УДК 681.5

ОБОСНОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОГАЗОВЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ НА ОБЪЕКТАХ ДЕПОНИРОВАНИЯ ОТХОДОВ

Середа Т.Г., Костарев С.Н., Михайлова М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, e-mail: iums@dom.raid.ru

Рассмотрена проблема эффективного управления процессами на системах ПТО (системы «Природа–Техника–Отходы») – полигонах ТБО – с целью получения биогаза. В задачи исследований входила разработка компьютерной информационной системы поддержки принятия решений при управлении биогазовыми технологиями на полигонах ТБО, включающая в себя системы автоматизированного проектирования, мониторинга и управления биогазовыми технологиями. Исследование управляющих процедур интенсификации биогазовых технологий проводили на разработанной лабораторной установке в виде каскада реакторов. На втором этапе проводились натурные исследования зон рассеяния эмиссионных потоков в системах ПТО и разработана математическая модель биохимических реакций в системах ПТО. Результатом исследований явилась разработка системы защиты на рекультивированных (закрытых) полигонах твердых бытовых отходов в виде многослойного рекультивационного покрытия. На заключительном этапе разработаны имитационная модель управления полигоном ТБО и проектные решения по их программной реализации.

Ключевые слова: твёрдые бытовые отходы (ТБО), АСУТП, полигон ТБО

SUBSTANTIATION OF THE INFORMATION CONTROL SYSTEM OF BIOGAS TECHNOLOGIES ON OBJECTS DEPOSITION OF WASTE PRODUCTS

Sereda T.G., Kostarev S.N., Michailova M.A.

State National Research Politechnical University of Perm, Perm, e-mail: iums@dom.raid.ru

The problem of efficient control by processes on systems NTW (System nature – technics- waste products) – sanitary landfill MSW is considered with the purpose of reception of biogas. Research problems included development of computer information system of support of decision-making at management of biogas technologies on the ranges TBO, including systems of the automated designing, monitoring and management of biogas technologies. Research of managing procedures of an intensification of biogas technologies carried out on the developed laboratory installation as the cascade of reactors. At the second stage carrying out natural researches of zones of dispersion of issue streams in systems NTW and the mathematical model of biochemical reactions in systems NTW is developed. Result of researches was system engineering of protection on pe the recultivated (closed) sanitary landfill municipal solid waste as multilayered recultivated coverings. At the final stage managements of sanitary landfill MSW and design decisions on their program realization are developed by imitating model.

Keywords: Municipal solid waste (MSW), ASUTP, sanitary landfill municipal solid waste

В настоящее время решение энергетических проблем связано с экстенсивным развитием нефтегазовой индустрии. По прогнозам, к 2020 г. текущий отбор нефти достигнет 18 млн т в сутки, а в ближайшее десятилетие из недр будет извлечено столько нефти, сколько ее добыто на Земле с начала скважинных разработок нефтяных месторождений до 2000 г. [3], что приведет к исчерпанию углеводородов уже в ближайшее столетие. К альтернативным способам получения энергии относятся получение нетрадиционного углеродного сырья с помощью анаэробной переработки биомассы, в частности, органических бытовых отходов.

Целью настоящего исследования являлось выяснение механизмов влияния процессов, протекающих на природно-технических системах утилизации отходов – полигонах ТБО (твёрдых бытовых отходов) – на образующиеся эмиссионные продукты (фильтрат и биогаз).

Материал и методы исследования

При обосновании методов и алгоритмов управления биогазовыми технологиями на объектах депонирования отходов использовались методы системного анализа, общей теории систем, теории автоматического регулирования, дифференциального и интегрального исчисления, методов математического и имитационного моделирования, механики сплошных сред. Объектом исследований являлись материально-энергетические и информационные потоки, протекающие на объектах утилизации отходов, рассматриваемые как объекты моделирования и управления.

Результаты исследования и их обсуждение

Основной задачей настоящих научных исследований является поиск нетрадиционных источников энергии, одной из разновидностей которых является «выбросная» биомасса, получаемая из бытового мусора. Использование «выбросной» тепловой энергии также направлено на сокращение объемов теплового загрязнения окружающей среды. Известно использование твердых бытовых отходов для получения энергии в результате анаэробного сбраживания. При анаэробном сбраживании отходов происходят процессы ферментации биомассы при 2 температурных режимах: мезофиль-

ном (30–35 °C) и термофильном (50–55 °C) [3]. Этот процесс имеет важное энергетическое значение там, где продуктом брожения является биогаз, представляющий собой смесь метана и оксида углерода (IV) в соотношении 60/40 %.

Ограничением использования ТБО для получения биогаза является: рассредоточенность сбора отходов, высокие транспортные расходы, сезонность, повышенная влажность отходов, сбор отходов в условиях России без разделения на органическую и неорганическую фракции и др.

Положительным моментом использования отходов в качестве источника энергии является их возобновляемость и увеличение объема ТБО по мере роста населения, дешевизна, невысокое содержание в них канцерогенных веществ (при исключении попадания в них опасных отходов), острая необходимость в утилизации отходов.

Теплотворная способность биогаза из отходов, содержащего до 70 % метана, может достигать 25 МДж/м^3 при выходе 0,7 м^3/кг ТБО и стоимости 0,07 $/м^3 биогаза [3], что представляет значительный интерес рассмотрения получения биогаза на полигонах ТБО.

Теоретико-методические основы по стабилизации и управлению эмиссионными потоками фильтрата и биогаза на полигонах ТБО, представляющих собой природно-технические системы утилизации отходов (системы «Природа–Техника–Отходы» (системы ПТО)) изложены в трудах зарубежных и отечественных учёных [1, 2, 6, 11, 13, 14, 15].

Первые научные исследования по определению состава эмиссионных продуктов ТБО, в том числе с получением биогаза, проводились в разное время такими учеными, как Newton (1977), Mjers (1980), J. Carra & R. Cossu (1990), A. Leuschner (1989), T. Christensen & P. Kjedsen (1989), R. Stegmann & H. Spendlin (1986) [15], которые показали, что при внедрении определённых процедур (измельчение, компостирование, уплотнение и т.п.) происходили изменения в составе фильтрата и биогаза.

На основе этих исследований были разработаны тест-реакторы, имитирующие биохимические процессы в теле полигона ТБО [4, 12, 15], которые послужили основой для создания реакторов по имитации процессов на полигоне ТБО, так называемых Deponiesimulationreaktor – DSR из высококачественной стали, работающих в мезофильном температурном режиме (K. Heyer, 1997). Одной из задач при создании DSR-реакторов являлась минимизация времени проведения эксперимента, в которых процессы биодеструкции отходов по сравнению с процессами на полигоне ТБО ускорялись примерно в 139 раз (Horing, 1997), что достигалось за счет максимального влагонасыщения стабилизированных уплотненных до 1 т/м^3 отходов, взятых с конкретного полигона [15].

На современном этапе актуальна научно-практическая задача – разработка ресурсосберегающих экологически безопасных биогазовых технологий, включающих в себя программы автоматизированного проектирования, мониторинга и управления.

Поэтому в ходе выполнения работ проводилось физическое, математическое и имитационное моделирование.

Физическое моделирование процессов, протекающих на полигоне ТБО

Исследование управляющих процедур интенсификации биогазовых технологий проводили на разработанной лабораторной установке в виде каскада реакторов, в которые помещали массу измельченных отходов, предварительно насыщенных водой до определённой влажности и плотности, характерного морфологического состава и функционирующих в оптимальных мезофильных условиях. Верхние слои массива подвергали многократной рециркуляции образующимися сточными водами, обработанными известковым молоком. Образующиеся кислые сточные воды (pH = 4,5–5,0) отводили из нижней части лабораторных реакторов и смешивали их с 1 % раствором известкового молока в течение 10 мин до pH = 9,0–9,5. После этого обработанные сточные воды распределяли по поверхности исследуемых отходов из расчета 2 мм в сутки. Дополнительно на поверхность отходов подавали воду, имитирующую атмосферные осадки в количестве 2 мм в сутки. Рециркуляцию обработанного известковым молоком фильтрата проводили до максимально возможного снижения концентраций углекислого газа. Определение состава газа и фильтрата определяли на аналитическом оборудовании по стандартным химико-аналитическим методикам [8].

На втором этапе проводились натурные исследования зон рассеяния эмиссионных потоков в системах ПТО. Проведен сбор статистических данных и натурных исследований на объектах депонирования ТБО в условиях Пермского края в пределах границ санитарно-защитных зон полигонов ТБО и определены зоны рассеяния загрязняющих веществ в водных источниках, почве, растительности, изложенные в [11, 12, 13].

Результатом исследований явилась разработка системы защиты на рекультиви-

рованных (закрытых) полигонах твердых бытовых отходов в виде многослойного рекультивационного покрытия с плодородным поверхностным и водобалансовым слоями [9]. Предложено высаживать на плодородном поверхностном слое растительность и распылять на растительность по достижению ее фазы активной вегетации сточные воды полигона ТБО, обработанные раствором известкового молока $Ca(OH)_2$ до pH 8,0–8,5 из расчета 3–4 мм в сутки. Определено общее количество распределяемых предварительно обработанных сточных вод ТБО, оптимальная pH-среда, использование материалов в качестве водобалансового слоя и оптимальная высота водобалансового и поверхностного плодородного слоев.

Предлагаемые мероприятия по управлению экологической безопасностью на системах ПТО позволили определить задачи дальнейших исследований:

1) выявить основные факторы, влияющие на динамику процесса горения и установить закономерности возгорания объектов хранения ТБО;

2) разработать математическую модель воздействия пожароопасных факторов на объекты окружающей среды и построить имитационные прогнозные модели на полигонах ТБО;

3) разработать проектные рекомендации по стабилизации физико-химических процессов и безопасности биогазовых технологий.

Разработка математической модели биохимических реакций в системах ПТО на основе полученных результатов

Для описания процессов биодеструкции отходов в массиве отходов использована многофазная модель биохимических реакций, в основу которой положен закон неразрывности потока с учетом диффузионного влияния [4]:

$$\frac{\partial\left(\omega(x,t)\beta_i(x,t)\right)}{\partial t}-\nabla\left(D(x,t)\nabla\beta_i(x,t)-q(x,t)\beta_i(x,t)\right)=\omega(x,t)\sum_{j=1}^{N_R}\gamma_{ij}R_j,$$

где $t \in (0, T)$ – временная переменная; $x \in \Omega$ – пространственная переменная; $\omega(x, t)$ – влажность массива; $\beta_i(x, t)$ – концентрация вещества i-й стадии реакции; $D(x, t)$ – диффузионно-фильтрационный тензор; $q(x,t)$ – функция Дарси; γ_{ij} – стехиометрический коэффициент при компоненте скорости реакции R_j в i-й стадии реакции.

При декомпозиции системы ПТО по физическим процессам рассмотрены задачи тепло- и массопереноса, растворения и диффузии с использованием метода конечных элементов, включающего в себя дифференциальную и вариационную постановки задачи теплопроводности на полигоне ТБО. При постановке задачи массопереноса в трёхфазной системе (газ–жидкость–твёрдое вещество) рассмотрено движение частиц жидкости фильтрата, описываемых переменными Лагранжа. В решении данных задач применяли теорию дифференциального вычисления с использованием уравнения неразрывности, использующие переменные Эйлера, связывающие переход из дискретной области в непрерывную.

При моделировании механических процессов в ходе газообразования предлагался расчет возможного движения грунта оснований полигона ТБО, его осадка и деформация как в нормальном режиме эксплуатации, так и в результате применения различных процедур управления (уплотнения, рециркуляции фильтрата и послойной прокладки массива ТБО изолирующими слоями и т.п.) [5, 7]. Данные соотношения могут быть использованы в качестве инструментальной оценки для идентификации состояния полигонов ТБО на этапах проектирования или эксплуатации.

При оценке состояния полигона ТБО проведен анализ материально-энергетических потоков источников опасности и предложены рекомендации по выбору средств защиты, если текущее состояние опасное. Как результат применения данной модели выступает инструментальная оценка состояния, позволяющая учитывать характеристики полигона ТБО на проектном уровне и проводить сценарии возможного развития опасных ситуаций и аварий при внедрении биогазовых технологий на данных объектах.

Имитационное моделирование

На следующем этапе разработаны имитационная модель (ИМ) управления полигоном ТБО и проектные решения по их программной реализации. В основу имитационного моделирования были положены функциональные зависимости, описывающие влияние внешней природной среды на полигон ТБО в пространственно-временном базисе (x,t) с полученными ранее эмпирическими выражениями [5]:

$$E = f(\mathrm{pH}(x,t), q(x,t), \omega(x,t), b(x, \tau), z(\xi, t)),$$

где $\mathrm{pH}(x, t)$ – окислительно-восстановительный потенциал массива ТБО; $q(x, t)$ – поток жидкой фазы; $\omega(x, t)$ – влажность массива;

$b(x, \tau)$, $z(\xi, t)$ – возмущения, характеризующие изменение влажности массива ((x, ξ), (t, τ) – сопряженные переменные).

Для имитации возмущений $b(x, \tau)$, $z(\xi, t)$ использован генератор случайных чисел. Возмущения носят знакопеременные импульсы с 10 %-м отклонением параметров среды массива отходов от стационарного режима. Управление технологическим режимом заключается в поддержании и уменьшении отклонения физико-химических параметров от заданного режима по алгоритму, реализующему закон управления процессами на полигоне ТБО [7]. Для расчета расхода рециркулируемого фильтрата, являющегося управляющим параметром, использована приближенная многофакторная эмпирическая зависимость, учитывающая изменение возмущающих факторов [4]. Разработанная компьютерная программа «АРМ ТБО» [6] реализует имитационную модель реального полигона ТБО и позволяет имитировать управление основными физико-химическими параметрами.

Программная реализация методики оценки безопасности полигона ТБО представлена в виде диаграммы IDEF функционально-объектной модели. Для автоматизированной обработки данных вычисляются степень безопасности массива источников опасности, суммарная оценка состояния безопасности полигона ТБО и коэффициенты защиты [1, 6].

Для автоматизированного управления полигоном ТБО предложено применение промышленных контроллеров OMRON SYSMAC CP1L. Предусмотрен автоматический и ручной режимы управления полигоном ТБО с применением сенсорного монитора.

Для реального полигона разработан программно-аппаратный комплекс АСУТП «Полигон ТБО», предназначенный для оперативного контроля и управления основными технологическими установками полигона на всех этапах его жизненного цикла [10].

Заключение

Таким образом, обоснована информационная система системы управления биогазовыми технологиями на объектах депонирования отходов при реализации принципиальной технологической схемы управления, направленной на снижение концентрации загрязняющих веществ в фильтрате, уменьшение вероятности возникновения пожаров и взрывов на местах захоронения ТБО, что способствует созданию безопасных биогазовых технологий в системах ПТО.

Предложены подходы к математическому и имитационному моделированию процессов на полигоне ТБО и созданию информационной системы мониторинга, позволяющих прогнозировать изменение функций опасности и своевременно применять мероприятия по защите и стабилизации системы ПТО.

Список литературы

1. Артемов Н.И. Технологии автоматизированного управления полигоном твердых бытовых отходов / Н.И. Артемов, Т.Г. Середа, С.Н. Костарев, О.Б. Низамутдинов // Международный журнал экспериментального образования. – 2010. – № 11. – С. 43.

2. Вайсман Я.И., Петров В.Ю., Середа Т.Г. Факторы, влияющие на объем образующегося фильтрата полигонов захоронения (депонирования) твердых бытовых отходов // Проблемы охраны окружающей среды на урбанизированных территориях. Пермь-96 : сб. тез. докл. межд. конф. студентов и молодых ученых. – Пермь: ПГТУ, 1996. – С. 26–38.

3. Денк С.О. Энергетические источники и ресурсы близкого будущего.– Пермь: Издательский дом «Престайм», 2007. – 383 с.

4. Костарев С.Н., Середа Т.Г., Михайлова М.А. Системный анализ управления отходами. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. ISBN 978-3-8465-8298-5. https://www.lap-publishing.com.

5. Костарев С.Н. Статистически оптимальное управление процессом биодеструкции твердых бытовых отходов на полигонах захоронения // Автоматизация и современные технологии. – 2009.– № 3.– С. 6–8.

6. Костарев С.Н. Автоматизированное проектирование природно-технических систем утилизации отходов // Программные продукты и системы. – 2010. – № 1. – С. 98–101.

7. Костарев С.Н. Математическая модель управления состоянием полигона твердых бытовых отходов : дис. … канд. техн. наук : 05.13.18. – Пермь, 2003. – 199 с.

8. Патент РФ № 2162059, 06.01.2000.

9. Патент РФ № 2414314, 19.10.2009.

10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2009612494. – М.: ФИПС, 2009.

11. Середа Т.Г. Подходы к рекультивации загрязненных территорий полигонов и свалок твердых бытовых отходов // Безопасность жизнедеятельности. – 2006.– № 2. – С. 26–30.

12. Середа Т.Г. Обоснование технологических режимов функционирования искусственных экосистем хранения отходов: дис. … д-ра техн. наук: 03.00.16; МГУП. – М., 2006.

13. Середа Т.Г. Натурные исследования рекультивации полигонов и свалок ТБО // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 3. – С. 48–50.

14. Середа Т.Г. Разработка комплексной очистки стоков с полигонов твердых бытовых отходов: автореф. дис. … канд. техн. наук : 11.00.11; Тульский гос. ун-т. – Тула. – 2000.

15. Christensen T., Cossu R., Stegmann R. Landfilling of Waste, Leachate. – London and N.Y., 1992.

References

1. Artemov N.I., Sereda T.G., Kostarev S.N., Nizamutdinov O.B. Tehnologii avtomatizirovannogo upravlenija po-

ligonom tverdyh bytovyh othodov – Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimentalnogo obrazovanija, 2010, no. 11, p. 43.

2. Vajsman Ja.I., Petrov V.Ju., Sereda T.G. Faktory, vlijajushhie na ob'em obrazujushhegosja fil'trata poligonov zahoronenija (deponirovanija) tverdyh bytovyh othodov – Problemy ohrany okruzhajushhej sredy na urbanizirovannyh territorijah. Perm'-96: cb. tez. dokl. mezhd. konf. studentov i molodyh uchenyh / PGTU. Perm, 1996. pp. 26–38.

3. Denk S.O. Jenergeticheskie istochniki i resursy blizkogo budushhego.– Perm: Izdatel'skij dom «Presstajm», 2007. p. 383.

4. Kostarev S.N., Sereda T.G., Mihajlova M.A. Sistemnyj analiz upravlenija othodami. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. ISBN 978-3-8465-8298-5.

5. Kostarev S.N. Statisticheski optimalnoe upravlenie processom biodestrukcii tverdyh bytovyh othodov na poligonah zahoronenija – Avtomatizacija i sovremennye tehnologii, 2009, no. 3, pp. 6–8.

6. Kostarev S.N. Avtomatizirovannoe proektirovanie prirodno-tehnicheskih sistem utilizacii othodov – Programmnye produkty i sistemy, 2010, no. 1, pp. 98–101.

7. Kostarev S.N. Matematicheskaja model' upravlenija sostojaniem poligona tverdyh bytovyh othodov: dis. … kand. tehn. nauk : 05.13.18. Perm, 2003, 199 p.

8. Patent RU 2162059, 06.01.2000.

9. Patent RU 2414314, 19.10.2009.

10. Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeVM 2009612494.

11. Sereda T.G. Podhody k rekul'tivacii zagrjaznennyh territorij poligonov i svalok tverdyh bytovyh othodov – Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti, 2006, no. 2, pp. 26–30.

12. Sereda T.G. Obosnovanie tehnologicheskih rezhimov funkcionirovanija iskusstvennyh jekosistem hranenija othodov: dis. … dokt. tehn. nauk: 03.00.16; MGUP., 2006.

13. Sereda T.G. Naturnye issledovanija rekul'tivacii poligonov i svalok TBO // Melioracija i vodnoe hozjajstvo. 2006. no. 3. pp. 48–50.

14. Sereda T.G. Razrabotka kompleksnoj ochistki ctokov s poligonov tverdyh bytovyh othodov : avtoref. dis. … kand. tehn. nauk : 11.00.11; Tul'skij gos. un-t. Tula. 2000.

15. Christensen T., Cossu R., Stegmann R. Landfilling of Waste, Leachate. London and N.Y., 1992.

Рецензенты:

Файзрахманов Р.А., д.э.н., профессор кафедры АУВ Пермского военного института внутренних войск МВД России, г. Пермь;

Шварц К.Г., д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры прикладной математики и информатики Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 08.04.2013.