

На правах рукописи

ЛИЛЛЕПЯРГ Елена Руубеновна

**Методика определения энергетического потенциала
полигонов твердых бытовых отходов**

Специальность 05.14.08

«Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2004

Работа выполнена на кафедре «Возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель - доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Масликов Владимир Иванович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Семин Евгений Геннадиевич

- кандидат технических наук
Делюкин Алексей Семенович.

Ведущая организация – Отдел электроэнергетических проблем РАН

Защита состоится «___» _____ 2004 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, гидротехнический корпус II, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «___» _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Орлов В.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Необходимость энергосбережения и снижения загрязнения окружающей среды заставляет более рационально использовать традиционные энергоресурсы, а также искать другие, желательно возобновляемые и недорогие источники энергии, к которым в последнее время все чаще относят твердые бытовые отходы (ТБО). Бытовые отходы, образующиеся в значительных количествах, как правило, не находящие применения и загрязняющие окружающую среду, являются возобновляемыми вторичными энергетическими ресурсами. Перспектива использования ТБО в энергетических целях весьма привлекательна, так как одновременно позволяет решать актуальные проблемы загрязнения окружающей среды урбанизированных территорий. Это направление активно развивается во многих зарубежных странах. В России разработкой экологически безопасных технологий энергетической утилизации ТБО занимаются АКХ им. К.Д. Памфилова, ВНИПИэнергопром, ВТИ, Институт проблем электрофизики РАН, СПбГПУ, МЭИ, НИИЦЭБ РАН и др.

Представляет интерес возможность сбора биогаза, продуцируемого на полигонах и свалках России, на которых захоранивается около 97 % бытовых отходов, и его использование в качестве энергетического сырья. Ежегодная эмиссия метана – ценного энергетического компонента биогаза, превышает 1 млрд. м³/год. Этот потенциал в настоящее время практически не используется. Большой вклад в изучение состояния полигонов, процессов разложения отходов, газовых эмиссий, разработку технологий сбора и утилизации биогаза, решение сопутствующих экологических проблем внесли работы Н.Ф. Абрамова, Я.И. Вайсмана, В.К. Донченко, В.В. Журковича, Г.А. Заварзина, В.В. Елистратова, Ю.М. Лихачева, А.Б. Лифшица, Е.Е. Мариненко, А.Н. Мирного, А.Н. Ножевниковой, Е.С. Панцхава, В.В. Разнощика, Г.С. Розенберга, Е.Г. Семина, М.П. Федорова, Б. Вебера, Р. Коссу, О. Табасарана, Р. Штегманна и других. Результаты их исследований подготовили теоретические и практические основы для моделирования процессов разложения бытовых отходов, создали предпосылки для оценки биогаза в качестве энергетического сырья.

Практическое использование биогаза на полигонах ТБО требует определения реального энергетического потенциала, величина которого зависит от множества факторов. Российским полигонам присущи специфические особенности, связанные с составом бытовых отходов, технологией складирования, природно-климатическими условиями и др., что требует конкретизации накопленных знаний, уточнения математических моделей для прогнозирования эмиссии биогаза и содержания в нем метана, в том числе с использованием лабораторного эксперимента.

Актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью получения достоверных данных по энергетическому потенциалу полигонов ТБО и разработки методики оценки энергетического потенциала полигонов ТБО, учитывающей их специфические особенности.

Цель диссертационной работы – разработка методики оценки энергетического потенциала полигонов ТБО. В соответствии с поставленной целью решаются следующие задачи:

- анализ математических моделей эмиссии биогаза при разложении ТБО и выбор базовой модели;
- уточнение эмиссии и состава биогаза с помощью лабораторных исследований процессов разложения бытовых отходов;
- построение геометрической модели тела полигона на основе его параметров, данных по объему, составу и месту захоронения отходов;
- создание интегральной математической модели эмиссии биогаза и метана и ее распределение в пространстве с использованием результатов лабораторного эксперимента и модели тела полигона;
- разработка схемы комплексного использования энергетического потенциала полигона ТБО в составе энергоустановки, утилизирующей биогаз, и ветроэнергетической установки.

Новые научные результаты:

1. Разработана методика оценки энергетического потенциала полигона ТБО, с учетом их специфических особенностей.
2. Изучена динамика эмиссии и состава биогаза в лабораторных условиях при разложении опытных образцов отходов.
3. Разработан принцип создания геометрической модели тела полигона ТБО и реализован программно алгоритм моделирования.

4. Разработан и реализован с помощью программных средств алгоритм создания интегральной модели пространственного распределения эмиссии биогаза и метана с полигона на основе комплексного использования геометрической модели тела полигона, экспериментальных данных и базовых моделей расчета эмиссии биогаза.
5. Разработана схема энергокомплекса на полигоне ТБО в составе энергетической установки, утилизирующей биогаз, и ветроэнергетической установки как дополнительного источника энергии.

Практическая значимость. Разработанная методика и модели могут применяться в научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организациях для оценки эмиссии биогаза и его состава, обоснования и использования энергетического потенциала полигона ТБО. Результаты исследований использовались при выполнении НИР по программам и грантам Минобрнауки РФ, проекта по международной программе «Инкокоперникус».

На защиту выносятся:

1. Геометрическая модель структуры тела полигона.
2. Интегральная модель расчета пространственного распределения интенсивности биогаза и метана с тела полигона ТБО.
3. Результаты экспериментального изучения динамики эмиссии биогаза и метана при разложении ТБО различного состава.
4. Результаты расчетов интенсивности пространственного распределения эмиссии биогаза и метана с тела полигона «Волхонский».

Достоверность научных положений и выводов обусловлена корректным использованием основных положений электроэнергетики, применением научно апробированных методов математического и лабораторного моделирования и подтверждается практическими результатами.

Личный вклад автора заключается в разработке и программной реализации геометрической модели тела полигона, интегральной модели расчета пространственного распределения интенсивности эмиссии биогаза и

метана с тела полигона, участии в лабораторном эксперименте, выполнении конкретных расчетов.

Апробация работы проведена на российских и международных научно-технических конференциях, симпозиумах.

Материалы работы докладывались на четвертом международном семинаре «Зеленая энергетика: от современных технологий к новой философии» (Петрозаводск, 1998), межвузовской научной конференции «XXVII неделя науки СПбГТУ» (Санкт-Петербург, 1999), международной научно-практической конференции «Технология энергосбережения, строительство и эксплуатация инженерных систем» (Санкт-Петербург, 2000), международной научно-технической конференции «Научные проблемы энергетики возобновляемых источников» (Самара, 2000), региональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Научно-методические основы систем обращения с промышленными и бытовыми отходами (на примере Северо-Запада России)» (Санкт-Петербург, 2001), научном семинаре по проекту «Предподготовка и безопасное размещение твердых бытовых отходов и осадков сточных вод для защиты окружающей среды» международной программы «Инкокоперникус-2» (Падуя, Италия, 2002), Политехническом симпозиуме «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» (Санкт-Петербург, 2003), международной научно-практической конференции «Возобновляемая энергетика 2003: состояние, проблемы, перспективы» (Санкт-Петербург, 2003), научных семинарах кафедр «Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетика» СПбГПУ, «Обращения муниципальных отходов» Технического университета Гамбург-Харбург (Германия).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 116 страницах машинописного текста, включает 9 таблиц и 38 рисунков. Библиография содержит 120 наименований.

Краткое содержание работы

Глава 1. Полигонное захоронение бытовых отходов широко практикуется во всем мире. Внимание энергетиков привлекает возможность использования биогаза, образующегося при разложении отходов, из-за

высокого (до 60 %) содержания в нем метана. В течение длительного времени эмиссия биогаза с полигона может составлять от нескольких сотен л/с (малые полигоны) до нескольких м³/с (крупные полигоны). Образующийся на свалках биогаз с начала 80-х г.г. интенсивно добывается во многих странах. В диссертации выполнен анализ технологий энергетического использования свалочного биогаза за рубежом и в России. В России, где эксплуатируется более тысячи полигонов, могут быть осуществлены сотни экономически выгодных проектов использования биогаза. Утилизация биогаза на полигонах ТБО требует знания объемов эмиссий, их интенсивности, содержания метана. До настоящего времени расчет эмиссии биогаза и, особенно, метана, на объектах захоронения бытовых отходов производится без учета специфических особенностей конкретных полигонов. Нередко это приводит к большим расхождениям с натурными данными. Конкретизировать представление о характере эмиссии биогаза и его составе можно при исследованиях на действующих полигонах и с помощью лабораторного эксперимента. Натурные исследования на полигонах не позволяют учесть динамику процесса разложения отходов, а следовательно, прогнозировать эмиссию биогаза.

Наиболее полное и экономически доступное представление о процессе образования свалочного метана позволяет получить лабораторное моделирование, которое в последнее время интенсивно развивается.

Основным энергетическим ресурсом полигонов ТБО является биогаз, однако современные технологии позволяют более полно использовать энергетический потенциал полигонов. Прежде всего, следует отметить, что на вершинах свалочных холмов, достигающих высоты 30 и более метров, как правило, возрастает скорость ветра, что делает их привлекательными для размещения ветроэнергетических установок (ВЭУ). Это позволяет не только рационально использовать территорию полигонов, но и обеспечить энергией местные нужды, в том числе установки по откачке и транспорту биогаза. На полигонах возможно различное сочетание энергоустановок, что позволяет повысить надежность и экономичность энергопроизводства.

Глава 2. К настоящему времени разработано значительное количество математических моделей, целью которых является определение эмиссии биогаза (метана) в зависимости от различных исходных параметров. Разнообразие математических моделей отражает сложность и многообразие

процессов, происходящих на полигонах и, затрудняет выбор универсальной модели газовой эмиссии. Корректный выбор модели можно сделать, только сопоставляя результаты расчета с экспериментальными или натурными данными. Попытка унифицировать расчет эмиссии метана также требует использования большого ряда натуральных данных. Поскольку все натурные исследования весьма трудоемки и их мониторинг требует большого времени, исчисляемого десятилетиями, важнейшим способом моделирования процессов разложения отходов и определения эмиссии биогаза является лабораторный эксперимент.

В диссертационной работе использовалась технология лабораторного моделирования процессов разложения твердых бытовых отходов, разработанная в Германии, позволяющая за 4 – 8 месяцев работы лабораторной установки наблюдать процессы, которые в естественных условиях продолжаются в течение многих десятков лет. Данная технология заключается в том, что исследуемый материал помещают в герметично закрытый биореактор (объемом 100 л), в котором поддерживается мезофильный режим, соответствующий условиям полигона. Влажность отходов обеспечивается рециркуляцией фильтрата. Ускорение разложения отходов обеспечивается за счет периодического обновления фильтрата.

Для пересчета опытных данных на реальные условия в диссертации предлагается использовать зависимость:

$$T_i = T_0 + K_{\text{уск}} \cdot \frac{V_{\text{бri}}}{M_{\text{бр}} \cdot Q_{\text{бр}}}, \quad (1)$$

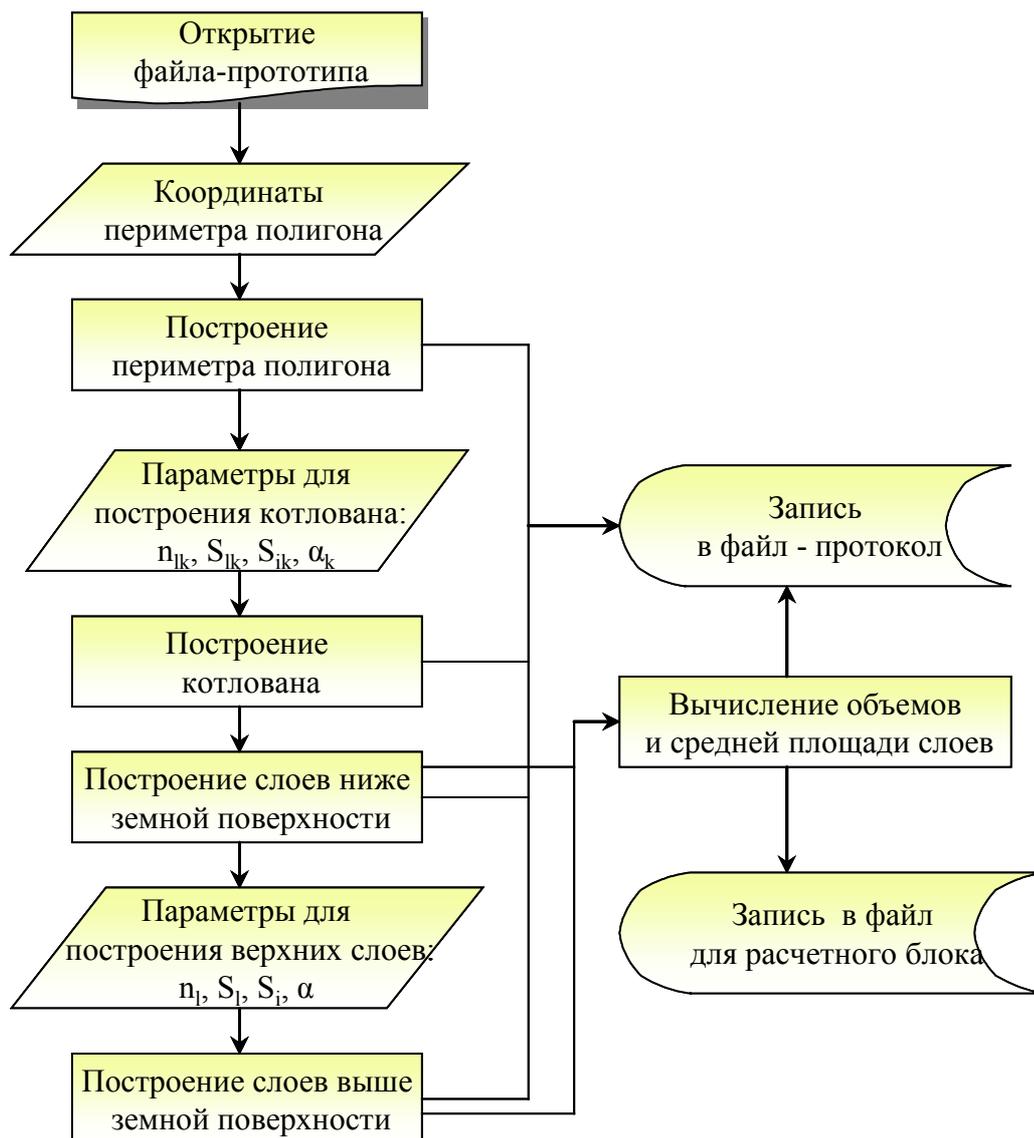
где T_i – год, на который производится прогнозирование; T_0 – год отсчета; $K_{\text{уск}}$ – коэффициент ускорения процессов разложения отходов в биореакторе; $V_{\text{бri}}$ – количество воды, пропущенной на i -й момент времени эксперимента; $M_{\text{бр}}$ – содержание сухого вещества анализируемых отходов в биореакторе; $Q_{\text{бр}}$ – удельный годовой расход добавленной свежей воды в биореактор, л/кг сух.в-ва·год.

Известные математические модели позволяют определить и прогнозировать общую эмиссию биогаза с тела полигона, с помощью натурной газовой съемки можно получить картину эмиссии на текущее время, лабораторные исследования позволяют конкретизировать данные для определенных зон полигона в соответствующих месту отбора проб.

Представляет практический интерес возможность получения данных по эмиссии биогаза в любой точке полигона, однако сделать это с использованием перечисленных методов затруднительно. Сложная конфигурация полигонов, разнообразные объем, толщина свалочных отложений, состав и степень разложения отходов в отдельных частях полигона др. требуют большого количества экспериментальных данных. Задача может быть решена, если создать геометрическую модель тела полигона, позволяющую использовать расчетные и экспериментальные данные. Широкие возможности представляют компьютерные технологии. Их применение позволяет создавать цифровые модели полигонов, прилегающей местности, проводить построение поперечных сечений, учитывать технологию складирования отходов и др.

В диссертации разработан алгоритм и методика создания геометрической модели тела полигона на основе его параметров, данных по составу захораниваемых отходов в расчетном интервале времени. Была создана графическая система, используемая для компьютерного моделирования тела полигона, структура которой представлена на рис. 1. Графический блок системы разработан на языке AutoLISP в среде AutoCAD 14.0 – 2002.

Для оценки биогазового потенциала полигона ТБО необходима гибкая модель эмиссии биогаза, позволяющая учитывать многообразие структуры полигона, использовать традиционные математические модели и данные натуральных и лабораторных экспериментов. С этой целью был разработан и реализован программный комплекс «DEPONIE», включающий графическую систему для моделирования тела полигона и расчетно-аналитический блок (рис. 2). В расчетно-аналитическом блоке, реализованном на языке VBA в среде Excel, происходит считывание информации из текстового файла о созданной пространственной модели тела полигона. В блоке имеются математические модели эмиссии биогаза, которые используются для оценки биогазового потенциала полигона. Выбор математической модели эмиссии биогаза определяется данными лабораторного эксперимента. Приоритет отдается той модели, которая показала лучшее совпадение с результатами эксперимента. Если ни одна из моделей не подходит, за основу принимаются лабораторные данные, пересчитанные на условия конкретного полигона.



Обозначения:

n_{lk} - число слоев ниже земной поверхности;

S_{lk} - толщина слоя отходов ниже земной поверхности;

S_{ik} - толщина слоя изолирующего грунта ниже земной поверхности;

α_k - угол заложения откосов котлована;

n_l - число слоев выше земной поверхности;

S_l - толщина слоя отходов выше земной поверхности;

S_{ik} - толщина слоя изолирующего грунта выше земной поверхности;

α - угол заложения откосов свалочного холма.

Рис. 1. Структура графического блока для автоматизированного построения тела полигона

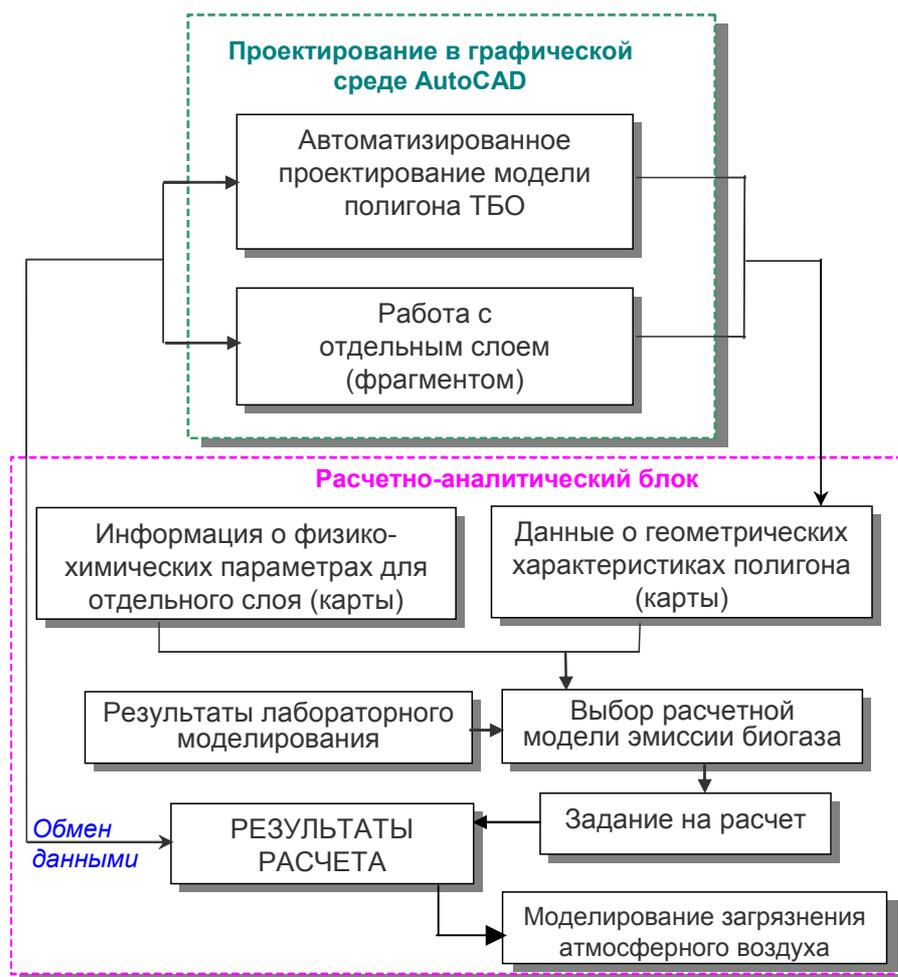


Рис. 2. Структура программного комплекса «DEPONIE»

Имеется возможность учета технологии складирования отходов, их состава, времени захоронения и др.

Глава 3. Расчеты энергетического потенциала производились на примере действующего полигона ПТО-1 «Волхонский» (г. Санкт-Петербург), являющегося одним из крупнейших в России. В настоящее время на полигоне не производится сбор и утилизация биогаза. С использованием программного комплекса «DEPONIE» была построена геометрическая модель тела полигона «Волхонский» с разбивкой на карты складирования, представляющая призматический плоский холм. Для предварительной оценки биогазового потенциала полигона использовалась модель Табасарана, требующая минимальное количество исходной информации.

Уточнение характера эмиссии биогаза с полигона требует проведения лабораторного моделирования процессов разложения ТБО. Для этого был

использован учебно-лабораторный автоматизированный комплекс «Биореактор», созданный в СПбГПУ в рамках проекта «Предподготовка и безопасное размещение твердых бытовых отходов и осадков сточных вод для охраны окружающей среды» международной программы «Инкокоперникус» (научный руководитель – М.П. Федоров).

В рамках программы «Инкокоперникус» с участием автора проводился лабораторный эксперимент по изучению эмиссии биогаза при разложении бытовых отходов в зависимости от их состава. В процессе захоронения отходов на полигоне, продолжающемся длительное время, меняется их состав, что должно учитываться при определении биогазового потенциала полигона. Чтобы оценить влияние состава бытовых отходов на эмиссию и состав биогаза, были подготовлены два биореактора № 1 и № 2. В биореактор № 1 были заложены образцы отходов, извлеченные при бурении 20-ти метровой скважины на закрытой части полигона в зоне высокой эмиссии биогаза. В биореактор № 2 – смесь из свежего мусора и компоста (в соотношении 70:30 % по массе), подготовленная на опытном заводе МПБО. Это позволило моделировать процессы разложения отходов разного состава, что характерно для различных периодов складирования на полигоне.

Используемые для анализа состава биогаза и фильтрата методики и приборы подбирались в соответствии с российскими и международными требованиями и согласовывались с координатором проекта. Подобие условий лабораторного эксперимента реальному полигону обеспечивалось поддержанием заданной температуры и влажности, созданием анаэробного режима. Критерием подобия является коэффициент ускорения. При проведении эксперимента определялось содержание в биогазе следующих энергетических компонентов: метана, водорода, а также углекислого газа, кислорода, азота, позволяющих контролировать процесс разложения отходов.

На рис 3 представлены графики эмиссии и состава биогаза в биореакторах № 1 и № 2 при разложении отходов за время эксперимента. Удельная эмиссия биогаза в пересчете на сухую массу отходов составила: в биореакторе № 1 – 22,35 л/кг сух.в-ва, в биореакторе № 2 – 116,1 л/кг сух.в-ва. Меньшее количество биогаза на единицу массы отходов в биореакторе № 1 объясняется, по-видимому тем, что за годы существования полигона часть биогаза уже выделилась.

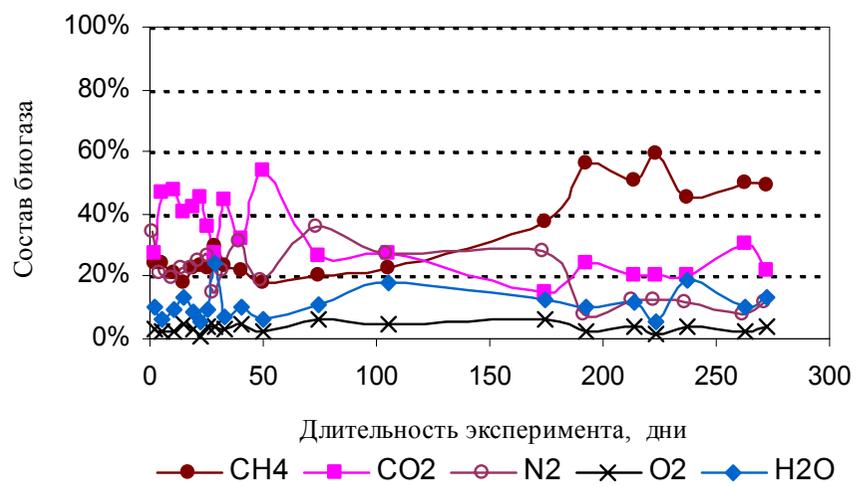
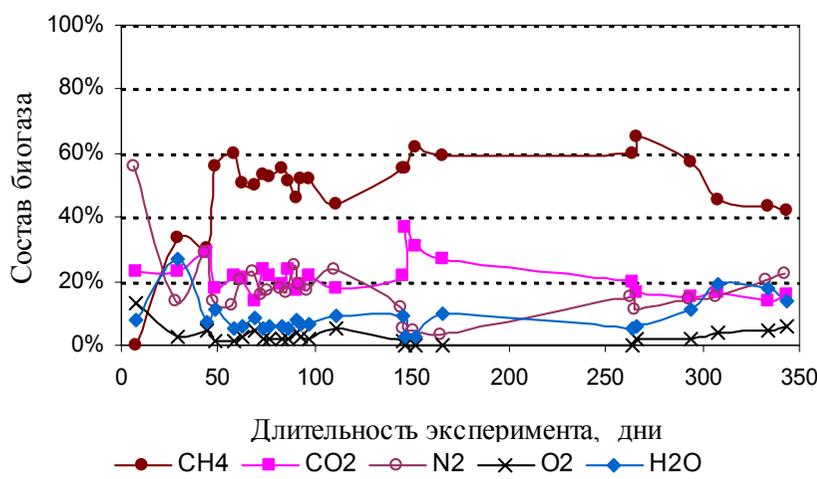
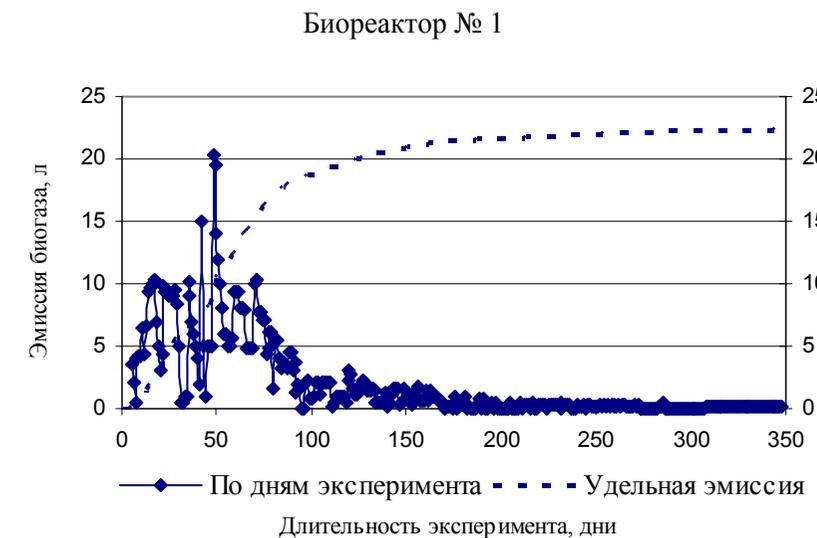


Рис. 3. Графики эмиссии и состава биогаза для биореакторов № 1 и № 2

Содержание метана в биогазе изменяется в пределах: в биореакторе № 1 – 41-65 %, в биореакторе № 2 – 18-60 %. Содержание углекислого газа изменяется в пределах: в биореакторе № 1 – 36.6-13.8 %, в биореакторе № 2 – 50-22 %.

По результатам эксперимента установлено, что эмиссия биогаза из биореактора № 1 описывается математической моделью Табасарана. По биореактору № 2 были выявлены два пика эмиссии биогаза, что можно объяснить составом бытовых отходов. Результат этого эксперимента особенно важен для действующих и вновь открываемых полигонов, состав отходов которых идентичен использованным в биореакторе № 2. Были определены расчетные значения коэффициентов ускорения в зависимости от толщины свалочных отложений с учетом климатических условий.

Результаты лабораторных исследований разложения отходов в биореакторах были пересчитаны на условия полигона «Волхонский» с учетом коэффициента ускорения. На рис. 4 представлена расчетная удельная эмиссия биогаза ($\text{м}^3/\text{т}$ сух.в-ва) за условный период для полигона «Волхонский». Зная удельную эмиссию биогаза, объем и состав складированных бытовых отходов можно рассчитать энергетический потенциал полигона «Волхонский». На рис. 5 приведены значения эмиссии биогаза и метана, пространственная модель интенсивности распределения метана на поверхности полигона «Волхонский». Анализ распределения интенсивности эмиссии биогаза во времени показал, что ожидается два пика: основной и более слабый. Первый пик эмиссии обусловлен старыми и новыми быстроразлагающимися захоронениями. Второй пик вызывается трудноразлагаемыми полимерными материалами, захороненными в последние годы.

Дополнительной составляющей энергетического потенциала полигона «Волхонский» может стать ветровая энергия, так как климатические условия региона характеризуются высокими ветроэнергетическими показателями. Были определены характеристики ветрового режима (среднегодовая скорость, удельная мощность и валовая удельная энергия ветрового потока и др.).

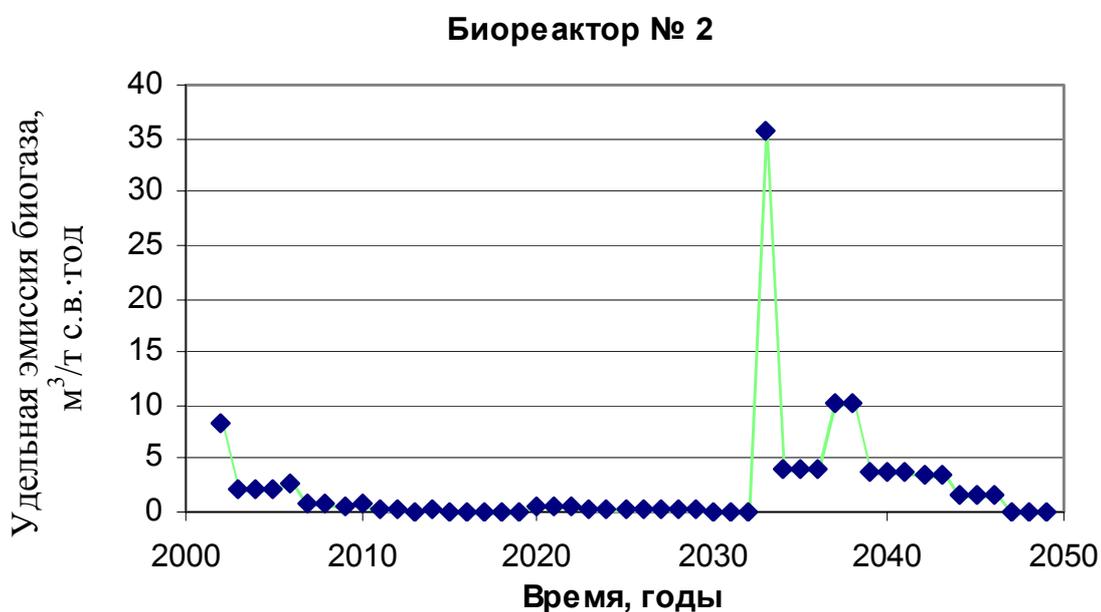
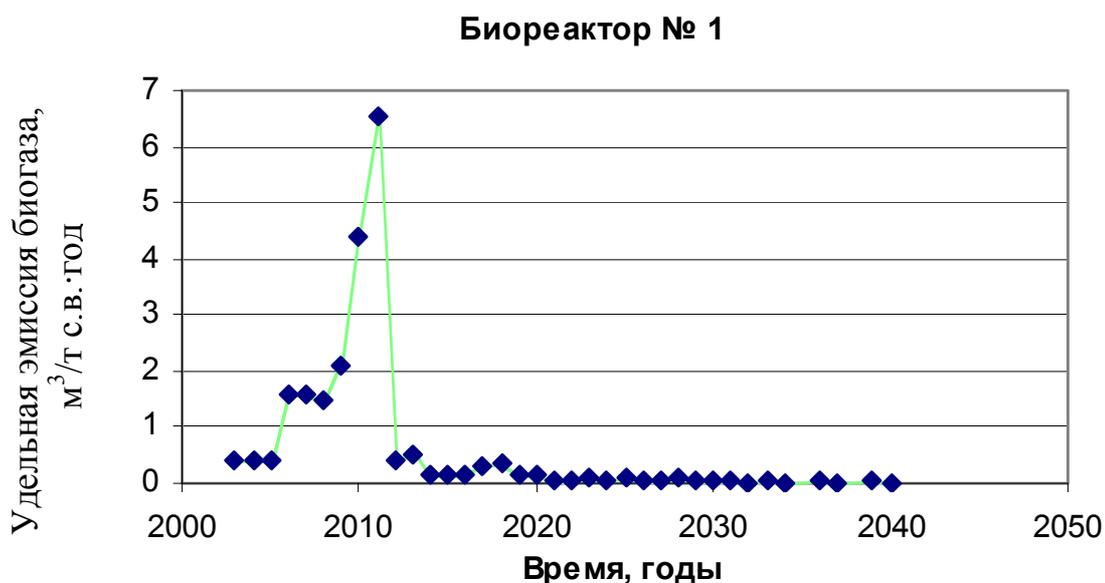


Рис. 4. Прогноз удельной эмиссии биогаза для полигона «Волхонский» по биореакторам № 1 и № 2

Глава 4. В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете с участием автора разработана схема энергетического комплекса на полигоне ТБО в составе системы сбора биогаза, энергетической установки, утилизирующей биогаз, а также ветроэлектростанции в качестве дополнительного независимого источника энергии для обслуживания полигона и местных нужд. Разработан алгоритм выбора параметров энергокомплекса.

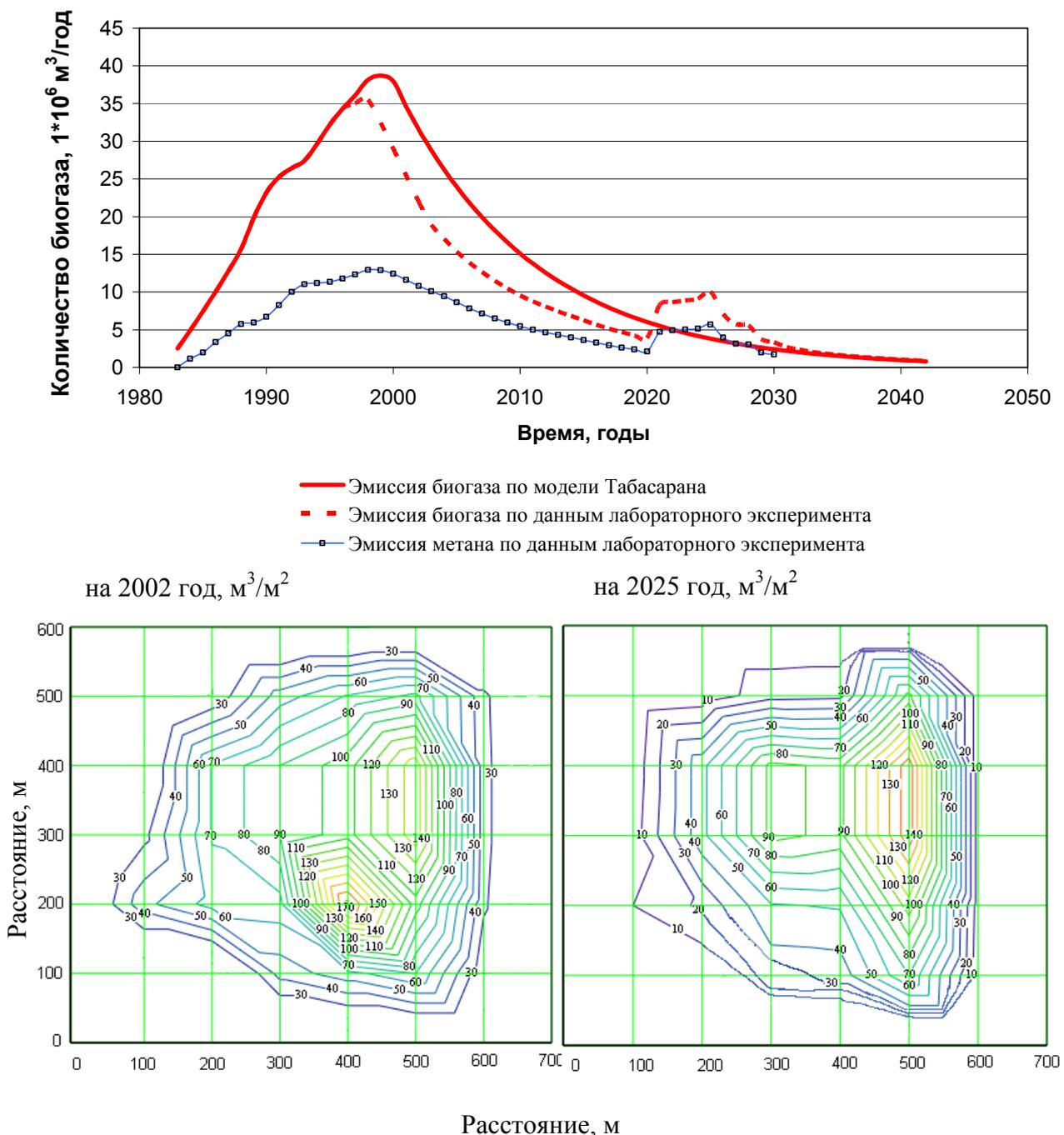


Рис. 5. Прогноз эмиссии биогаза и метана на полигоне ТБО «Волхонский»

Расчетной эмиссии метана на полигоне «Волхонский» достаточно для работы энергоустановки мощностью 2000 кВт. Мощность ВЭУ, размещаемой на вершине полигона, определена в размере 450 кВт. Таким образом, использование энергетического потенциала биогаза и ветровой энергии полигона «Волхонский» позволяет создать энергокомплекс мощностью 2450 кВт, состоящий из ДЭС – 2000 кВт и ВЭУ – 450 кВт. Предложенная схема

энергокомплекса может использоваться на малых (до 1 млн. м³) полигонах в Ленинградской области.

Эффективность энергокомплекса определялась по упрощенной методике путем сопоставления расчетной цены производства электроэнергии электростанциями энергокомплекса с нормативной ценой (тарифом) на электроэнергию в энергосистеме. В связи с повышенным вниманием к ограничению выбросов парниковых газов в работе сделана попытка оценить эффект от утилизации свалочного метана. При реализации квот на эти выбросы энергетическая утилизация выделяющегося биогаза позволит получить дополнительный экологический доход, сопоставимый с доходом от продажи электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ использования ТБО в качестве возобновляемых вторичных энергетических ресурсов, показавший возрастающую роль этого направления в энергосбережении и снижении загрязнения окружающей среды. Выявлена целесообразность сбора и утилизации биогаза на многих полигонах ТБО России.

2. Разработан и программно реализован алгоритм автоматизированного построения геометрической модели тела полигона, с учетом его параметров, состава бытовых отходов в любой части его объема и др.

3. Разработан и реализован автоматизированный программный комплекс для создания модели эмиссии биогаза и ее распределения в пространстве с использованием данных лабораторного эксперимента и геометрической модели тела полигона, позволяющей производить расчет потенциала биогаза полигона и содержание метана с учетом условий захоронения отходов.

4. Получены данные удельной и общей эмиссии биогаза и его состава по результатам лабораторных исследований отходов, захораниваемых на полигоне «Волхонский».

5. Создана геометрическая модель тела полигона «Волхонский» и выполнены расчеты пространственного распределения интенсивности эмиссии биогаза с учетом экспериментальных данных.

6. Разработана схема энергокомплекса в составе системы сбора биогаза, дизельной электростанции, утилизирующей свалочный метан, и ветроэнергетической установки как дополнительного источника энергии. Определены энергоотдача дизельной электростанции и ветроэнергетической установки.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Комплексные экологически безопасные энергетические технологии утилизации твердых бытовых отходов/Зеленая энергетика: «От современной технологии к современной философии». Ёнсу, Финляндия, 1999. С. 125 -131.
2. Экологические аспекты энергетического использования твердых бытовых отходов / Региональная экология. – 1999. № 5/6. – С. 87-90.
3. Разработка математического обеспечения обоснования технологий сбора биогаза на полигонах ТБО // Сб. трудов Межд. Научн.-техн. Конф. «Научные проблемы энергетики возобновляемых источников». – Самара, 2000. – С. 117-118.
4. Разработка программного комплекса для оптимизации параметров газосборной системы на полигоне твердых бытовых отходов//Региональная экология. – 2001. № 3-4. – С. 57-60.
5. Обоснование комплексных энергетических технологий на полигонах твердых бытовых отходов // Энергетическая политика, Вып.3. – 2001. – С. 38-41.
6. Комплексные энергетические технологии на полигонах твердых бытовых отходов //В кн.: «Нетрадиционные возобновляемые источники энергии». - М.: Амипресс, 2002. –С. 121-127.
7. Оценка биогазового потенциала полигонов ТБО с использованием лабораторного эксперимента//Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» - 2003. Материалы семинаров – «Компьютерные технологии и

телекоммуникации» и «Экология и энергоресурсосбережение». СПб, 2003. – С. 30.

8. Прогнозирование эмиссии биогаза на полигонах твердых бытовых отходов//Возобновляемая энергетика 2003: состояние, проблемы, перспективы: Сборник докладов междунар. научн.-практ. конф. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2003, 616 с. – С. 105-109.

Соавторами отдельных публикаций являлись: В.В. Елистратов [1, 3, 5, 6, 8] , Л.И. Кубышкин [3, 5, 6], В.И. Масликов [1, 3, 5, 6, 8], Е.Ю. Негуляева [1], М.П. Федоров [2], П.М. Федоров [1].