инокулянт (33,3 %) + пищевые отходы (33,3 %). Предложен эффективный способ использования добавок *C. sorokiniana*, ряски *L. minor*, пивной дробины для активизации биогазового потенциала органических отходов.

2. Проведен экологический мониторинг эмиссии биогаза на полигоне ТКО, характерного для северо-западного региона РФ и установлен его качественный и количественный состав; разработан комплекс мер по зонированию территории полигона, выделяя зоны с максимальной эмиссией биогаза и высоким содержанием метана (более 50 %); бурения скважин для его сбора и дальнейшего использования в качестве биоэнергоресурса.

3. Предложена рациональная схема полигона ТКО, оснащённая системами дегазации; схемой сортировки отходов и использования отсортированных органических отходов (ОО) для анаэробного сбраживания с получением биогаза при одновременном значительном снижении эмиссии вредных и токсичных выбросов в окружающую среду, что позволит предотвратить самовозгорание и обеспечить строения полигона собственной электроэнергией.

4. Предложена комплексная схема обращения с ТКО, в которой предусмотрены селективный сбор и отделение органических отходов на месте образования и их дальнейшая анаэробная переработка в метантенках с получением биогаза и биогумуса.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых **ВАК РФ** и индексируемых в международных базах данных **Scopus** и **WoS**:

1. Получение биогаза из органических отходов на полигонах путем анаэробного сбраживания и дальнейшее его преобразование в биоводород / **В.В. Жажков**, Н.А. Политаева, К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич, Б.Х. Норов // Альтернативная энергетика и экология - 2023. - Т 11. №416. - С. 99-113. (**SCOPUS, Q1**)
2. Production of Biohydrogen from Microalgae Biomass after Wastewater Treatment and Air Purification from CO₂ / Ksenia Velmozhina; Polina Shinkevich; Viacheslav Zhazhkov; Natalia Politaeva; Vadim Korablev; Iaroslav Vladimirov; Tania Carbonell Morales // Processes. - 2023. №10., p. 23-28. (**SCOPUS, Q2**)
3. Biogas potential assessment of the composite mixture from duckweed biomass / A. Chusov, V. Maslikov, V. Badenko, **V. Zhazhkov**, D. Molodtsov, Y. Pavlushkina // Sustainability (Switzerland), 2022. - №14 (1). - pp. 351 - 357. (**SCOPUS, Q2**)
4. Исследование и оценка состава биогаза на полигоне ТКО и рекомендации по его использованию / **В.В. Жажков**, А.Н. Чусов, Н.А. Политаева // Экология и промышленность России. - 2021.- Т.25.- №5.- С.4 - 9., (**ВАК, SCOPUS Q2**)
5. Комплексное использование микроводорослей в очистке сточных вод и переработке отходов пищевой промышленности / Н.В. Зибарев, **В.В. Жажков**, М.Ю. Андрианова, Н.А. Политаева, А.Н. Чусов, В.И. Масликов // Экология и промышленность России. - 2021.- Т. 25.- №11.- С. 18-23. (**ВАК, SCOPUS, Q2**)
6. Интенсификация процессов получения биогаза при использовании добавки из микроводорослей / **В.В. Жажков**, Н.А. Политаева, А.Н. Чусов, В.И. Масликов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. - 2020. – Т.4.- №40.- С. 41 - 53. (**ВАК**)
7. Использование и утилизация сорбентов хитозан - остаточная биомасса микроводорослей *Chlorella sorokiniana* / Ю.А. Смятская, А.А. Фазуллина, Н.А. Политаева, **В.В. Жажков**, Ю.Е. Павлушкина, И.В. Долбня // Экология и промышленность России. - 2019.- Т.23.-№9.- С. 18-23. (**ВАК, SCOPUS, Q2**)
8. Assessment of zonal distribution of methane on MSW landfills in northern regions for its usage in local power engineering / A.N. Chusov, V.I. Maslikov, D.V. Molodtsov, **V.V. Zhazhkov**, O.A. Riabuokhin // Magazine of Civil Engineering – 2015 - V.58.-N.6, pp. 44–55, (**SCOPUS Q3**).
9. Model calculation of energy carriers expenses on the basis of biogas in system reformer - fuel cell for autonomous power supply systems / **V. Zhazhkov**, M. Zubkova, V. Maslikov, D. Molodtsov, A.Chusov // Applied Mechanics and Materials.- 2015.- Т. 725.- P. 1602 - 1607. (**SCOPUS Q3**).

Патенты

10. Патент РФ № 2797838 от 08.06.2023 Способ утилизации углекислого газа с применением микроводоросли рода *Chlorella*» МПК / Н.А. Политаева, **В.В. Жажков**, Н.В. Зибарев, К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич - заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СПбПУ Петра Великого. № заявки заявл. 2022119015 от 12.07. 2022. // www1.fips.ru
11. Заявка на патент № 2023115629 от 15.06.2023. Способ увеличения биогазового потенциала органосодержащих отходов / Н.А. Политаева, В.И. Масликов, А.Н. Чусов, **В.В. Жажков**, К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич - заявитель и патентообладатель СПбПУ Петра Великого.

Статьи в прочих научных изданиях:

12. Determination of biogas potential of residual biomass of microalgae *Chlorella sorokiniana* / A. Chusov, V. Maslikov, **V. Zhazhkov**, Y. Pavlushkina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019.-Vol. 403.-pp. 885-889

13. MSW Landfills Reclamation Based on Monitoring of Biogas Emissions / V. Maslikov, A. Chusov, **V. Zhazhkov**, O. Vasilyeva // Advances in Intelligent Systems and Computin.- 2018.- V. 692. - pp. 908-914.

14. Повышение биогазового потенциала очистных сооружений малого города путём совместной ферментации осадков с бытовыми отходами // А.С. Семернев, **В.В. Жажков**, А.Н. Чусов / Сборник материалов. XXII Международный Биос-форум и Молодежная Биос-олимпиада 2017. С. 200-207.

15. Technological Decision to Renewable Energy Usage Biogas for Off-grid Systems Consumption / M. Zubkova, V. Maslikov, D. Molodtsov, A.Chusov, **V. Zhazhkov**, A. Stroganov // MATEC Web of Conferences, 2016, Vol. 73.-pp 11-16

16. Biogas emission assessment of municipal solid waste landfills in regions of the Russian Federation with severe climatic conditions / A.N. Chusov, **V.V. Zhazhkov**, V.I. Maslikov // Studies in social sciences, humanities and engineering the second joint research publication of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University and Kymenlaakso University of Applied Sciences. Kouvola.- 2015.- P. 96-103.