

*На правах рукописи*

**ЧЕРЕМИСИН Алексей Владимирович**

**МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА  
ИСКУССТВЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ  
(НА ПРИМЕРЕ ПОЛИГОНОВ ТВЁРДЫХ БЫТОВЫХ  
ОТХОДОВ)**

**Специальность 25.00.36 - «Геоэкология»**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание учёной степени**  
**кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург**  
**2004**

**Работа выполнена на кафедре «Экологические основы природопользования»  
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»**

**Научный руководитель:** член-корреспондент РАН,  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук,  
профессор Фёдоров Михаил Петрович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
профессор Сёмин Евгений Геннадиевич  
  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Зинченко Александр Васильевич

**Ведущая организация:** ЗАО «Опытный завод МПБО»  
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «\_\_\_\_\_» июня 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., д. 29, гидротехнический корпус 2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» мая 2004 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Орлов В. Т.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Основной задачей геоэкологии является изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосферных оболочек под влиянием природных и антропогенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для нынешних и будущих поколений людей продуктивной природной среды. Техногенные нарушения геологической среды вызывают сложные экологические ситуации: влияют на здоровье людей, наносят ущерб животному и растительному миру, а также подвергают инженерные сооружения опасности выхода из строя.

Одной из главных причин ухудшения экологического состояния биосферы являются выбросы отходов в окружающую среду. Безопасное удаление отходов становится одной из важнейших проблем современного общества, от решения которой зависит здоровье людей и благополучие естественных биоценозов.

В диссертационной работе рассматривается проблема обращения с одним из наиболее распространённых видов отходов - твёрдых бытовых отходов (ТБО). Большая часть ТБО в России (более 97% по объёму) вывозится на свалки и полигоны для захоронения. Из-за несоблюдения природоохранных требований к технологиям складирования, наблюдается значительное загрязнение природной среды продуктами возгораний, а также биогазом и фильтратом, выделяющимися из отходов в процессе их биохимического разложения, что пагубно влияет на здоровье населения и состояние прилегающих к полигонам экосистем. Эмиссии биогаза и фильтрата приводят также к опасным ситуациям в инженерных сооружениях, коммуникациях и зданиях, граничащих с местоположениями полигонов.

Если тепло, выделяющееся при биохимическом разложении отходов, не отводится, температура массы ТБО повышается. Это может вызвать спонтанное горение. Тепловая изоляция, как правило, обеспечивается либо соседней массой не реагирующего материала, что происходит, например, при совместном складировании органических и неорганических отходов, либо слоем отходов слишком большой толщины. Пустоты, остающиеся после подземного пожара, инициируют неожиданные разрушения поверхности полигона, что опасно для людей, сооружений и строений. Таким образом, проведение тепловых расчётов для прогнозирования экстремальных температур в теле полигона является очень важным.

Большой вклад в изучение процесса теплообмена внесли Р. Дрейк, Д. Егер, Г. Карслоу, Ж.-Б. Фурье, Э. Эккерт и другие учёные. Вопросам оценки воздействия полигонов на природную среду, исследованию процессов биохимического разложения отходов посвящены работы Р.Ф. Абдрахманова, Н.Ф. Абрамова, Е.М. Букреева, Я.И. Вайсмана, О.В. Горба-

тюка, П.В. Дарулиса, Х.Н. Зайнуллина, А.В. Зинченко, А.Б. Лифшица, А.Н. Мирного, А.Н. Ножевниковой, В.В. Разнощика, Е.Г. Сёмина, О. Табасарана, М.П. Фёдорова, Р. Штегманна и других авторов. Объединение опыта специалистов данных областей позволит осуществлять более достоверные исследования процессов биохимического разложения ТБО в натуральных и лабораторных условиях, уточнять математические модели для прогнозирования теплового режима полигонов с учётом свойств отходов и условий их складирования.

**Актуальность темы диссертационной работы** определяется необходимостью прогнозирования теплового режима полигонов ТБО в целях предотвращения аварийных ситуаций и их последствий для здоровья населения и экосистем прилегающих территорий.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертации является разработка методики расчёта теплового режима в рабочем теле полигона для предотвращения аварийных ситуаций, возникающих вследствие экстремального биохимического разогрева.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) проведён анализ основных характеристик ТБО и методов их переработки, оценено воздействие полигонов ТБО на окружающую среду;

2) проанализированы факторы, влияющие на динамику процессов биоразложения ТБО с образованием биогаза и на его состав;

3) выявлена связь между процессами биоразложения и развитием теплового режима в теле полигона;

4) проанализированы математические модели, описывающие процессы образования биогаза, а также модели теплопроводности;

5) обоснована необходимость математического моделирования теплового режима полигонов и свалок ТБО;

6) на основании проведённого анализа факторов и математических моделей разработана методика расчёта теплового режима, и по результатам расчёта дан прогноз развития экстремальных температур в теле полигона в соответствии с составом и свойствами ТБО, характерными для полигонов Санкт-Петербурга, с учётом температурных пределов существования анаэробных метаногенных микроорганизмов.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке методики расчёта теплового режима в рабочем теле полигона ТБО, учитывающей:

- зависимость температуры в теле полигона от совокупности таких характеристик ТБО как: влажность, морфологический состав, содержание активного углерода, плотность, теплоёмкость, теплопроводность, температуропроводность;

- зависимость интенсивности биохимических процессов, года максимальной эмиссии биогаза и температуры в теле полигона от срока его эксплуатации, толщины рабочего тела (высоты складирования) и температуры окружающей среды;
- взаимообусловленность энергетического выхода анаэробных биореакций, количества и состава образующегося биогаза, величины среднеобъёмного тепловыделения и температурного режима полигона;
- температурные пределы нормальной жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов.

### **Практическая значимость.**

Разработанная методика позволяет осуществлять тепловые расчёты полигонов, целями которых являются:

- 1) прогноз развития экстремальных температур в зависимости от состава и свойств ТБО, а также условий их складирования;
- 2) выработка требований и рекомендаций по предотвращению аварийных ситуаций (пожаров и разрушений) и снижению негативного воздействия на здоровье населения и природные экосистемы от эмиссий биогаза и возгораний отходов: а) по ограничению толщины рабочего тела, б) по корректировке технологической схемы полигона на стадии его проектирования, в) по принятию решений о проектировании газосборных систем и проведению других природоохранных мероприятий.

Методика может использоваться при проектировании защитных систем полигонов.

**На защиту выносятся:** 1) основные положения методики расчёта теплового режима полигонов ТБО; 2) результаты расчётов по разработанной методике для условий полигонов Санкт-Петербурга.

**Достоверность научных результатов и основных выводов** подтверждается хорошим соответствием полученных автором теоретических (расчётных) результатов и данных практических наблюдений на полигонах ТБО, проверкой разработанной методики с помощью лабораторного моделирования процесса биохимического разложения ТБО на экспериментальной установке «Биореактор».

**Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации** заключается в самостоятельной разработке методики расчёта теплового режима полигонов ТБО, выполнении по ней конкретных вычислений, участии в лабораторном эксперименте. Автором также разработаны: классификация видов воздействий полигонов ТБО на природную среду, здоровье населения и инженерные сооружения; блок-схема основных этапов проектирования полигонов ТБО.

**Апробация работы.** Основные положения, изложенные в диссертационной работе, представлены и обсуждены на Научно-технической конференции студентов (в рамках 24-ой Недели науки СПбГТУ, Санкт-Петербург, 1995), Второй, Третьей и Четвёртой Санкт-Петербургских Ассамблеях молодых учёных и специалистов (Санкт-Петербург, 1997, 1998, 1999), Втором, Третьем и Четвёртом Международных молодёжных экологических форумах «ЭКОБАЛТИКА'1998», «ЭКОБАЛТИКА'2000», «ЭКОБАЛТИКА'2002» (Санкт-Петербург, 1998, 2000, 2002), на Международном Семинаре по управлению отходами и окружающей среде (г. Кальмар, Швеция, 22-26 сентября 1999 г.), на конференции по международному проекту «Предподготовка и безопасное размещение твёрдых бытовых отходов для защиты окружающей среды» программы ЕвроКомиссии «IncoSopernicus» (Падуя, Италия, 2002).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 112 страницах машинописного текста, включает 15 таблиц и 23 рисунка. Список использованной литературы содержит 141 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована актуальность темы работы, показана её практическая значимость, научная новизна, определена цель исследования.

**В первой главе** рассмотрены проблемы образования и утилизации ТБО, оценена их актуальность для современных городов и других населённых пунктов, произведено обоснование полигона ТБО как объекта исследования. Рассмотрены современные технологии сбора и обращения с ТБО. Так как наиболее распространённым способом обращения с ТБО в России в настоящее время остаётся их вывоз на свалки и полигоны, многие из которых не соответствуют природоохранным требованиям, то в качестве объекта исследования выбран полигон как место организованного хранения отходов.

Рассмотрен полигон ТБО как комплекс природоохранных сооружений. Приведены основные типы полигонов ТБО, используемые в отечественной практике и условия их применения, параметры полигонов и их основные эксплуатационные характеристики.

Особо отмечена опасность для жизни и здоровья людей, а также для природных экосистем территорий, прилегающих к полигонам, возникающая из-за ухудшения качества природной среды от возгораний мусора, эмиссий биогаза и фильтрата. Также рассмотрено их разрушающее воздействие на инженерные сооружения и здания, находящиеся по соседству

с полигонами. Рассмотрены основные направления совершенствования технологий складирования и хранения ТБО на полигонах: применение надёжных изолирующих покрытий, внедрение систем сбора, очистки и переработки фильтрата и биогаза, мониторинг качества природной среды в районах расположения полигонов.

Обоснована необходимость изучения процессов биохимического разложения ТБО.

**Во второй главе** проведена классификация воздействий полигонов и свалок ТБО на природную среду, здоровье населения и инженерные сооружения. Представлена схема процессов, происходящих в теле полигона (рис. 1).

Рассмотрено влияние свойств отходов на процессы их биохимического разложения. Проведён анализ математических моделей, описывающих процессы биохимического разложения ТБО. Для применения в рамках разработанной методики выявлены модели, обеспечивающие лучшее соответствие с данными натурных и лабораторных исследований.

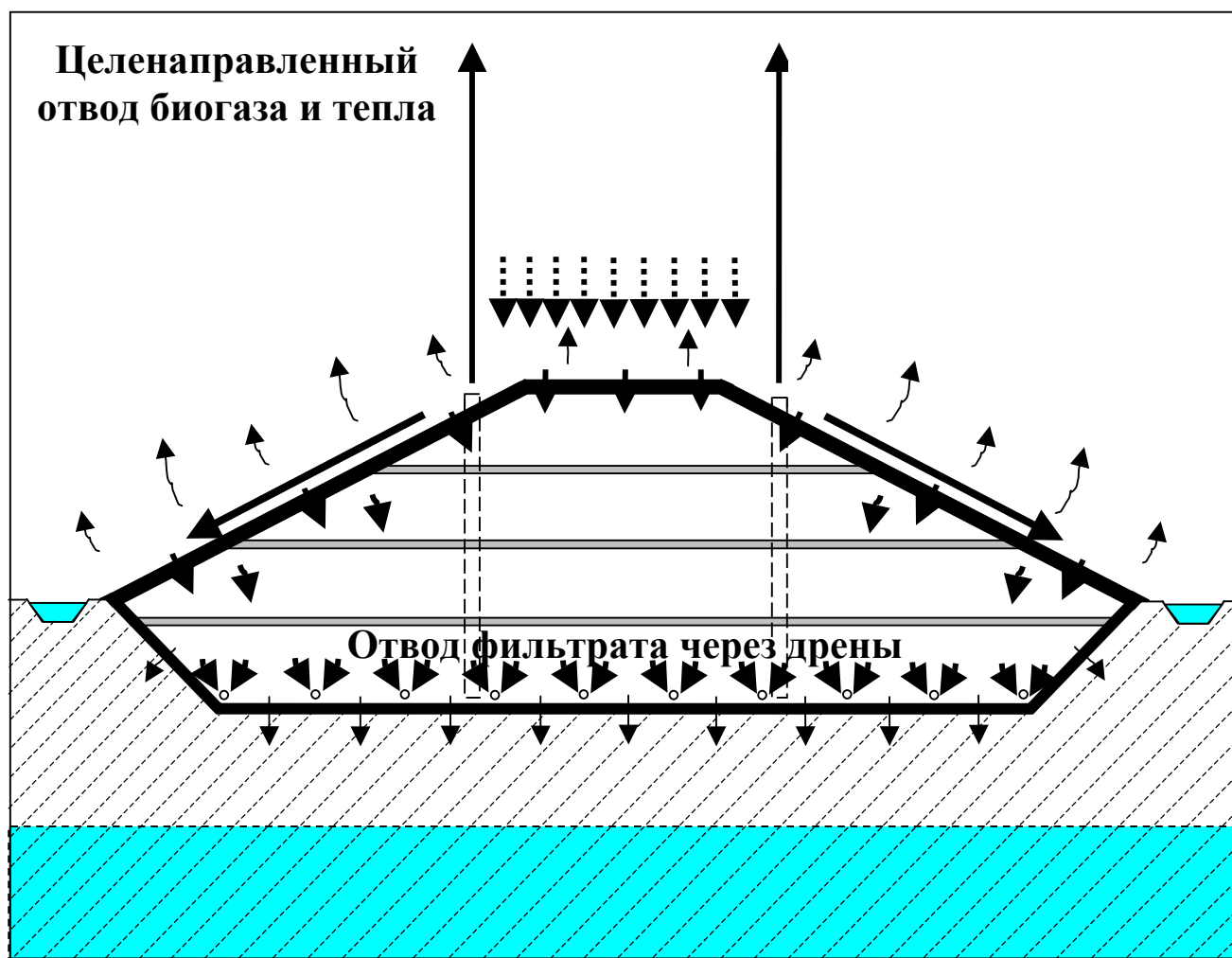


Рис. 1. Схематическое изображение процессов, происходящих в теле полигона

В целях предотвращения опасных, аварийных ситуаций, связанных с возможными пожарами в результате чрезмерного биохимического разогрева тела полигона при протекании микробиологических процессов, обоснована необходимость прогнозирования теплового режима внутри него. На основании проведённого анализа можно сказать, что сведения о математическом моделировании теплового режима полигонов и свалок в отечественной и зарубежной научной литературе до сих пор отражены очень скудно. Попытки такого моделирования предприняты лишь автором настоящей диссертации, специалистами Пермского государственного технического университета, Пермского научно-исследовательского института управляющих машин и систем. Исследования проводились независимо.

Таким образом, в качестве главной задачи диссертации взят расчёт теплового режима в рабочем теле полигона твёрдых бытовых отходов.

**В третьей главе** изложены основные положения методики расчёта теплового режима полигонов ТБО.



**Рис. 2. Блок-схема алгоритма методики расчёта теплового режима полигонов ТБО (двойной линией выделены главные расчётные блоки)**



На основе установленных среднестатистических свойств (характеристик) ТБО определяются годы максимальной эмиссии биогаза для различных сроков эксплуатации полигонов ТБО.

Расчёт выбросов биогаза со свалок и полигонов в данной методике производится для нормального режима эксплуатации мест захоронения ТБО – возгорания отходов в этом приближении не учитываются.

Как показывает опыт, наиболее достоверные результаты в расчётах биогазового потенциала полигонов и свалок ТБО даёт формула Табасарана (1):

$$G(t) = 1,868 \cdot C_{акт} \cdot (0,014 \cdot T + 0,28) \cdot (1 - 10^{-kt}), \quad (1)$$

где  $G(t)$  - удельное количество биогаза, образовавшееся за период времени  $t$ , м<sup>3</sup>/т отходов; расчётный период «жизни» полигона как биореактора принимаем  $t=100$  лет (расчётный период полного биохимического разложения ТБО в теле полигона);  $C_{акт}$  - активный (органический) углерод (т. е. углерод, задействованный в биохимических процессах, происходящих в отходах и приводящих к образованию биогаза), кг/т отходов. По данным исследований керна твёрдого вещества, отобранного с различных слоёв ныне действующего полигона твёрдых отходов № 1 (ПТО-1) г. Санкт-Петербурга для отходов, складированных в теле полигона (в перемежку с изолирующими слоями), с учётом их влажности  $W_{склад.}=64\%=0,64$ , активный углерод составляет около 189,55 кг/т, в расчётах это значение считаем характерным для ТБО, складированных на полигонах Санкт-Петербурга;  $T$  - температура в теле полигона ТБО, °С, которую принимаем в первом приближении  $T=35$  °С как оптимальную для процесса биохимического разложения, в соответствии с данными натуральных и лабораторных исследований;  $k$  - постоянная разложения, год<sup>-1</sup>, в соответствии с рекомендациями Международной методики инвентаризации выбросов парниковых газов, принимаем  $k=0,05$  год<sup>-1</sup>.

Таким образом,  $G(t)=272,64$  м<sup>3</sup>/т ТБО. Этот удельный биогазовый потенциал и полагаем далее за расчётный.

Расчётные сроки эксплуатации полигона для дальнейших вычислений принимаем от 1 до 40 лет.

При неравномерном от года к году поступлении отходов на полигон расчёт выброса метана в разные годы производится по алгоритму, использующему следующие необходимые допущения:

1) Поступление отходов на полигон описывается как последовательность дискретных порций с временным шагом 1 год;

2) Разложение твёрдых отходов, поступающих на полигон в течение года, начинается после окончания этого года, таким образом, расчётный период существования полигона как биореактора ( $t=100$  лет) начинается со 2-го и заканчивается 101-ым годом;

3) Выбросы биогаза, как функция времени, рассчитываются отдельно для каждого годового поступления отходов:  $M_i$ ,  $i=1, 2, 3, \dots$ , где  $M_i$  - количество отходов, вывозимых на полигон за один год (тонн),  $i$  – номер года после открытия полигона;  $i=1$  – номер первого года.

4) Выброс за год с номером  $n$  рассчитывается путём суммирования выбросов в этом году при разложении всех  $M_i$  за предшествующий год.

Исходная плотность поступающих ТБО  $\rho_{исх.}=0,2$  т/м<sup>3</sup>. Расчётное уплотнение ТБО за период эксплуатации в 4,5 раза, следовательно, плотность складированных ТБО  $\rho_{склад.}=0,9$  т/м<sup>3</sup>. Плотность материала изолирующих слоёв принимаем  $\rho_{изол.}=\rho_{склад.}=0,9$  т/м<sup>3</sup>.

Скорость образования биогаза в год с номером  $n$  для тех отходов, которые поступили в год с номером  $i$ , м<sup>3</sup>/год, наиболее удобно определять по формуле из документации по инвентаризации выбросов ЕРА:

$$V_{in}=0 \text{ при } n \leq i$$

$$V_{in} = G_i(t) \cdot M_i \cdot k \cdot e^{-k(n-i-1)}, \quad (2)$$

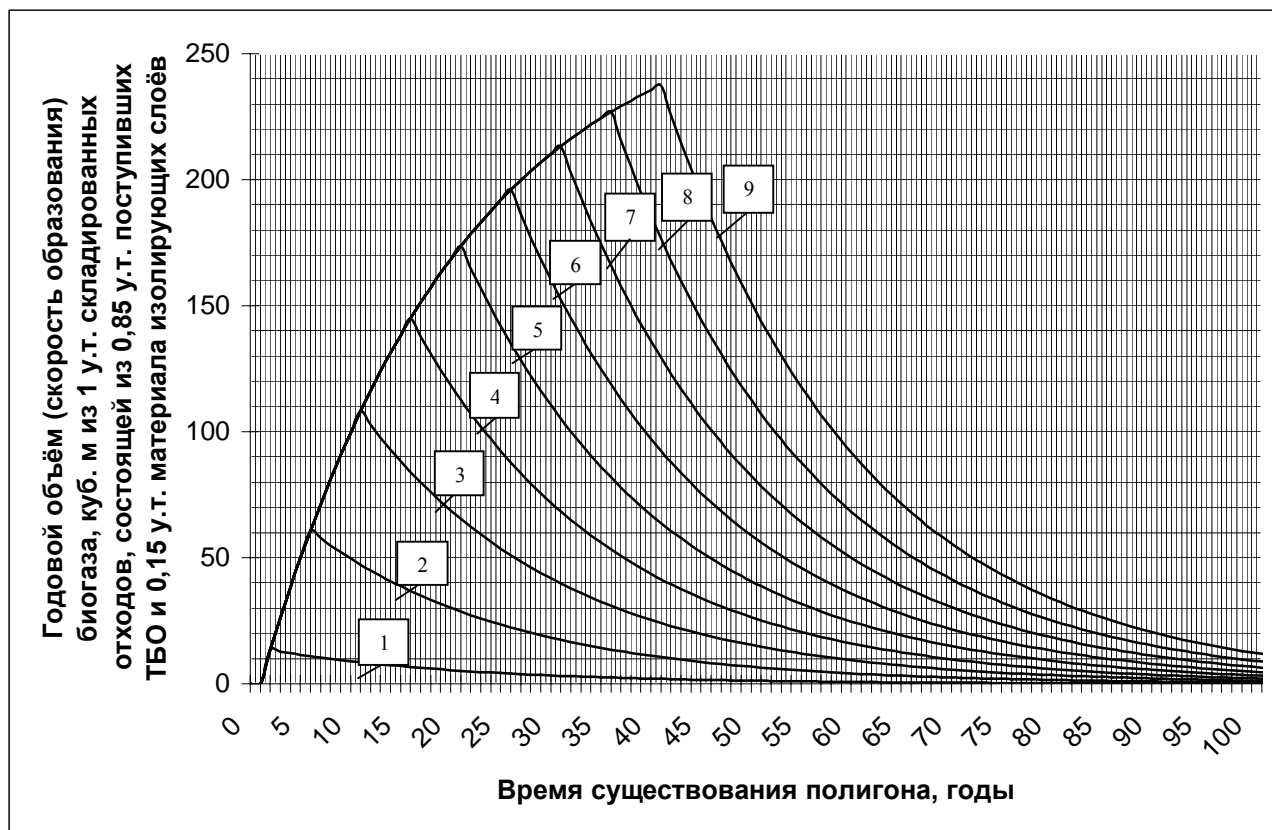
где  $G_i(t)$  - удельный биогазовый потенциал отходов, поступивших на полигон в год с номером  $i$ , и складированных в теле полигона, рассчитанный ранее:  $G_i(t)=G(t)=272,64$  м<sup>3</sup>/т ТБО;  $M_i$  – масса захороненных отходов в год с номером  $i$ , т.

Результаты вычислений для расчётного периода существования полигона как биореактора ( $t=100$  лет), начинающегося со 2-го и заканчивающегося 101-ым годом, представляем в виде таблицы:

$$V = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1,40} & \dots & V_{1,101} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2,40} & \dots & V_{2,101} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{40,1} & V_{40,2} & \dots & V_{40,40} & \dots & V_{40,101} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & V_{12} & \dots & V_{1,40} & \dots & V_{1,101} \\ 0 & 0 & \dots & V_{2,40} & \dots & V_{2,101} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & V_{40,101} \end{bmatrix}$$

В первой строке таблицы представлены расчётные скорости образования биогаза в годы с номерами  $n=1 \dots 101$  для тех отходов, которые поступили в год с номером 1. В сороковой строке таблицы представлены расчётные скорости образования биогаза в годы с номерами  $n=1 \dots 101$  для тех отходов, которые поступили в год с номером 40. Каждая строка, исключая нули, представляет собой экспоненциально убывающий ряд значений скоростей образования биогаза.

На основании данных расчёта, представленных в строках таблицы, получаем итоговые кривые  $V_{in}=f(t)$  для каждой годовой порции поступающих отходов.



**Рис. 3. Эмиссия биогаза для случая расчётного биогазового потенциала складированных ТБО  $272,64 \text{ м}^3/\text{т}$  при ежегодном расчётном поступлении  $0,85$  условной тонны (у.т.) отходов с исходной плотностью  $\rho_{исх.}=0,2 \text{ т}/\text{м}^3$ , расчётном уплотнении за период эксплуатации  $4,5$  раза (плотность складированных отходов  $\rho_{склад.}=0,9 \text{ т}/\text{м}^3$ ) и с учётом объёма изолирующих слоёв  $15\%$  от объёма тела полигона:**

Графики 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 иллюстрируют выделение биогаза для случая 1-, 5-ти, 10-ти, 15-ти, 20-ти, 25-ти, 30-ти, 35-ти и 40-летнего срока эксплуатации полигона соответственно.

Суммируя результаты в столбцах таблицы  $V$ , получаем исходные данные для построения кривых образования биогаза при различных сроках эксплуатации полигона ТБО. Результаты расчёта представлены на рис. 3.

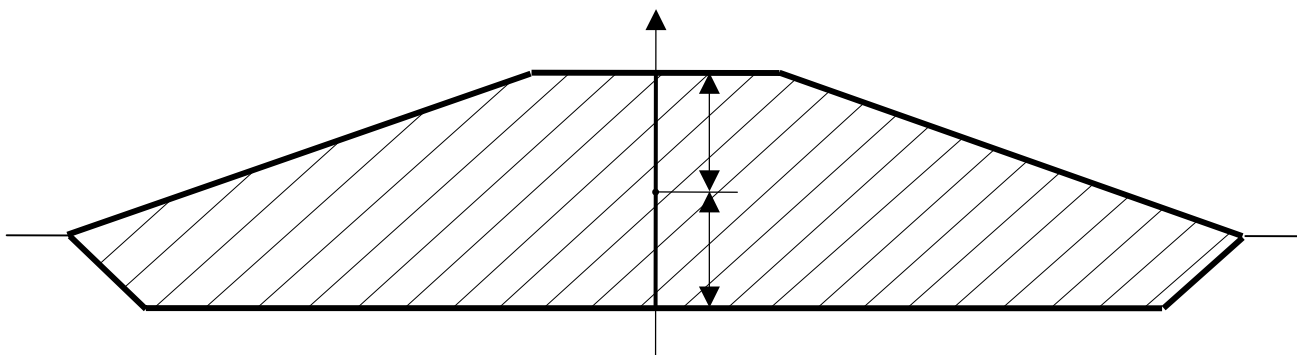
В итоге установлены годы максимального выделения биогаза для различных сроков эксплуатации полигона.

Далее производим оценку компонентного состава и основных характеристик биогаза. На базе среднестатистических данных принимаем характерный состав биогаза по объёмным долям компонентов  $\theta_i$ , объёмные %:  $\theta_{CH_4} - 56\%$ ,  $\theta_{CO_2} - 35\%$ ,  $\theta_{N_2} - 8\%$ ,  $\theta_{O_2} - 0,8\%$ ,  $\theta_{H_2} - 0,1\%$ ,

Находим плотности компонентов  $\rho_i$ , кг/м<sup>3</sup>; их молярные массы  $M_i$ , кг/моль. В результате установили количество моль биогаза, содержащееся в 1 м<sup>3</sup> биогаза,  $\mu_{бг}$ , моль/м<sup>3</sup><sub>бг</sub>, для принятого компонентного состава. Таким образом,  $\mu_{бг} \cong 44,83$  моль/м<sup>3</sup><sub>бг</sub>.

Определяем далее возможные экстремальные температуры, развивающиеся в расчётный год максимальной эмиссии биогаза в центральной части полигона ТБО для различных толщин рабочего тела и различных сроков эксплуатации.

В рамках данного исследования решалась задача о распределении температур в центральной части полигона ТБО (в точке с координатой  $x=0$ ) в год максимальной эмиссии биогаза. С этой целью использовано решение одномерной задачи для стержня с внутренними источниками тепла, равномерно распределёнными по его длине. В качестве стержня рассматривается, выделенный жирно, линейный фрагмент тела полигона длиной  $2l$ , расположенный вдоль оси  $x$  (рис. 4). Так как задача одномерная, то принимается допущение, что теплообмен со стороны боковой поверхности стержня отсутствует.



**Рис. 4. Расчётная схема к решению тепловой задачи для стержня с внутренними источниками тепла, равномерно распределёнными по его длине**

Если в единицу времени на единицу объёма рабочего тела полигона ТБО выделяется количество тепла, равное  $A_0$ , Дж/(м<sup>3</sup>·с), то дифференциальное уравнение для распределения температур как функции координаты  $x$ , м, и времени  $t$ , с, в применении к стержню длиной  $2l$ , м, имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{A_0 \chi}{K}. \quad (3)$$

Полагаем в этом приближении  $A_0 = const$  при  $t > 0$ . Далее полагаем, что температура на границах области  $-l < x < l$ , т.е. на концах стержня  $x=l$  и  $x=-l$  (соответственно, вблизи основания и «верха» полигона, рис. 4), равна 0 °С. В этом случае  $T$ , °С - это превышение темпера-

тур в рабочем теле полигона над граничной температурой, развивающееся за счёт протекающих экзотермических реакций по анаэробному циклу.

В таком случае уравнение (3) дополняется граничными условиями:

$$T=0 \text{ } ^\circ\text{C при } x=\pm l, t>0 \quad (4)$$

и начальным условием для всех точек по длине стержня  $2l$ :

$$T=0 \text{ } ^\circ\text{C при } t=0. \quad (5)$$

Согласно литературным данным по теплопроводности твёрдых тел, решение уравнения (3) при выполнении (4) и (5) возможно в аналитической форме и имеет вид:

$$T = \frac{A_0 l^2}{2K} \left\{ 1 - \frac{x^2}{l^2} - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \exp \left[ -\frac{\chi(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right] \right\}, \quad (6)$$

где:  $t$ , с, - время;  $x$ , м, - координата с «нулём» отсчёта в середине слоя рабочего тела полигона толщиной  $2l$ ;  $n$  - номера слоёв, составляющих расчётное тело полигона (в нашем случае – номера фрагментов составного стержня), для упрощения считаем тело полигона нерасчленимым, то есть принимаем  $n=1$ ;  $A_0$ , Дж/(м<sup>3</sup>·с), - средняя по объёму интенсивность тепловыделения;  $K$ , Дж/(м·с·град), - средняя теплопроводность материала рабочего тела;  $\chi$ , м<sup>2</sup>/с, - коэффициент температуропроводности;  $T(x,t)$ , °C, - превышение над граничной температурой, принимаемой за «нуль» отсчёта.

В свою очередь, температуропроводность  $\chi$  определяется из соотношения:

$$\chi = \frac{K}{C_p \cdot \rho}, \quad (7)$$

где:  $C_p$  - средняя теплоёмкость материала тела полигона, Дж/(кг·град);  $\rho$  - средняя плотность материала рабочего тела, кг/м<sup>3</sup>.

На основе среднестатистического морфологического состава отходов г. Санкт-Петербурга, автором определены средние величины расчётных параметров  $C_p, K, \chi, A_0$  отходов, складированных на типовом полигоне Санкт-Петербурга (влажность отходов 64 %).

Ранее приняли  $\rho=900$  кг/м<sup>3</sup>. В результате расчёта получили  $C_p=3174,84$  Дж/(кг·град),  $K=0,9$  Дж/(м·с·град),  $\chi=3,137 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Далее определяем величину  $A_0$ .

Нас интересует максимальный энергетический выход из 8 реакций анаэробного цикла, так как именно он может привести к развитию максимальных температур в теле полигона (реакция № 3) (таблица 3) –  $\Delta G_{CH_4 \max} = 190,4$  кДж/моль  $CH_4$ .

Тогда максимальный энергетический выход в пересчёте на моль биогаза:

$$\Delta G_{\theta_{CH_4} \max} = \frac{\Delta G_{CH_4 \max}}{\theta_{CH_4}}, \quad (8)$$

где  $\theta_{CH_4}$  – расчётная объёмная доля метана (0,56 (56 %)). Тогда  $\Delta G_{\theta_{CH_4} \max} = 190,4 : 0,56 = 340$  кДж/моль биогаза.

**Таблица 3. Основные анаэробные реакции и их энергетический выход**

№ п/п	Химические реакции	Энергетический выход реакций, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль } CH_4}$
1.	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	130,4
2.	$4HCOO^- + 4H^+ \rightarrow CH_4 + 2H_2O + 3CO_2$	119,5
3.	$4CO + 2H_2O \rightarrow CH_4 + 3CO_2$	190,4
4.	$CH_3COO^- + H^+ \rightarrow CH_4 + CO_2$	32,5
5.	$4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$	103,0
6.	$4CH_3NH_3^+ + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 4NH_4^+$	74,0
7.	$2(CH_3)_2NH_2^+ + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2NH_4^+$	74,0
8.	$4(CH_3)_3NH^+ + 6H_2O \rightarrow 9CH_4 + 3CO_2 + 4NH_4^+$	74,0

Максимальное количество теплоты с кубометра биогаза:

$$\Delta Q_{\theta_{CH_4} \max} = \Delta G_{\theta_{CH_4} \max} \cdot \mu_{\theta_{CH_4}}, \quad (9)$$

где  $\Delta G_{\theta_{CH_4} \max}$  - максимальный энергетический выход биореакций, пересчитанный с кДж/моль  $CH_4$  в кДж/моль биогаза,  $\mu_{\theta_{CH_4}}$  – количество моль биогаза в 1 м<sup>3</sup> биогаза, моль/м<sup>3</sup><sub>бг</sub>;  $\mu_{\theta_{CH_4}} = 44,83$  моль/м<sup>3</sup><sub>бг</sub>.

Тогда  $\Delta Q_{\theta_{CH_4} \max} = 340 \cdot 44,83 = 15242,2$  кДж/м<sup>3</sup><sub>бг</sub> = 15242200 Дж/м<sup>3</sup><sub>бг</sub>.

Расчётный удельный объём биогаза на 1 м<sup>3</sup><sub>ТБО</sub> за пиковый год,  $V_{\theta_{CH_4}}$  за пиковый год, м<sup>3</sup><sub>бг</sub>/м<sup>3</sup><sub>ТБО</sub> в теле полигона ( $\rho_{ТБО} = 0,9 \text{ т/м}^3$ ) (с учётом того, что изолирующие слои составляют 15 % объёма полигона и  $\rho_{\text{изол. слоёв}} = \rho_{ТБО}$ ).

Среднеобъёмное тепловыделение с 1 м<sup>3</sup> тела полигона за пиковый год, Дж/(м<sup>3</sup><sub>ТБО</sub>·с) вычисляется по формуле:

$$A_0 = \frac{\Delta Q_{\theta_{CH_4} \max}}{t} \cdot V_{\theta_{CH_4} \text{ за пиковый год}}, \quad (10)$$

где  $t$  - расчётное время выделения биогаза,  $t = 1 \text{ год} = 31536000 \text{ с}$ .

Таким образом,  $\frac{\Delta Q_{\theta_{CH_4} \max}}{t} = 15242200 / 31536000 = 0,48$  Дж/(м<sup>3</sup><sub>бг</sub>·с).

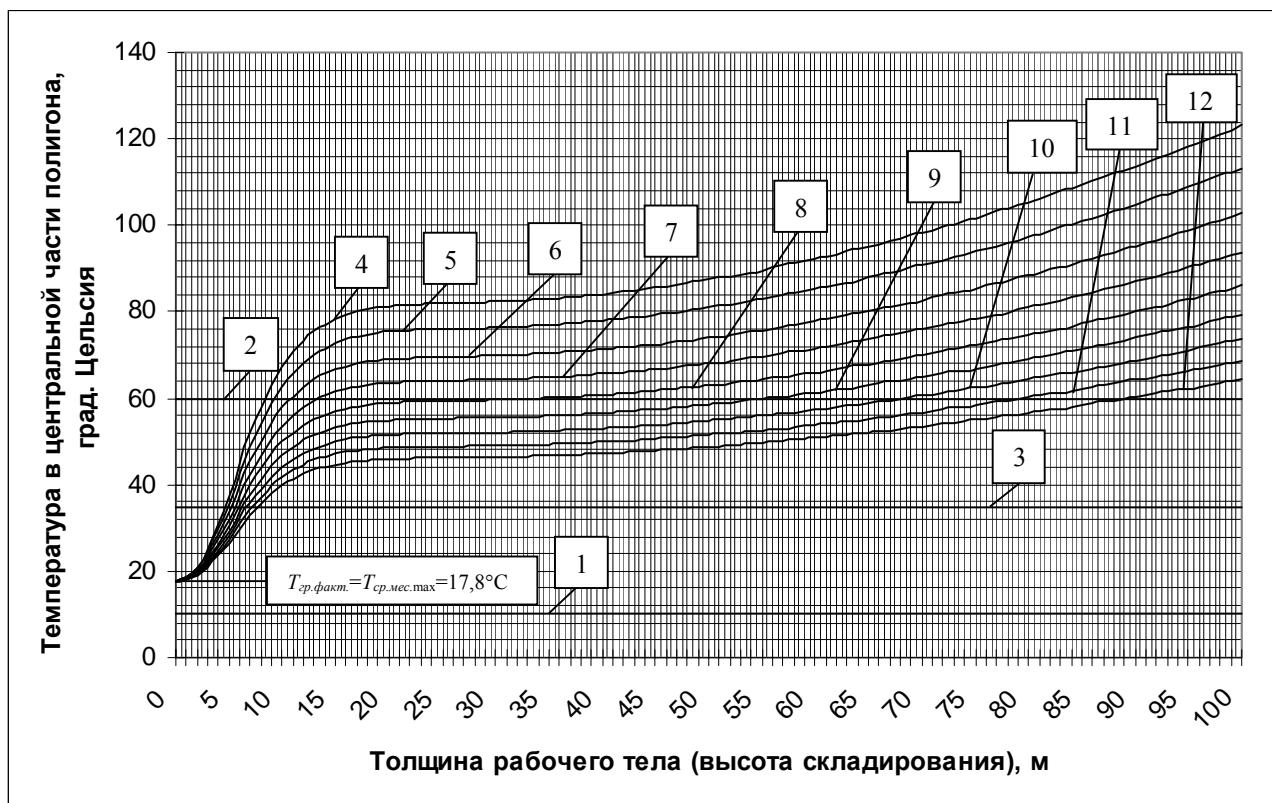
Для определения теоретической расчётной температуры (при граничных условиях (4) и начальном условии (5)) в центральной части полигона (в точке с координатой  $x=0$ ) используем аналитическое решение (6), то есть принимаем  $T=T_{x=0 \text{ теор.}}$ .

Фактическая температура в центральной части полигона  $T_{x=0 \text{ факт.}}$  зависит от фактической температуры на границах  $T_{\text{гр.факт.}}$ . Тогда:

$$T_{x=0 \text{ факт.}} = T_{\text{гр.факт.}} + T_{x=0 \text{ теор.}} \quad (11)$$

Для упрощения, в качестве фактической граничной температуры  $T_{\text{гр.факт.}}$  выбираем температуру на верхней границе как оказывающую наибольшее внешнее влияние на биохимический разогрев. Расчёт температуры  $T_{x=0 \text{ факт.}}$  осуществляем для случая максимальной среднемесячной температуры (условия Санкт-Петербурга):

$$T_{\text{гр.факт.}} = T_{\text{ср.мес. max}} = 17,8^\circ\text{C} - \text{среднеиюльская температура (наиболее тёплый месяц).}$$



**Рис. 5. Максимальные расчётные температуры, развивающиеся в теле полигона в пиковые годы выделения биогаза при максимальном выходе биореакций для различных толщин рабочего тела и различных сроков эксплуатации полигона при максимальной среднемесячной температуре воздуха в условиях Санкт-Петербурга  $17,8^\circ\text{C}$  (июль)**

Цифрами 1 и 2 отмечены, соответственно, нижний ( $10^\circ\text{C}$ ) и верхний ( $60^\circ\text{C}$ ) температурные пределы нормальной жизнедеятельности метаногенов, цифрой 3 – оптимальная температура их существования ( $35^\circ\text{C}$ ); цифрами 4, 5, 6, ..., 12 - температурные кривые для лет максимальных эмиссий биогаза при различных сроках эксплуатации полигона: 1, 5, 10, ..., 40 лет соответственно.

Результаты диссертационных расчётов были подтверждены в ходе натуральных наблюдений на полигоне ПТО-1 г. Санкт-Петербурга и лабораторного эксперимента на установке «Биореактор», проводившихся в рамках международного проекта «Pre-Treatment and Safe Disposal of Municipal Solid Waste and Waste Water Sludge for Environmental Protection» (PSDWSEP) (Предподготовка и безопасное размещение твёрдых бытовых отходов и осадка сточных вод для охраны окружающей среды) по программе ЕвроКомиссии «IncoCopernicus» (Координатор проекта – Р. Штегманн (Технический Университет «Гамбург–Харбург», Германия), научный руководитель со стороны СПбГПУ – М.П. Фёдоров), в котором участвовал автор настоящей диссертации, а также данными по исследованиям биохимических процессов с образованием биогаза на подмосковном полигоне «Кучино», по фундаментальным исследованиям метанового брожения, представленными в ряде литературных источников.

**В заключении** сформулированы основные выводы, в которых отражены результаты проведённых исследований.

**В приложении** приведены разработанные автором: 1) блок-схема основных этапов проектирования полигонов ТБО; 2) блок-схема алгоритма методики расчёта теплового режима полигонов ТБО, представленная в настоящем автореферате (рис. 3) и включённая в качестве составной части в блок-схему основных этапов проектирования полигонов ТБО.

## **ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

Как итог исследования, можно сформулировать следующие выводы по диссертационной работе:

1. Проведён анализ основных характеристик ТБО и способов их переработки. Так как более 97 % по объёму всех образующихся ТБО в России вывозится на свалки и полигоны для захоронения, и многие из них не соответствуют природоохранным требованиям, полигон ТБО выбран в качестве основного объекта исследования. Оценено воздействие полигонов ТБО на окружающую среду.

2. Исследованы факторы, влияющие на динамику процессов биохимического разложения ТБО с образованием биогаза, и на его состав: 1) количество ежегодно завозимых отходов; 2) влажность отходов; 3) климатические условия; 4) температура в теле полигона и на его границах; 5) морфологический состав отходов; 6) химический состав отходов, в том числе *pH* отходов и фильтрата, содержание активного углерода, соотношение углерода и общего азота (C/N); 7) плотность; 8) условия складирования отходов: площадь, объём, глубина свалки (высота складирования ТБО); 9) срок эксплуатации полигона. Как наиболее зна-



чимые для расчётов, выделены влажность, морфологический состав, содержание активного углерода, плотность, температура в теле полигона и на его границах, высота складирования и срок эксплуатации полигона.

3. Проведён анализ существующих математических моделей, описывающих процессы биохимического разложения, и позволяющих оценить газовый потенциал ТБО, а также моделей теплопроводности. На основании проведённого анализа факторов и моделей разработана методика расчёта теплового режима полигона ТБО в целях предотвращения аварийных ситуаций и их последствий для здоровья населения и экосистем прилегающих территорий.

4. Получена зависимость развития температуры в теле полигона от таких характеристик ТБО как влажность, морфологический состав, содержание активного углерода, плотность, теплоёмкость, теплопроводность, температуропроводность. При этом учтены такие важные условия, как температура на границах, высота складирования и срок эксплуатации полигона.

5. По результатам проведённых расчётов, подтверждённых данными натурных исследований и лабораторного эксперимента, с учётом среднестатистических характеристик ТБО Санкт-Петербурга, даны рекомендации по ограничению толщины рабочего тела полигона ТБО (высоты складирования), в зависимости от развивающихся температур при различных сроках эксплуатации. На основании аналитических данных, в качестве ограничительного критерия принят верхний температурный предел нормальной жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов 60 °С.

#### **ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

1. Утилизация и хранение твёрдых бытовых отходов в Санкт-Петербурге // Фёдоров М.П., Черемисин А.В. Тезисы докладов научно-технической конференции студентов (в рамках 24-ой Недели науки СПбГТУ, Санкт-Петербург, 1995), с. 23.

2. Твёрдые бытовые отходы как источник получения биогаза // Фёдоров М.П., Черемисин А.В. Тезисы доклада II Санкт-Петербургской Ассамблеи молодых учёных и специалистов, Санкт-Петербург, 1997, с. 37.

3. Landfills: Main Problems and Possible Ways of Their Solution // Fëdorov M.P., Cheremisin A.V. Abstract of The 2<sup>nd</sup> International Youth Environmental Forum ECOBALTICA'98, St-Petersburg, 1998, p. 22.

4. Landfills: Main Problems and Possible Ways of Their Solution // Cheremisin A.V. Proceedings of The 2<sup>nd</sup> International Youth Environmental Forum ECOBALTICA'98, St-Petersburg,

1998, pp. 77–82.

5. Полигоны ТБО: Главные проблемы и возможные пути их решения // Фёдоров М.П., Черемисин А.В. Тезисы доклада III Санкт-Петербургской Ассамблеи молодых учёных и специалистов, Санкт-Петербург, 1998, с. 24.

6. About Improvement of Environmental Protection Measures System in Landfills of Russia with Taking into Account the Possibility of Biogas Utilization // Cheremisin A.V. Proceedings of the Conference of Ecological Technology and Management, September 22-24, 1999, Kalmar, Sweden, pp. 361–368.

7. Совершенствование комплекса природоохранных мероприятий для полигонов твёрдых бытовых отходов с учётом сбора и утилизации биогаза // Фёдоров М.П., Черемисин А.В. Тезисы доклада Четвёртой Санкт-Петербургской Ассамблеи молодых учёных и специалистов, Санкт-Петербург, 1999, с. 24.

8. О совершенствовании системы природоохранных мероприятий на полигонах ТБО с учётом возможности утилизации биогаза // Фёдоров М.П., Черемисин А.В. Статья в журнале РАН «Региональная Экология» (№ 3'1999), с. 89–93.

9. Landfill as Nature Protection System and Energy Source // Cheremisin A.V. The 3<sup>rd</sup> International Youth Environmental Forum of Baltic Countries «ECOBALTICA'2000» Abstract Book, 26–30 June 2000, St-Petersburg, 2000, pp. 14–15.

10. Landfill as Nature Protection System and Energy Source // Cheremisin A.V. The 3<sup>rd</sup> International Youth Environmental Forum of Baltic Countries «ECOBALTICA'2000» Proceedings Book, 26–30 June 2000, St-Petersburg, 2001, pp. 53–58.

11. Автоматизированный учебно-научный лабораторный комплекс «Биореактор» для исследования процессов биоразложения твердых бытовых отходов // Черемисин А. В., Федоров М. П., Масликов В. И. Статья в журнале РАН «Региональная экология» N3-4(17) 2001, с. 51–54.

12. Status of Russian Landfills and Legislation in Russia. // E.Yu. Negulaeva, V.P. Atrashenok, A.V. Cheremisin, (2002). In Conf Proc. for the Project Pre-Treatment and Safe Disposal of Municipal Solid Waste and Waste Water Sludge for Environmental Protection. June 20, 2002, Padova, Italy, pp. 1–12.

13. Investigation of Biochemical Processes in Municipal Solid Waste by the Tools of the Training Scientific Center of SPbSPU // A. Cheremisin, M. Meshalkina A. Vysochina. In: Proc. Intern. Conf. ECOBALTICA-2002. St-Petersburg, Russia, 21–23.10.2002, p. 64.