

## РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛИГОНОМ ТВЁРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Костарев С.Н.

*ФГБОУВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия (614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 29), e-mail: iums@dom.raid.ru*

Проведён анализ моделей управления полигоном твёрдых бытовых отходов (ТБО). Рассмотрены недостатки одноконтурной распределённой (пространственно-временной) модели управления полигоном ТБО, заключающиеся в обобщении параметров массива отходов. Предложены подходы к построению параметрической модели и разработана многоконтурная динамическая модель управления полигоном ТБО. Определены регулируемые параметры (соотношение  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ , эмиссионные потоки, концентрации ионов тяжёлых металлов) и управляющие воздействия (продувка массива, орошение, добавление реагентов). На основании проведённых лабораторных исследований с анализом эмиссионных потоков и процедур управления разработана передаточная матрица, учитывающая взаимосвязи контуров управления. Разработана система дифференциальных уравнений в частотной и временной областях. Даны подходы к численному решению системы дифференциальных уравнений в конечно-разностной форме. Разработанная система управления позволяет учитывать непосредственные управляющие воздействия на полигон ТБО с учётом устойчивости объекта управления.

Ключевые слова: ТБО, АСУ, полигон ТБО.

## DEVELOPMENT OF PARAMETRICAL MODEL MANagements OF SANITARY LANDFILL MUNICIPAL SOLID WASTE

Kostarev S.N.

*State National Research Politechnical University of Perm, Perm, Russia (614000, Perm, street Komsomolskiy pr., 29), e-mail: iums@dom.raid.ru*

The analysis of models of management of sanitary landfill municipal solid waste (MSW). The one-planimetric model of management is considered by sanitary landfill MSW, consisting in generalization of parameters of a file of waste products. Lacks of model are considered. Approaches to construction of parametrical model are offered and the multiplanimetric dynamic model of management is developed by range TBO. Adjustable parameters (ratio  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ , issue streams, concentration of ions of heavy metals) and managing influences (a purge of a file, an irrigation, addition of reagents) are determined. On the basis of the carried out laboratory researches with the analysis of issue streams and procedures of management the transfer matrix which is taking into account interrelations of contours of management is developed. The system of the differential equations in frequency and time areas is developed. Approaches to the numerical decision of system of the differential equations in certainly – difference form are given. The developed control system allows taking into account direct managing influences of sanitary landfill MSW in view of stability of object of management.

Key words: MSW, ASU, sanitary landfill municipal solid waste.

### Введение

Полигон ТБО – сложная биохимическая система, в которой протекают взаимосвязанные физические, механические, химические и биологические процессы [3]. Создание системы, предназначенной для управления полигоном ТБО как биореактором с несколькими регулируемыми величинами, является актуальной задачей. Распределенная одноконтурная модель управления полигоном ТБО была рассмотрена в работе [4] (рисунок 1).

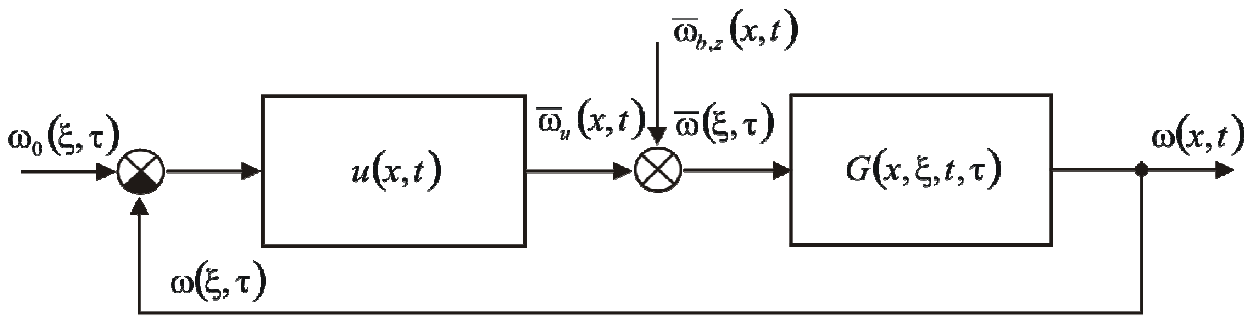


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема распределенного управления полигоном ТБО:  $\omega_0(\xi, \tau)$  – заданное состояние влажности в массиве отходов;  $\omega(x, t)$  – отклонение распределенного выхода от заданного состояния;  $\bar{\omega}_u(x, t)$  – распределенное управляющее воздействие;  $\bar{\omega}_{b,z}(x, t)$  – внешние возмущения;  $\bar{\omega}(\xi, \tau)$  – стандартизирующая функция

**Целью настоящего исследования** являлось изучение влияния физико-химических параметров полигона ТБО на образующиеся эмиссионные продукты (фильтрат и биогаз) и разработка многоконтурной системы управления. В многомерных системах управления, в отличие от одномерных, возмущение одного из контуров может происходить за счет изменений в других контурах.

#### **Материал и методы исследования**

При обосновании методов и алгоритмов управления системами утилизации отходов использовались методы системного анализа, общей теории систем, теории автоматического регулирования, дифференциального и интегрального исчисления, методов математического и имитационного моделирования, статистики и теории вероятностей, механики сплошных сред. Методы исследования включали анализ, сравнение, обобщение, аналогию и статистическую обработку данных. Объектом исследований являлись материально-энергетические и информационные потоки, протекающие на объектах утилизации отходов, рассматриваемые как объекты моделирования и управления. Материалом исследования являлись твёрдые бытовые отходы.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

##### **1. Анализ основных факторов, описывающих динамику объекта.**

В зависимости от внешних факторов (возраст полигона, физико-химические процессы) состояние объекта характеризуется установившимся или неустойчивым режимами, от которых изменяются требования к управлению объектом [4]. В качестве доступных управляемых параметров мониторинга процессов, протекающих в массиве ТБО, предложено использовать: продувку воздухом массива отходов, увлажнение (рециркуляция фильтрата) и добавление реагентов в массив ТБО. Таким образом, регулируемые параметрами будут выступать:

1 – наличие кислорода в теле полигона (В);

2 – влажность массива ТБО ( $\omega$ );

3 – активная реакция среды (рН).

## 2. Структурная схема модели многоконтурной системы управления полигоном ТБО.

Для построения системы управления полигоном ТБО использована система линейных дифференциальных уравнений или соответствующие изображения по Лапласу в частотной области комплексной переменной  $s$  [2]. На рисунке 2 показана многомерная структурная схема системы регулирования процессами на полигоне ТБО, включающая системы с  $k$  – возмущениями,  $l$  – управлениями ( $l=3$ ) и  $m$  – наблюдениями (выходами,  $m=3$ ), связанные зависимостью

$$y(s) = G(s)u(s) + G_d(s)d(s), \quad (1)$$

где  $d(s)$ ,  $u(s)$ ,  $y(s)$  – векторы возмущения, управления и выхода соответственно

$$d(s) = \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \\ \dots \\ d_k(s) \end{bmatrix}; \quad u(s) = \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \end{bmatrix}; \quad y(s) = \begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$G(s)$  – матричная передаточная функция системы по управлению ( $g_{lm}$  – элемент матрицы, связывающий вектор: наблюдение, управление)

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & g_{13}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & g_{23}(s) \\ g_{31}(s) & g_{32}(s) & g_{33}(s) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$G_d(s)$  – матричная передаточная функция системы по возмущению ( $g_{lk}$  – элемент матрицы, связывающий вектор: наблюдение, возмущение)

$$G_d(s) = \begin{bmatrix} g_{11}^d(s) & g_{11}^d(s) & \dots & g_{1k}^d(s) \\ g_{21}^d(s) & g_{22}^d(s) & \dots & g_{2k}^d(s) \\ g_{31}^d(s) & g_{32}^d(s) & \dots & g_{3k}^d(s) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Формирование управляющего воздействия  $u(s)$  будет определяться многомерным регулятором  $G_c(s)$  с учётом ошибки рассогласования

$$\varepsilon(s) = y^*(s) - y(s),$$

где  $\varepsilon(s) = [\varepsilon_1(s), \varepsilon_2(s), \varepsilon_3(s)]^T$ .

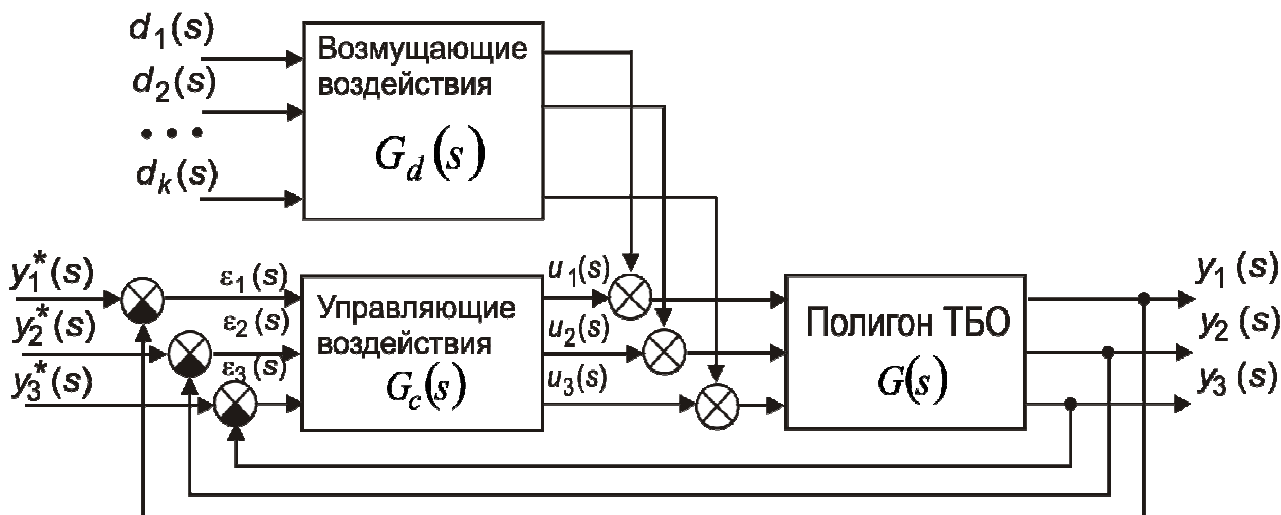


Рисунок 2 – Структурная схема системы регулирования полигона ТБО

Многомерный регулятор  $G_c(s)$  представлен матрицей диагонального вида (элементы  $g_{ii}(s)$ , соответствующие одноконтурным (одномерным) регуляторам, задают определённый закон управления)

$$G_c = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & & 0 \\ & \dots & \\ 0 & & g_{nn}(s) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

### 3. Физическое моделирование.

#### 3.1 Лабораторная установка биодеструкции отходов.

Лабораторная установка была выполнена в виде реактора, имитирующего тело полигона ТБО с отходами определённого морфологического состава. Реактор позволял регулировать водно-воздушный режим массива отходов (рисунок 3).

Задачей исследований являлась оценка степени биодеструкции отходов в реакторе. Для ускорения процесса биодеструкции отходов проводилось управление реактором за счет орошения стабилизированным фильтратом с добавлением известкового молока и продувкой воздухом. Основными измеряемыми параметрами являлись физико-химические величины: рН, концентрация ионов тяжёлых металлов, аммонийного азота в фильтрате, объем образующегося фильтрата и влажность отходов.

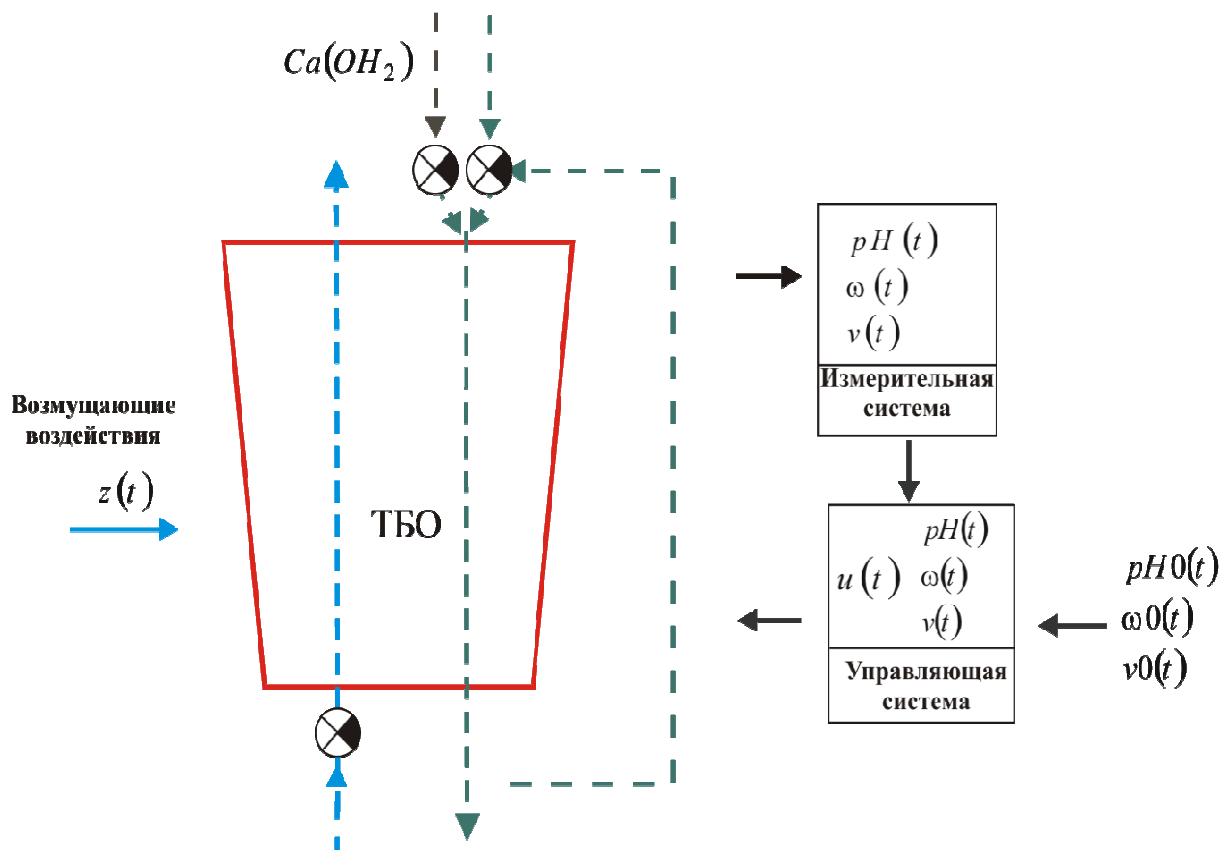


Рисунок 3 – Схема управления лабораторной установкой:

— продувка массива ТБО; - - - рециркуляция фильтрата;

$Ca(OH)_2$  – подача известкового молока

### 3.2 Исследования по определению оптимальных параметров биодеструкции отходов.

Соотношение управляющих воздействий ( $u$ ) и параметров мониторинга эмиссионных потоков показано в таблице 1.

Таблица 1 – Управляющие воздействия и мониторинг эмиссионных потоков

№	Управляющие воздействия, $u$	Наблюдаемый параметр, $y$
1	Продувка массива	Соотношение $CH_4 / CO_2$
2	Орошение	pH
3	Добавление реагентов	Концентрации ионов тяжёлых металлов

Результаты исследований показали, что оптимальными физико-химическими параметрами массива отходов являются:

1 – наличие кислорода и заполнение пор тела полигона воздухом (В) (Воздух / вода) – 40 / 60 %;

2 – влажность массива ТБО ( $\omega$ ) – 60%;

3 – активная реакция среды (pH) – 8–9,5.

### 3.3 Исследование взаимосвязей многомерной задачи регулирования.

При синтезе многомерных систем регулирования значительные затруднения связаны с наличием статических и динамических перекрестных связей между различными входами и выходами системы –  $R$ . Для исследования связей управляющих воздействий использованы входные ступенчатые сигналы, представляющие инерционное звено первого порядка [1].

Проведенный эксперимент по исследованию взаимного влияния продувки, орошения и обработки известковым молоком (рисунок 4) со ступенчатыми изменениями управляющих воздействий показал, что влажность являлась наиболее важным (доминируемым) фактором, влияющим на объем воздушных пор и pH; продувка оказывала воздействие на pH (рисунок 5).

Таким образом, в передаточной матрице (3) были не учтены малозначимые связи:

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & 0 & 0 \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & 0 \\ g_{31}(s) & g_{32}(s) & g_{33}(s) \end{bmatrix}; \quad (6)$$

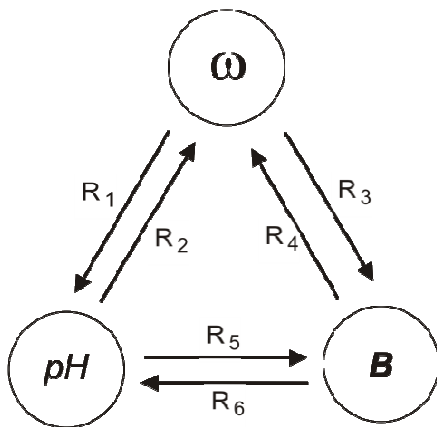


Рисунок 4 – Схема проведения эксперимента по исследованию взаимного влияния продувки, орошения и обработки известковым молоком,  $R$  – перекрестные связи управляющих воздействий

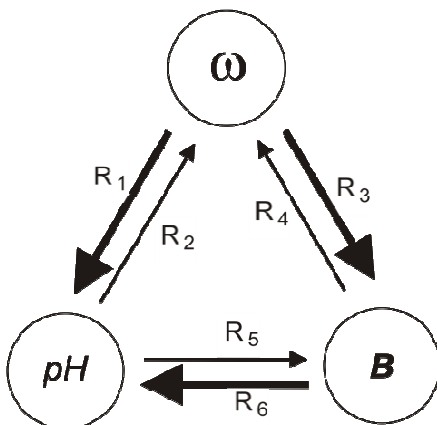


Рисунок 5 – Распределение доминирующих факторов: влажность, наличие кислорода (воздуха), pH

#### 4. Математическая модель управления полигоном ТБО во временной области.

Эквивалентной моделью (модели с комплексной переменной  $s$  (1)) линейной системы является модель во временной области

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu + \Gamma d, \\ y = Cx, \\ x(t_0) = x_0. \end{cases} \quad (7)$$

где  $x$  –  $n$ -мерный вектор состояний;

$d$  –  $k$ -мерный вектор возмущений ;

$u$  –  $m$ -мерный вектор управлений ( $m=3$ );

$y$  –  $l$ -мерный вектор наблюдений ( $l =3$ ).

Матрицы  $A$  – состояний,  $B$  – управлений,  $C$  – наблюдений и  $\Gamma$  – возмущений соответствующих размерностей

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{11} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ b_{31} & b_{3n} & \dots & b_{3n} \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ c_{31} & c_{32} & \dots & c_{3n} \end{bmatrix}; \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1n} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{k1} & \gamma_{k2} & \dots & \gamma_{kn} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Алгоритм решения задачи (1–9) сводится к определению передаточной функции объекта (6) [4], преобразования уравнений из частотной во временную область [7].

Для моделирования на ЭВМ процесса многомерной СУТП необходимо преобразование дифференциальных уравнений к дискретной конечно-разностной форме [6]. Практическое внедрение предложенных моделей управления полигоном ТБО было представлено в [5] в рамках комплекса системы автоматизированного проектирования и управления «АРМ ТБО» [8].

#### Заключение

В работе решена актуальная задача, заключающаяся в разработке автоматизированной системы управления состоянием полигонов ТБО, и получены следующие основные результаты.

1. Выявлены взаимосвязи исходных и внутренних факторов, влияющих на состояние полигона, что позволило разработать передаточную матрицу, учитывающую перекрестные связи контуров управления полигоном.

2. Разработана система линейных дифференциальных уравнений в частотной и временной областях, реализующих многоконтурную систему управления полигоном ТБО.

3. Даны подходы к численному решению системы дифференциальных уравнений в конечно-разностной форме.

### Список литературы

1. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. – М. : Энергия, 1967. – 232 с.
2. Бондарь А.Г. Математическое моделирование в химической технологии. – Киев : Вища школа, 1973. – 280 с.
3. Костарев С.Н. Математическая модель управления состоянием полигона твердых бытовых отходов : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. – Пермь, 2003. – 199 с.
4. Костарев С.Н. Статистически оптимальное управление процессом биодеструкции твердых бытовых отходов на полигонах захоронения // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 3. – С. 6–8.
5. Костарев С.Н. Автоматизированное проектирование природно-технических систем утилизации отходов // Программные продукты и системы. – 2010. – № 1. – С. 98–101.
6. Липатов И.Н., Файзрахманов Р.А. Информационно-измерительные системы и автоматизированные системы управления технологическими процессами: лабораторный практикум. – Пермь : Изд-во ПГТУ, 2009. – 184 с.
7. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М. : Мир, 1983. – 368 с.
8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2009612494. Программный комплекс «Управление жизненным циклом полигона твердых бытовых отходов (АРМ ТБО)». – М. : ФИПС, 2009.

### Рецензенты:

Середа Татьяна Геннадьевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры математики и естественно-научных дисциплин Пермского филиала ФГБОУ ВПО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», г. Пермь.

Зубарева Галина Николаевна, д.т.н., с.н.с., профессор кафедры строительного производства и материаловедения ФГБОУ ВПО «Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.Н. Прянишникова», г. Пермь.