

На правах рукописи

КОСТАРЕВ Сергей Николаевич

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ  
ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

05.13.18 – «Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2004

Работа выполнена в Пермском институте Московского государственного университета коммерции.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Низамутдинов Олег Беланович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Кистенёв Юрий Владимирович;  
  
доктор технических наук,  
доцент Глухова Елена Владимировна.

Ведущая организация: Межотраслевой научно-исследовательский институт экологии топливно-  
энергетического комплекса, г. Пермь

Защита диссертации состоится 15 января 2004 г в 12–00 на заседании специализированного совета Д-  
212.267.08 по адресу: 634050 г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 102 второго учебного корпуса.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, направлять по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,  
Томский государственный университет, ученому секретарю университета Буровой Н.Ю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан « 20 » ноября 2003 г

Ученый секретарь  
Диссертационного

совета



Скворцов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время большое внимание уделяется математическому моделированию процессов, протекающих на полигонах захоронения твердых бытовых отходов (ТБО). Основные работы в данной области опираются на приближение классических моделей «теории реакторов», моделей «типового химико-технологического оборудования» к описанию процессов, протекающих на полигонах ТБО. Учитывая определенную сложность точного математического описания полигона ТБО, нами было предложено, используя известные процедуры управления полигоном, выявить ряд лимитирующих и управляемых факторов, для разработки модели управления полигоном с целью достижения определенного результата (например, уменьшение эмиссии наиболее токсичных загрязнений, ускорение жизненного цикла полигона).

Фундаментальные теоретические положения и практические рекомендации по эксплуатации полигонов захоронения ТБО изложили в научных трудах отечественные и зарубежные исследователи В.В. Разнощик, Я.И. Вайсман, К.Ф. Форстер, Д.А. Дж Вейз, Т.Н. Chtistensen, R. Cossu, R. Stegman, P. Kjedsen, H. Cook, R. Cooper, H. Doedens, а также по управлению распределенными и сосредоточенными системами в области охраны окружающей среды большой вклад сделан В.В. Кафаровым, А.Г. Бутковским, Г.И. Марчуком, и др. Ширина и глубина выполненных ими исследований создает предпосылки для рассмотрения полигона захоронения ТБО как биореактора и разработки эффективных технологий по управлению процессами на полигонах ТБО.

**Целью работы** является – разработка системы управления на основе детерминированной математической модели процессом утилизации отходов на полигонах захоронения ТБО.

**Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:**

1. Обосновать лимитирующие и управляющие факторы биодegradации ТБО.
2. Разработать подсистему моделей управления состоянием полигона ТБО. Формализовать наиболее важные модели. Синтезировать задачу программного управления полигоном ТБО в детерминированной постановке.
3. Разработать принципиальную схему и алгоритм управления рециркулируемым фильтратом полигона ТБО.
4. Разработать схему автоматизации управления полигоном ТБО.
5. Разработать имитационную модель управления полигоном ТБО.
6. Разработать комплекс компьютерного программного обеспечения, реализующего теоретические исследования.

**Объектами исследования являются:** реальный объект – полигон захоронения твердых бытовых отходов, физические модели – лабораторные стенды, математические модели – аналитическое, численное и имитационное моделирование.

**Методы исследования**

Поставленные в работе задачи решены с использованием разделов и положений теории автоматического управления, дифференциального исчисления, методов аналитического и численного моделирования.

**На защиту автором выносятся следующие основные положения:**

– научное обоснование процесса рециркуляции фильтрата как технологии управления полигоном ТБО, позволяющей достичь сокращение жизненного цикла полигона и уменьшение экологической нагрузки на окружающую среду;

– основными критериями, влияющими на эмиссию продуктов биодegradации отходов являются: влажность, рН и температура, которые позволяют при поддержании их в определенном диапазоне управлять процессами, протекающими на полигоне;

– применение аналитической модели управления полигоном ТБО в классе распределенных моделей механики сплошных сред позволит достичь эффективных результатов функционирования объекта;

– динамика процессов, протекающих на полигоне может быть изучена на основе имитационного моделирования, в результате чего может быть решена проблема с макродлительностью и дороговизной натуральных экспериментов;

– разработанное технологическое решение по управлению полигоном захоронения ТБО обладает эколого-экономической эффективностью.

**Научная новизна**

– разработан новый способ управления полигоном ТБО за счет рециркулируемого потока сточных вод, прошедших специальную реагентную обработку, на который выдан патент на изобретение № 2162059RU;

– разработана математическая модель структуры потоков материального баланса полигона захоронения ТБО, позволяющая управлять наилучшими значениями лимитирующих факторов;

– разработана аналитическая модель управления полигоном захоронения ТБО в классе распределенных моделей управления, не имеющая аналогов.

**Достоверность научных положений и результатов проведенных исследований подтверждается:**

– основные положения диссертационной работы подтверждены результатами имитационного моделирования и экспериментальными данными. Экспериментальные исследования проводились на физических моделях управления, реализованных на лабораторных стендах;

– корректным применением современных методов исследования, расчета параметров схемы очистки и разработки моделей управления полигоном ТБО.

**Практическая реализация работы:**

– по результатам исследований разработаны методические указания и рекомендации по мониторингу и управлению санитарным полигоном захоронения твердых бытовых отходов, которые использованы комитетом по охране природы г. Нитвы при проектировании и строительстве второй очереди нового городского полигона ТБО;

– теоретические положения и результаты научных исследований используются в лекциях при чтении лекционных курсов на кафедре Информационных технологий и высшей математики в Пермском институте Московского государственного университета коммерции и включены в методическую и учебную литературу для студентов;

– разработанное программное обеспечение передано в информационную базу ЦНТИ.

**Апробация работы:** результаты научных исследований по теме диссертации доложены на региональной научно-технической конференции «Экология города» (Пермь, 1998); на X, XI Всероссийских конференциях студентов, аспирантов, молодых ученых. «Экология: Проблемы и пути решения» (Пермь, 2002-03); на Научно-практической конференции «Экологизация образования в XXI веке» (Екатеринбург: УГТУ, 2000); на Всероссийской школьно-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2000); на 2-ой международной научной конференции студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы современной науки» (Самара, 2001); на 3-ем Международном конгрессе по управлению отходами «ВэйстТэк-2003» (Москва); на V Международной конференции «Инженерная защита окружающей среды» (Москва, 2003); на VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Экология. Человек. Общество» (Киев, 2003); на I Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование» (С.-Пб: Центральный НИИ технологии судостроения, 2003), а также научно-технических конференциях и семинарах ПИ(ф)МГУК, ПермГТУ, ПермГУ в 1996-2003 гг.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Диссертационная работа выполнена в рамках целевой программы «Отходы» на 1996–2000 гг., областных целевых комплексных программ «Охрана окружающей среды Пермской области на 1996-2000 гг. и 2001-2005 гг.» и целевой комплексной программы «Экология Западного Урала (Разработка методов обезвреживания и утилизации ТБО и ПО на полигонах)».

**Полнота изложения положений и результатов, выносимых на защиту, в опубликованных работах.** По результатам научных исследований опубликовано более 30 публикаций.

**Объем и структура работы.** Работа состоит из введения, 6 глав и 5 приложений. Изложена на 199 странице, включает 24 иллюстрации и 11 таблиц, 158 наименований использованных литературных источников на 9 страницах.

Автор выражает благодарность к.т.н., доценту Т.Г. Середина за систематическую помощь при проведении данных исследований (каф. Безопасности жизнедеятельности ПермГТУ), к.т.н., доценту Р.А. Файзрахманову (каф. Автоматизированные системы управления ПермГТУ) за методическую помощь и высококвалифицированные консультации, а также всем сотрудникам кафедр "АСУ", "Машины и аппараты производственных процессов" Пермского гос. технического университета, кафедры "Информационных технологий и высшей математики" Пермского института Московского гос. университета коммерции за доброжелательное отношение и помощь при проведении научных исследований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, связанная с экспоненциальным ростом количества отходов и необходимости разработки эколого-экономичных технологий, связанных с их утилизацией. Определены задачи исследований, отмечается новизна и практическая ценность работы.

**Первая глава** посвящена проблеме образования и технологиям утилизации ТБО с акцентированием внимания на полигонах захоронения ТБО. Под полигоном понимается комплекс инженерных сооружений, предназначенный для складирования, изоляции и обезвреживания ТБО. При анализе жизненного цикла полигона выявлены лимитирующие этапы, уменьшение которых за счет введения процедур управления может значительно ускорить воспроизводство земель и уменьшить экологический ущерб продуктами биоразложения ТБО. Продукты разложения отходов классифицированы по агрегатному состоянию на три фазы: жидкую, газообразную и твердую. Жидкая фаза представляет фильтрационные стоки (leachate) – фильтрат; газообразной фракцией является биогаз (leakade); твердая фракция представляет не утилизируемый остаток (вечное захоронение), образованный инертными и трудноразлагаемыми веществами. При изучении процедур управления полигоном, была выбрана технология управления рециркуляции фильтрационных стоков, позволяющая решить вопрос, как управления, так и утилизации фильтрата. Таким образом поставленная проблема утилизации отходов направлена на решение трех задач:

- *выбор технологии утилизации отходов;*
- *разработка модели управления технологией утилизации отходов;*
- *обезвреживание продуктов биодegradации ТБО.*

**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям утилизации отходов. Исследованы различные технологии активного мониторинга полигона захоронения ТБО, процедуры управления полигоном влияющие на стабилизацию процессов биодеструкции отходов и качество фильтрата. С целью изучения возможности применения технологии рециркуляции фильтрационных стоков была проведена серия лабораторных экспериментов. В лабораторных исследованиях изучался процесс биодеструкции измельченной массы ТБО в анаэробных условиях в мезофильном интервале температур ( $37 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Морфологический состав массы соответствовал составу ТБО, поступающих на свалки бытового мусора в Пермской области. Подготовленная масса ТБО имела разную влажность. Исследованиями установлено, что наиболее интенсивно процесс биодеструкции отходов протекает при влажности ТБО – 80%. При этом максимальные объемы выделения фильтрата и газа наблюдаются при переходе кислотных процессов в метановую фазу. Было установлено, что рН фильтрата является косвенным показателем изменений объемов выделяющихся газов и фильтрата. Исследования показали, что ускорение стадии метаногенеза на реальном полигоне может быть достигнуто путем принудительного влагонасыщения складываемых отходов до оптимальной влажности 60–80 % в процессе рециркуляции фильтрата. Однако рециркуляция фильтрата с низким рН может привести к дестабилизации процессов биодеструкции

отходов на полигоне, поэтому необходимо предварительное рН-регулирование кислого «молодого» фильтрата. На специально разработанной лабораторной установке в течение полугода проводился процесс рециркуляции фильтрата, предварительно обработанного 1%-ным раствором гидроксида кальция до рН=9,5. Результаты эксперимента показали, что известкование рециркулируемого кислого фильтрата на входе в реактор способствовало значительному снижению концентраций тяжёлых металлов в конечном стоке из реактора. При этом время стабилизации процессов по рН сократилось вдвое, а концентрации тяжелых металлов снижались в среднем на 70%. Были проанализированы результаты, полученные на пилотных установках и в полномасштабных экспериментах, проводимых на полигонах захоронения ТБО, известных из литературных данных, что показало целесообразность ввода системы рециркуляции фильтрационных стоков на эксплуатационных, рекультивируемых и проектируемых полигонах ТБО.

**Третья глава** посвящена моделированию процессов, протекающих на полигоне захоронения ТБО. Проведенный анализ известных подходов к моделированию процессов, протекающих на полигоне захоронения ТБО показал, что существуют два крайних класса моделей: модели, с отсутствием априорной информации о механизмах, которые управляют состоянием системы, построенной по принципу черного ящика и модели с заданной внутренней структурой, основанные на моделях реакторов. В данной работе полигон рассматривается как комплекс материальных, энергетических и информационных потоков, составляющий единый материально-энергетический баланс.

На полигоне захоронения ТБО протекает сложный комплекс физических, химических и биологических процессов взаимосвязанных между собой. В биохимические процессы включены: основные химические реакции, окислительно-восстановительный потенциал, активная реакция среды, рН, а также роль бактерий на разной стадии биodeградации отходов, рассмотрены сообщества микроорганизмов, продукты биоразложения ТБО в зависимости от воздушного (кислородного) режима в массиве ТБО. Под физическими процессами понимается конвекция, диффузия, массоперенос, теплоперенос, влажность и др. Влажность ТБО может служить управляемым фактором и может быть положена в основу модели управления. Важным фактором также является материальный баланс жидкой субстанции, который представлен в виде уравнения:

$$q_{ao} + q_p + \Delta q - q_{cm} - q_{\phi} = 0 \quad (1)$$

где  $q_{ao}$  – поступление влаги с атмосферными осадками;

$q_p$  – количество фильтрата, образующегося в процессе биодеструкции ТБО;

$q_{cm}$  – поверхностный сток и испарение;

$q_{\phi}$  – фильтрат, поступающий в дренажную систему;

$\Delta q$  – рециркулируемый поток фильтрата в массив ТБО.

Переменные сгруппированы в виде основных функциональных зависимостей: входной поток  $F_1$ , выходной поток  $F_2$ , образование фильтрата в секции полигона  $F_3$ .

$F_1(q_{ao}(t), q(\text{pH}, t))$  – входной поток;

$F_2(q_{\phi}(\text{pH}, t), q_{cm}(t))$  – выходной поток;

$F_3(q_p(\text{pH}, \omega, x, t))$  – образование фильтрата на полигоне,

(2)

где  $\omega$ , рН,  $x$ ,  $t$  – соответственно влажность ТБО, активная реакция среды, пространственная координата (осевая составляющая в массиве ТБО), время.

Разработана компьютерная программа, использующая эмпирическую зависимость, показывающую связь: атмосферные осадки – инфильтрация – сток и влияние этих показателей на количество фильтрата  $q_{\phi}$ :

$$q_{\phi} = k \cdot P \cdot A \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (3)$$

где  $P$  – атмосферные осадки, мм/год;

$k$  – коэффициент инфильтрации представляющий разность влагопогло-тительного коэффициента и коэффициента стока, зависящих от сезона года;

$A$  – площадь, занятая ТБО, м<sup>2</sup>.

**В четвертой главе** разработана подсистема моделей управления процессами, протекающими на полигоне захоронения ТБО. На данном этапе исследования изучены модели водного баланса, кислотности среды и температурного режима, остальные виды моделей учтены в качестве параметров и коэффициентов. На основе уточнения и обоснования факторов функционирования полигона – влажность отходов, рН и температура выбраны основными лимитирующими критериями, управляющими и наиболее изученными технологиями управления предложены управление жидкой фазой (рециркуляция фильтрата) и газовой фазой (прокачивание воздуха – Belüftung) через массив полигона ТБО. На примере технологии рециркуляции фильтрата разработана математическая модель управления полигоном ТБО.

Рассматривая функцию плотности материальной среды, в случае одномерного математического описания, уравнение материального баланса для отрезка  $\Delta x$  в окрестности произвольной точки  $x$ , описано уравнением (4) (рис.1):

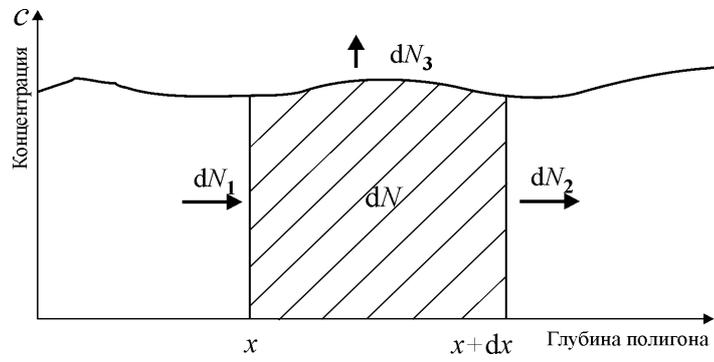


Рис. 1. Схема материального баланса жидкой субстанции

$$dN = dN_1 - dN_2 - dN_3, \quad (4)$$

где  $dN_1$  – масса втекающей скалярной субстанции через сечение  $x$  за время  $dt$ ,

$$dN_1 = \tilde{c} dt = \tilde{c} \cdot v dt; \quad (5)$$

$dN_2$  – масса субстанции, вытекающей через сечение  $x+dx$  за счет изменения скорости  $v(x, t)$  и плотности  $\tilde{c}(x, t)$  за время  $dt$ ,

$$dN_2 = \left( \tilde{c} + \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} dx \right) \left( v + \frac{\partial v}{\partial x} dx \right) dt \quad (6)$$

$dN_3$  – сток (утечки) жидкой субстанции с отрезка  $dx$  за время  $dt$ ,

$$dN_3 = b(x, t) dx dt \quad (7)$$

$dN$  – изменения массы субстанции за счет изменения плотности на элементарном отрезке  $[x, x + dx]$  за время  $dt$ ,

$$dN = \frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} dx dt. \quad (8)$$

Разница между поступившим и вышедшим количеством жидкости (правая часть уравнения (4)) составит:

$$\begin{aligned} dN_1 - dN_2 - dN_3 &= \tilde{c} v dt - \left( \tilde{c} + \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} dx \right) \left( v + \frac{\partial v}{\partial x} dx \right) dt - b dx dt = \\ &= \tilde{c} v dt - \tilde{c} v dt - \tilde{c} \frac{\partial v}{\partial x} dx dt - v \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} dx dt - \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} dx \frac{\partial v}{\partial x} dx dt - b dx dt. \end{aligned} \quad (9)$$

После сокращения и пренебрегая величинами малого порядка, получим:

$$-\left( \tilde{c} \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + b \right) dx dt = -\left( \frac{\partial(\tilde{c} \cdot v)}{\partial x} + b \right) dx dt = -\left( \frac{\partial \tilde{q}}{\partial x} + b \right) dx dt. \quad (10)$$

Подставляя (8) и (10) в (4), сокращая на  $dt dx$  и перенося все в левую часть получим:

$$\frac{\partial \tilde{c}(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{q}(x, t)}{\partial x} + b(x, t) = 0, \quad (11)$$

или, без учета возмущений,

$$\frac{\partial \tilde{c}(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{q}(x, t)}{\partial x} = 0. \quad (12)$$

Задача управления полигоном заключается в минимизации отклонений влажности и pH-среды полигона от рекомендуемого режима, вызванных естественными условиями, стоками фильтрата и внутренними реакциями. В качестве управляющего параметра выступает величина входного потока.

С точки зрения управления целесообразней рассматривать не истинные значения переменных, а их отклонения от стационарного режима, для чего представим их в виде аддитивных функций:

$$\tilde{q} = q_0 + q; \quad \tilde{c} = c_0 + c; \quad \tilde{u} = u_0 + u, \quad (13)$$

где  $q_0, c_0, u_0$  – заданные величины соответственно поток, концентрация и управление;  $q, c, u$  – отклонения от стационарного режима, соответственно потока, концентрации и управления.

Тогда в качестве критериев качества управления будут выступать показатели отклонения концентрации влаги и pH-среды полигона от стационарного режима в теле полигона за весь период управления:

$$\int_{t_0}^{t_k} \int_{x_0}^{x_k} |c(x, t)| dx dt \rightarrow \min; \quad (14)$$

$$\int_{t_0}^{t_k} \int_{x_0}^{x_k} |q_{pH}(x, t)| dx dt \rightarrow \min. \quad (15)$$

Изменение характеристик материальной среды реализуется за счет регулирования скорости  $v(x, t)$  или потока  $q(x, t)$ , что задается с помощью следующих соотношений:

$$v(x, t) = -k_1 \int_{t_0}^t q_{pH}(x, \tau) d\tau; \quad (16)$$

$$q(x, t) = -k_2 \int_{x_0}^x c(\xi, t) d\xi. \quad (17)$$

Функциональные зависимости (16), (17) представляют собой физическую желаемую влажность и pH-среду полигона в пространственно-временном базисе.

Изменение основных характеристик субстанции полигона ТБО под воздействием возмущающих воздействий показаны на рис.2.

Управление полигоном ТБО в детерминированной постановке с обратными связями по отклонению величин  $q$  и  $c$  от стационарного режима формализовано системой уравнений:

$$\frac{\partial c(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = -b(x, t), \quad q(x, t) = u(x, t) \pm z(x, t), \quad (18)$$

где  $u(x, t)$  – функция управления,  $z(x, t)$  – функция колебаний влажности за счет внутренних процессов без потери материальной массы; при условиях на переменные:  $x_0 \leq x \leq x_k$ ;  $t \geq t_0$  и при следующих начальных и граничных условиях:

$c(x, t_0) = c_0(x)$ ;  $q(x_0, t) = q_0(t)$ ;  $q(x_k, t) = q_k(t)$ .

Функция управления в наиболее общем виде с учетом производных и интегралов без учета возмущения может быть представлена следующим уравнением:

$$u(x, t) = k_{11}q + k_{12}q'_t + k_{13}q'_x + k_{14} \int_{t_0}^t q dt + k_{15} \int_{x_0}^x q dx + k_{21}c + k_{22}c'_t + k_{23}c'_x + k_{24} \int_{t_0}^t c dt + k_{25} \int_{x_0}^x c dx. \quad (19)$$

Первоначально рассмотрим простейший вид функции управления – пропорциональный относительно величин отклонения  $c(x, t)$  и  $q(x, t)$  от стационарного режима:

$$u(x, t) = k_1 q(x, t) + k_2 c(x, t), \quad (20)$$

используя метод разделения переменных, получена система уравнений:

$$\begin{cases} q'_t(1 - k_1) + k_2 q'_x = -k_2 b \pm z'_t, \\ c'_t(1 - k_1) + k_2 c'_x = -(1 - k_1) b \pm z'_x. \end{cases} \quad (21)$$

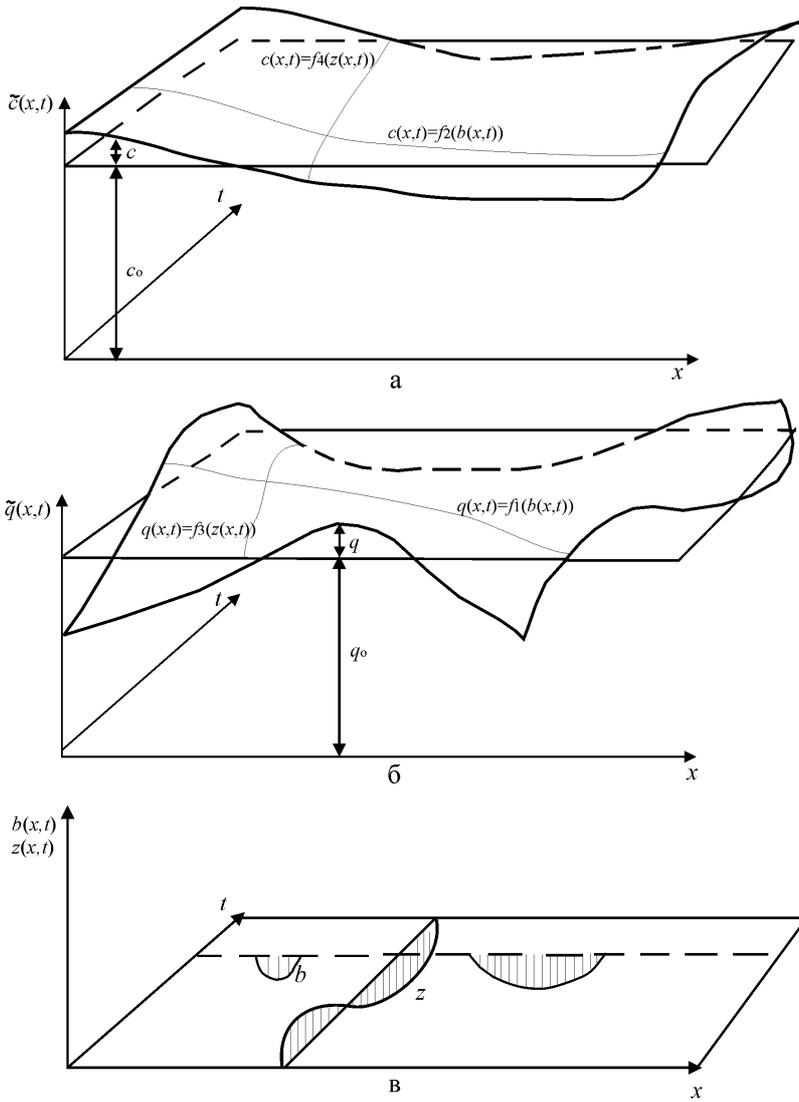


Рис. 2. Управление полигоном ТБО в пространственно - временном базисе:

а) управление концентрацией среды:  $c = f_2(b)$  – мгновенное управление в пространстве;  $c = f_4(z)$  – локальное управление по времени; б) управление потоком материальной субстанции:  $q = f_1(b)$  – мгновенное управление в пространстве;  $q = f_3(z)$  – локальное управление по времени; в) возмущающие воздействия:  $b$  – утечки фильтра (потеря материальной массы);  $z$  – колебания плотности материальной среды.  $\tilde{q}, \tilde{c}$  – истинные значения;  $q, c$  – рекомендуемые значения;  $q_0, c_0$  – отклонения от рекомендуемого режима, соответственно плотности и концентрации

Исследуя влияние утечек жидкой субстанции  $b(x,t)$  и колебания массы жидкой субстанции  $z(x,t)$  в массиве полигона на поведение модели по функциям состояния  $q(x,t)$  и  $c(x,t)$ , положив начальные и граничные условия нулевыми, предложено четыре варианта решения системы:

$$\begin{aligned} 1) \quad q(x,t) &= f_1(b(x,t)); & 2) \quad c(x,t) &= f_2(b(x,t)); \\ 3) \quad q(x,t) &= f_3(z(x,t)); & 4) \quad c(x,t) &= f_4(z(x,t)). \end{aligned} \quad (22)$$

Аналитическое решение системы уравнений (21) получено с использованием функции Грина:

$$q(x,t) = \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x G(x,\xi,t,\tau) \omega(\xi,\tau) d\xi d\tau, \quad (23)$$

где  $G(x,\xi,t,\tau)$  – функция Грина (переходная функция системы);  
 $\omega(\xi,\tau)$  – стандартизирующая функция внешних воздействий;  
 $x, t$  – пространственная координата и время;  
 $\xi, \tau$  – переменные интегрирования по  $x, t$ .

Для варианта системы (20) значения функций  $G$  и  $\omega$  имеют следующий вид:

$$G(x,\xi,t) = \frac{1}{\beta} \exp\left[-\frac{\alpha}{\beta}(x-\xi)\right] \delta\left[t - \frac{\alpha}{\beta}(x-\xi)\right] \mathbf{1}(x-\xi) \quad \omega(x,t) = \alpha c \delta(t) + 3q(t)\delta(x) + f(x,t) \quad (24)$$

при  $t \geq 0, x_0 \leq x \leq x_k$

где  $\alpha = 1 - k_1$ ;  $\beta = k_2$ ;  $\psi = 0$ ;  $1(x - \xi) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \geq \xi \\ 0, & \text{при } x < \xi \end{cases}$  – функция Хевисайда.

I и II вариант – влияние утечек жидкой субстанции  $b(x, t)$  на материальную среду при обратной связи, пропорциональной  $q(x, t)$  и  $c(x, t)$ :

$$\begin{aligned} q(x, t) &= f_1(b(x, t)) & q(x, t) &= \frac{\alpha k_2}{(\alpha x - \beta t)^2} \\ c(x, t) &= f_2(b(x, t)) & c(x, t) &= \frac{\alpha(1 - k_1)}{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2} \end{aligned}$$

III и IV вариант – влияние колебания жидкой субстанции при обратных связях, пропорциональных  $q(x, t)$  и  $c(x, t)$ :

$$\begin{aligned} q(x, t) &= f_3(z(x, t)) & q(x, t) &= \frac{\alpha t}{\sqrt{(\alpha x + \beta t)^2 + \alpha^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\alpha t}{\sqrt{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}}, \\ c(x, t) &= f_4(z(x, t)) & c(x, t) &= \frac{2(\alpha x - \beta t)}{\sqrt{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{xt}{\sqrt{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}}. \end{aligned} \quad (26)$$

Выражения (25), (26) определяют характер изменения концентрации жидкой фазы и интенсивности (величины) потока при воздействии одиночного возмущения физических или биохимических процессов, аппроксимированных функциями вида:  $b(x, t) = \frac{\delta(t)}{x^2 + 1}$ ,  $z(x, t) = \frac{\delta(x)}{t^2 + 1}$ . (27)

Компьютерное моделирование выполнено с использованием пакета *PDETOOLS* вычислительной системы *MAPLE V*: *Pdsolve* поиск аналитического решения дифференциального уравнение в частных производных; *PDEplot* численное решение уравнения методом Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным размером шага.

> with(PDEtools);

$$\begin{aligned} \underline{q(x, t) = f_1(b(x, t))} & \quad PDE := (1 - k_1) \left( \frac{\partial}{\partial t} q(x, t) \right) + k_2 \left( \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) \right) = \frac{k_2}{x^2 + 1} \\ > \text{ans:=pdsolve;} & \quad q(x, t) = \arctan(x) + F1 \left( \frac{t k_2 - x + x k_1}{k_2} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \underline{c(x, t) = f_2(b(x, t))} & \quad PDE := (1 - k_1) \left( \frac{\partial}{\partial t} c(x, t) \right) + k_2 \left( \frac{\partial}{\partial x} c(x, t) \right) = \frac{1 - k_1}{x^2 + 1} \\ > \text{ans:=pdsolve;} & \quad c(x, t) = \frac{-\arctan(x) + \arctan(x) k_1 - F1 \left( \frac{t k_2 - x + x k_1}{k_2} \right) k_2}{k_2} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \underline{q(x, t) = f_3(z(x, t))} & \quad PDE := (1 - k_1) \left( \frac{d}{dt} q(x, t) \right) + k_2 \left( \frac{d}{dx} q(x, t) \right) = \frac{(1 - k_1)}{(t^2 + 1)^2} \\ > \text{ans:=pdsolve;} & \quad q(x, t) = \frac{1}{2} \frac{-1 + 2F1 \left( \frac{t k_2 - x + x k_1}{k_2} \right) t^2 + 2F1 \left( \frac{t k_2 - x + x k_1}{k_2} \right)}{t^2 + 1} \end{aligned} \quad (30)$$

где  $F1$  – произвольная функция.

Далее были проведены исследования поведения модели материальной среды полигона при условии включения в закон управления более сложных зависимостей от  $q(x, t)$  и  $c(x, t)$  с учетом производных и интегралов (19). Проводя аналогичные математические закономерности были получены следующие зависимости:

$$\text{I вар.} \quad q(x, t) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{\varphi}{\alpha} t\right) \frac{k_2 \alpha^2}{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2} - k_2 \operatorname{arctg} \frac{\alpha x - \beta t}{\alpha} \quad (31)$$

$$\text{II вар.} \quad c(x, t) = \exp\left(-\frac{\varphi}{\alpha} t\right) \frac{\alpha^2}{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \text{III вар.} \quad q(x, t) &= \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{\varphi}{\alpha} t\right) \left[ \frac{\alpha^2 t}{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2} \operatorname{arctg} \frac{\alpha^2 t}{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}{2\alpha^2} \cdot \ln \left( \frac{((\alpha x - \beta t)^2 + 1)}{\alpha^4} + t^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \text{IV вар.} \quad c(x, t) &= -\frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{\varphi}{\alpha} t\right) \left[ \frac{(\alpha x - \beta t) \alpha^3 t}{((\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2)((\alpha x + \beta t)^2 + \alpha^2(1 + t^2))} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\alpha x - \beta t) \alpha^2}{((\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2) \sqrt{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}} \operatorname{arctg} \frac{\alpha t}{\sqrt{(\alpha x - \beta t)^2 + \alpha^2}} \right] \end{aligned} \quad (34)$$

Полученные выражения (31–34) дают представление о характере зависимости переменных состояния материальной среды  $q(x, t)$  и  $c(x, t)$  при воздействии возмущающих факторов. Из полученных функциональных зависимостей очевиден факт, что включение в закон управления интегральной составляющей по отклонению  $c(x, t)$  от стационара появилась асимптотическая экспоненциальная устойчивость процесса по координатам  $q(x, t)$  и  $c(x, t)$  во времени.

Таким образом, синтезирована задача управления полигоном захоронения ТБО, которая заключается в мониторинге и управлении физико-химическими параметрами полигона (влажности и рН) в пространственно-временном базисе, при моделировании детерминированных возмущающих воздействий.

Далее была решена плоская контактная задача теплопроводности методом конечных элементов и получена картина распределения температурных полей в массиве ТБО. Для распределения морфологического состава отходов в массиве ТБО была разработана компьютерная программа, реализующая генератор случайных чисел.

**В пятой главе** разработана имитационная модель управления процессами, протекающими на полигоне захоронения ТБО, реализующая технологию рециркуляции фильтрата (рис.3). Принцип работы заключается в том, что складирование отходов на высоконагружаемом полигоне площадью более 15 га осуществляется по отдельным секциям.

При заполнении первой секции полигона (1) через определенное время будет выделяться фильтрат с низким рН, высокими концентрациями химического потребления кислорода (ХПК) и биологического потребления кислорода (БПК), который собирается в буферной емкости (3). При высоких концентрациях тяжелых металлов и низком рН фильтрат перед рециркуляцией следует подавать на ступень известкования (4). При избытке фильтрата одна его часть, предварительно произвесткованная, направляется на рециркуляцию, а другая - на гидробиологические сооружения (в). При переходе кислотной стадии в метановую, заполнении секции 1 и открытии секции 2 возможна рециркуляция образующегося «молодого» фильтрата из секции 2 через старые отходы секции 1 без ступени известкования.

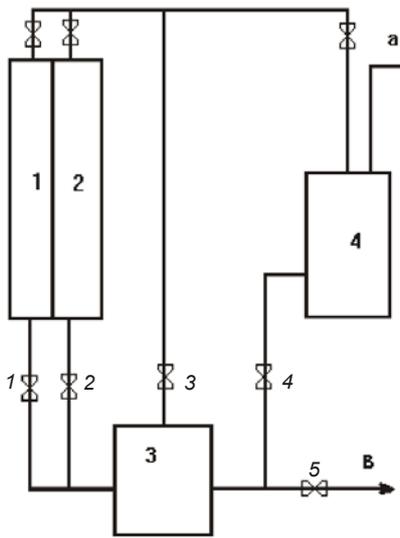


Рис.3. Имитационная модель управления полигоном захоронения ТБО: 1 – секция полигона ТБО со старыми отходами; 2 – секция полигона со свежими отходами; 3 – резервуар-накопитель; 4 – ступень известкования; а - внесение известкового молока; в - отвод фильтрата на очистку

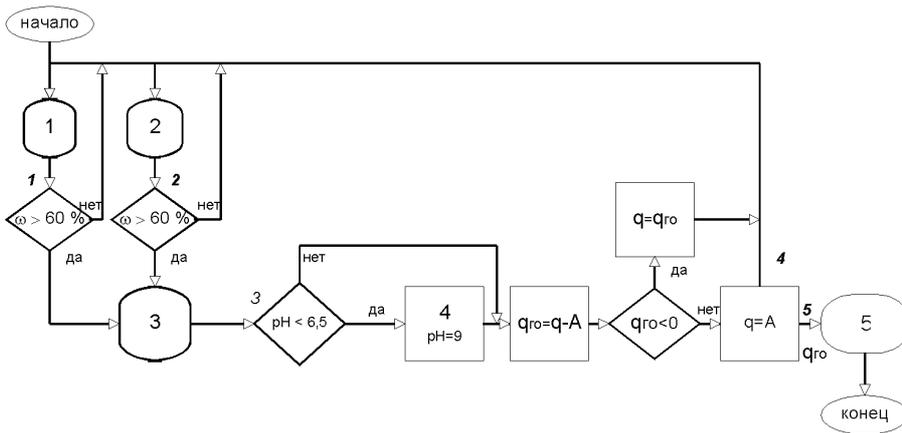


Рис.4. Блок-схема алгоритма управления полигоном захоронения ТБО:  $A$  - необходимое количество фильтрата, подаваемого на рециркуляцию;  $q_{го}$  - количество фильтрата, подаваемого на гидробиологическую очистку;  $q$  - количество фильтрата, подаваемого на рециркуляцию;  $\omega$  - влажность; (1) - физический объект;  $\diamond$  - оператор условия; 1 - вентиль;  $\square$  - выражение

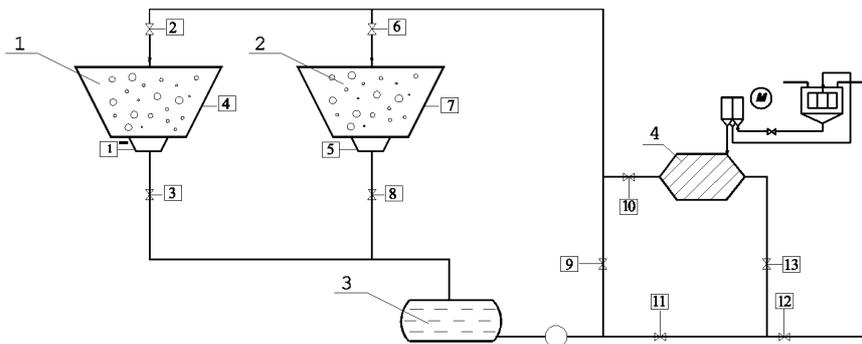


Рис.5. Схема автоматизации процесса рециркуляции фильтрата полигона захоронения ТБО: 1, 5 - измерение pH; 2, 6 - регулировки потока рециркулируемого фильтрата на орошение; 3, 8 - измерение потока образующегося фильтрата; 9 - подача фильтрата на орошение без известкования; 10 - регулировка потока произвесткованного фильтрата; 11 - подача фильтрата на дальнейшую обработку; 12 - подача фильтрата на биопруды; 13 - подача фильтрата на ступень известкования

Рис.6. Результаты эксперимента моделирования управляющих и возмущающих воздействий

Алгоритм решения поставленной задачи управления полигоном ТБО, в зависимости от изменений в его химическом составе представлен в виде блок-схемы (рис.4). При достижении влажности 60% в первой секции полигона, фильтрат поступает в резервуар накопитель 3, при pH-фильтрата менее 6,5 фильтрат проходит ступень известкования до установления слабощелочной среды. И далее необходимое количество фильтрата для поддержания влажности в теле полигона – 60% подается на рециркуляцию. При заполнении 1 секции, заполняется 2 и производится ее орошение. На рис.4 показана схема автоматизации процесса рециркуляции фильтрата полигона ТБО. Для мониторинга физико-химических величин предполагается установка мобильных датчиков.

В основе имитации динамики используемых переменных положены приближенные функциональные зависимости. Для имитации возмущений использован генератор случайных чисел. Возмущения носят знакопеременные импульсы с 10%-ным отклонением от текущего режима. Программное управление технологическим режимом заключается в поддержании и уменьшении отклонения от заданного процесса. Проводится мониторинг физико-химических величин, для стабилизации влажности субстанции массива – разработан алгоритм, реализующий управление процессами на полигоне ТБО с обратной связью. Для ускорения стабилизации pH-среды рассчитывается необходимое количество известкового раствора, добавляемого в рециркулируемый фильтрат, в зависимости от pH-среды массива ТБО и объема рециркулируемого фильтрата. Для удобства визуального мониторинга возможно ускорение (замедление) или остановка имитационных процессов. Программа создает отчет мониторинга в виде файла базы данных. Результаты эксперимента

моделирования управляющих и возмущающих воздействий на полигоне захоронения ТБО представлены на рис.6. Программа написана на объектно-ориентированном языке программирования Delphi и может быть модифицирована для построения АСУТП полигона захоронения твердых бытовых отходов.

**В шестой главе** рассчитан эколого-экономический анализ предотвращенного ущерба окружающей среде, наносимого полигоном захоронения ТБО для предлагаемой технологической схемы управления полигоном ТБО. Затраты рассчитаны по 2 векторам:

1. Затраты на активный мониторинг.....  $f(\omega)$
2. Плата за ущерб, наносимый неочищенным фильтратом источникам гидросферы.....  $f(t)$

Экспериментальные данные изменения рН фильтрата от влажности отходов:

$f_{pH} = pH(t, \omega)$ ; зависимости объёма газовой выделения:  $f_g = q_g(t, \omega)$  и количество образования фильтрата от времени:  $f_{\phi} = q_{\phi}(t, \omega)$  получены в лабораторных исследованиях. Была поставлена и решена бикритериальная задача:

1. Определение влажности отходов, при которой рН субстрата достигает оптимальной величины за наименьшее время:  $\omega_{opt}$  при котором  $pH \rightarrow 7$ ;  $t \rightarrow \min$

2. Определение влажности отходов для наилучшей экономической эффективности:  $\omega_{opt}$  при котором:

$$f_{эк} = f(\omega) + f(t) \rightarrow \min, \quad (35)$$

$$f(\omega) = f(\omega)_{кан} + f(\omega)_{мек}$$

где  $f(\omega)_{кан}$  и  $f(\omega)_{мек}$  – капитальные и текущие затраты.

Алгоритм решения заключался в следующем:

– для расчета эмпирической функциональной зависимости  $pH(\omega, t)$  использован метод наименьших квадратов (полином 3 степени) и получена зависимость:

$$f_{pH}(\omega, t) = 1.5 \cdot 10^{-2} + 4.18 \cdot 10^{-2} t + 2.99 \cdot 10^{-4} t^2 + 6.46 \cdot 10^{-7} t^3 + 0.28 \omega + 5 \cdot 10^{-3} \omega^2 + 3.1 \cdot 10^{-5} \omega^3;$$

– с помощью разработанной программы сделан срез поверхности  $f_{pH}$  при  $pH=7$  с дискретностью 5% $\omega$  и определено необходимое время для достижения заданной величины рН и влажности в диапазоне 40–80%.

Модельный диапазон времени из лабораторных исследований масштабирован на реальный объект и рассчитана совокупная экономическая эффективность:

$$f_{эк} = f(\omega) + f(t) \rightarrow \min. \quad (36)$$

Проведенный эколого-экономический анализ показал, что при насыщении отходов до влажности 60–80% рециркуляцией предварительного известкованным фильтратом достигается наилучшая экономическая эффективность, что служит свидетельством эколого-экономической целесообразности применения технологии рециркуляции на полигоне ТБО.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработан комплекс моделей управления полигоном ТБО. Исследована детерминированная математическая модель управления процессом рециркуляции фильтрата. Разработана принципиальная схема и алгоритмы управления полигоном, что создает предпосылки для решения важных прикладных задач по экологической безопасности эксплуатации полигона ТБО. Показана эколого-экономическая эффективность предлагаемой схемы управления полигоном ТБО.

**Основные научные и практические результаты** заключаются в следующем:

1. Установлено, что влажность, рН и температура ТБО являются лимитирующими факторами биодegradации отходов. В результате лабораторных экспериментов определены оптимальные диапазоны влажности, рН и температуры. Предложена зависимость: концентрация жидкой субстанции массива ТБО – лимитирующий фактор, входной поток жидкой фазы – управляющий фактор в качестве возможных параметров модели управления.

2. Разработана структура материальных потоков полигона в пространственно-временном базисе, на основе которой выведено уравнение материального баланса с учетом возмущений вызванных утечками фильтрата и внутренними процессами. Приведено аналитическое и численное решение системы дифференциальных уравнений формализующих модель управления полигоном захоронения ТБО: аналитическое решение выполнено с использованием функции Грина, численное решение получено разностным способом с использованием программного пакета MAPLE.

3. Разработана подсистема моделей управления состоянием полигона ТБО. Изучено влияние влажности, рН и температуры на эмиссионные процессы и жизненный цикл полигона ТБО. Разработаны алгоритмы и процедуры управления полигоном ТБО.

4. Создан пакет прикладных компьютерных программ, обеспечивающих проведение имитационных экспериментов с математической и программной моделью управления состоянием полигона ТБО, позволяющие имитировать возмущающие и управляющие воздействия, прогнозировать управление полигоном на относительно большом отрезке времени, что затруднено в натуральных макроэкспериментах.

5. Разработан комплекс компьютерного программного обеспечения, включающий около 10 программ различного направления: АРМ контролера полигона ТБО, мониторинг различных эмиссионных процессов для учета эмиссий и управления полигоном ТБО и др.

6. В процессе исследования разработаны рекомендации по мониторингу и управлению санитарным полигоном захоронения твердых бытовых отходов, которые включены в проектную документацию строительства второй очереди нового городского полигона захоронения ТБО г. Нытва.

7. Материалы диссертационных исследований использованы в учебных пособиях по курсу лекций «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Экологическая безопасность» в Пермском государственном техническом университете.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Артемов Н.И., Середа Т.Г., Костарев С.Н., Низамутдинов О.Б. Технологии автоматизированного управления полигоном твердых бытовых отходов / Научно-исследовательский институт управляющих машин и систем. Пермь, 2003.– 266 с.

2. Патент 2162059 RU. Способ очистки сточных вод полигонов твердых бытовых отходов от тяжелых металлов; заявл. № 20001100422, приоритет 06.01.2000; зарегистрирован 20.01.2001. – 8 с. (в соавторстве с Середа Т.Г., Плаховой Л.В.).

3. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Рекомендации по биоочистке стоков на полигонах захоронения твёрдых бытовых отходов // Наука – производству. – 2002. – №4. – С. 47-48.
4. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Регулирование качества стоков на полигонах захоронения твёрдых бытовых отходов // Наука – производству. – 2002. – №4. – С. 48-49.
5. Костарев С.Н., Серeda Т.Г. Математическое моделирование физико-химических процессов, протекающих на полигонах депонирования твёрдых бытовых отходов: Сб. тр. / Перм. ин-т МГУКа. – Пермь, 1998. – Вып. 1 – С.153 - 159.
6. Низамутдинов О.Б., Костарев С.Н., Серeda Т.Г. Эколого-экономический анализ ущерба, наносимого фильтратом твердых бытовых отходов объектам гидросферы // Сб. науч. тр., вып.50. – Пермь, НИИУМС, 2001. – С.21-27.
7. Низамутдинов О.Б., Костарев С.Н., Серeda Т.Г. Имитационная модель управления состоянием полигона захоронения твердых бытовых отходов // Сб. науч. тр., вып.52. – Пермь, НИИУМС, 2003. – С.15-20.
8. T.Sereda, S.Kostarew, O.Nizamutdinow, S.Prohorow, A.Agarkow. Erarbeitung eines mathematischen Modells der Monitoringsprozesse und der Steuerung der Haushaltsabfälle // Sammelband, Berichte des Hauses der Wissenschaftler, Ausgabe 4, Umweltschutzprobleme. – Hamburg, 2002. – P. 3-9.
9. S.Kostarew, T. Sereda, O. Nizamutdinow, S. Prohorow, A. Agarkow. The ecology-economic approach at the analysis of the cycle of cable production // Sammelband, Berichte des Hauses der Wissenschaftler, Ausgabe 4, Umweltschutzprobleme. – Hamburg, 2002. – P. 10-14.
10. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Метод расчёта эколого-экономического ущерба объектам гидросферы наносимого фильтратом полигонов депонирования твёрдых бытовых отходов (ТБО): Информ. листок / Пермский центр. науч.-техн. информ.–Пермь, 1999. – 3 с., <http://www.shop.csti.ru>.
11. Костарев С.Н., Серeda Т.Г. АСУ ТП полигона захоронения твердых бытовых отходов: Информационно-коммерческий каталог / Государственный научно-исследовательский институт управляющих машин и систем. – Пермь, 2003. – С. 15.
12. Костарев С.Н., Серeda Т.Г. АРМ контролера полигона ТБО: Информационно-коммерческий каталог / Государственный научно-исследовательский институт управляющих машин и систем. – Пермь, 2003. – С. 15.
13. Костарев С.Н., Низамутдинов О.Б., Серeda Т.Г. Активный мониторинг полигона ТБО // Математическое моделирование в естественных науках: Тезисы докладов на всероссийской школе-конференции молодых ученых и студентов. – Пермь, Пермский гос. технический ун-т, 2000. – С. 50.
14. Костарев С.Н., Петров В.Ю., Серeda Т.Г. Постановка задачи активного мониторинга биодеструкции твердых бытовых отходов на санитарном полигоне // Экология города: Материалы региональной научно-технической конференции / Пермский гос. ун-т. – Пермь, 1998.– С.83.
15. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Экологизация промышленного производства как способ сокращения отходов // Экологизация образования в XXI веке: Сб. тезисов докладов научно-практической конференции – Екатеринбург: УГТУ, 2000 – С.46-47.
16. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Методы математического моделирования и прогнозирования эмиссии загрязняющих веществ с полигона ТБО // Актуальные проблемы современной науки: Сб. тезисов докладов 2-ой международной научной конференции студентов и молодых учёных. – Самара: СГТУ, 2001.– С.58.
17. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Актуальность научных исследований в области переработки отходов // Актуальные проблемы современной науки: Сб. тезисов докладов 2-ой международной научной конференции студентов и молодых учёных. – Самара: СГТУ, 2001.– С.56.
18. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Концепция управления процессами на полигоне захоронения ТБО // Актуальные проблемы современной науки: Сб. тезисов докладов 2-ой международной научной конференции студентов и молодых учёных. – Самара: СГТУ, 2001.– С.57.
19. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Автоматизация и управление технологическими процессами на полигоне захоронения ТБО // XXX лет Горно-нефтяному факультету ПГТУ: Сб. тезисов докладов научной конференции. – Пермь: ПГТУ, 2001.– С.54.
20. Костарев С.Н., Серeda Т.Г., Низамутдинов О.Б. Модель управления процессами на полигоне захоронения твердых бытовых отходов // XXX лет Горно-нефтяному факультету ПГТУ: Сб. тезисов докладов научной конференции. – Пермь: ПГТУ, 2001.– С.53.
21. Серeda Т.Г., Костарев С.Н. Моделирование процессов, протекающих на полигоне захоронения твердых бытовых отходов // Экология, проблемы и пути решения: Материалы X Всероссийской конференции студентов, аспирантов, молодых ученых / Пермский гос. ун-т. – Пермь, 2002. – С. 176-178.
22. Костарев С.Н., Серeda Т.Г., Низамутдинов О.Б. Исследование состояния полигона твердых бытовых отходов в классе распределенных моделей управления // Экология, проблемы и пути решения: Материалы X Всероссийской конференции студентов, аспирантов, молодых ученых / Пермский гос. ун-т. – Пермь, 2002. – С. 99-105.
23. Костарев С.Н., Серeda Т.Г. Алгоритмы управления полигоном ТБО при детерминированных и случайных возмущениях, вызванных протекающими процессами // Молодежная наука прикамья – 2002: Тезисы докладов областной научной конференции молодых ученых, студентов и аспирантов / Пермский гос. техн. ун-т. – Пермь, 2002. – С. 180-181.
24. Костарев С.Н., Серeda Т.Г. Применение моделей механики сплошных сред к управлению процессом биодegradации твердых бытовых отходов // Экология и научно-технический прогресс: Тезисы докладов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Пермский гос. техн. ун-т. – Пермь, 2002.
25. Низамутдинов О.Б., Серeda Т.Г., Костарев С.Н., Серeda М.А. Математическое моделирование и прогнозирование в урбэкологии // Инженерная защита окружающей среды: Материалы V Международной конференции / Московский гос. ун-т. инженерной экологии – М., 2003. – С. 136-138.
26. Серeda Т.Г., Низамутдинов О.Б., Костарев С.Н., Серeda М.А. Моделирование физико-химических и биохимических процессов сложных антропогенных экосистем // Проблемы химии и экологии: Тезисы докладов областной конференции студентов и молодых ученых / Пермский гос. техн. ун-т. – Пермь, 2003. – С. 59.
27. Серeda Т.Г., Костарев С.Н., Агарков С.И., Прохоров С.И. Вторичное использование отходов кабельного производства // Экология, проблемы и пути решения: Материалы XI Всероссийской конференции студентов, аспирантов, молодых ученых / Пермский гос. ун-т. – Пермь, 2003. – С. 185.
28. Серeda Т.Г., Костарев С.Н., Агарков С.И., Прохоров С.И. Экономика отходов на ОАО «Камкабель» // Экология, проблемы и пути решения: Материалы XI Всероссийской конференции студентов, аспирантов, молодых ученых / Пермский гос. ун-т. – Пермь, 2003. – С. 186-187.
29. Серeda Т.Г., Костарев С.Н., Агарков С.И., Прохоров С.И. Автоматизированная система управления и мониторинга процессов, протекающих на антропогенных объектах // Экология, проблемы и пути решения: Материалы XI Всероссийской конференции студентов, аспирантов, молодых ученых / Пермский гос. ун-т. – Пермь, 2003. – С. 184-185.

30. Серда Т.Г., Низамутдинов О.Б., Костарев С.Н., Серда М.А. Программы мониторинга грунтовых и сточных вод сложных антропогенных экосистем: Материалы VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых // Экология. Человек. Общество / Национальный техн. у-т Украины. – Киев, 2003.

31. Серда Т.Г., Пинаева М.П., Костарев С.Н. Имитационное моделирование экологических объектов с использованием современных case средств // Иммитационное моделирование: Материалы I Всероссийской научно-практической конференции / Центральный НИИ технологии судостроения. – С.-Пб., 2003.

32. Серда Т.Г., Костарев С.Н. Модели и технологии управления полигоном ТБО: Материалы 3-го Международного конгресса по управлению отходами ВэйстТэк-2003. – М., 2003.– С. 263.