

М. Н. ТЕМИРБЕКОВА

Алматинский университет энергетики и связи им.Г.Даукеева

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВА ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Обосновывается эффективность сбора и утилизации биогаза на полигоне ТБО (твердых бытовых отходов) г.Алматы с установкой нескольких биогазовых установок модернизированной конструкции. Оптимальный режим процессов, происходящих в биогазовой установке, определяется компьютерным моделированием. Проведена идентификация параметров математической модели для описания биохимических процессов, происходящих в биогазовой установке. Для решения математической модели используется два подхода: конечно-разностный метод решения системы дифференциальных уравнений и имитационное моделирование с помощью пакета Any Logic. Составлена компьютерная программа на алгоритмическом языке C++. Проведены многочисленные расчеты, результаты которых приведены в виде графиков и их качественная картина согласуется с происходящими процессами. Созданная компьютерная программа позволяет сделать предварительный прогноз анаэробного брожения, происходящего в биореакторе, в зависимости от объема субстрата, метаногенных микроорганизмов и температурного режима.

Ключевые слова: биогазовая установка, биогаз, метан, твердые бытовые отходы, органическое сырье, математическое моделирование, имитационное моделирование.

Жұмыста Алматы қаласының ТҚК полигонында (қатты тұрмыстық қалдықтар) биогазды жинаудың және кәдеге жаратудың тиімділігі негізделді. Биогаз қондырғысында болып жатқан процестердің оңтайлы режимі компьютерлік үлгілеумен анықталады. Биогаз қондырғысында болып жатқан биохимиялық процестерді сипаттау үшін математикалық модель параметрлерін сәйкестендіру жүргізілді. Математикалық модельді шешу үшін екі тәсіл қолданылады: әрине-дифференциалдық теңдеулер жүйесін шешудің айырымдық әдісі және Any Logic пакетінің көмегімен имитациялық модельдеу. C++ алгоритмдік тілінде компьютерлік бағдарлама құрастырылған. Көптеген есептер жүргізілді, олардың нәтижелері графиктер түрінде келтірілген және олардың сапалық бейнесі болып жатқан процестермен келісіледі. Құрылған компьютерлік бағдарлама субстрат көлеміне, метаногенді микроорганизмдерге және температуралық режимге байланысты биореакторда болып жатқан анаэробты ашытудың алдын ала болжамын жасауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: биогаз қондырғысы, биогаз, метан, қатты тұрмыстық қалдықтар, органикалық шикізат, математикалық үлгілеу, имитациялық үлгілеу.

This paper justifies the efficiency of the biogas collection and utilization at the MSW (municipal solid waste) landfill in Almaty with the installation of several modern biogas plants. The optimal mode of processes occurring in a biogas plant is determined by computer generated simulations. Mathematical model parameters were identified to describe biochemical processes occurring in a biogas plant. Two approaches are used to resolve the mathematical model: the finite-difference method for solving the system of differential equations and simulation modeling by using the Any Logic package. A program is written in the algorithmic language C++. Numerous calculations were carried out, the results of which are presented in curves and their qualitative picture is consistent with the ongoing processes. The created computer program allows to make a preliminary forecast of anaerobic fermentation occurring in the bioreactor depending on volume of the substrate, methane microorganisms and temperature conditions.

Key words: biogas plant, biogas, methane, solid household waste, organic raw materials, mathematical modeling, simulation modeling.

Введение. В городе Алматы, крупном мегаполисе Республики Казахстан, сбором, утилизацией переработкой и захоронением твердых бытовых отходов занимается АО «Тартып». Организация вывоза коммунальных отходов и ее научно-обоснованная переработка является актуальной проблемой. Одной из основных проблем современности является забота о сохранении окружающей среды. АО «Тартып» имеет 200 единиц специализированной техники, дислоцированных на семи производственных базах в шести районах города. Для обеспечения своевременности вывоза, повышения оперативности, оптимизации логистических маршрутов вывоза, движение транспорта контролируется с применением системы GPS-мониторинга. Компания выполняет работу по вывозу ТБО и прочих отходов максимально аккуратно, не причиняя вреда окружающей среде. Ежедневно в Алматы выбрасываются более 2,0 тысяч тонн мусора, которые необходимо собирать и вывозить за пределы города. АО «Тартып» постоянно совершенствует выполняемые процессы, отдает приоритет превентивным мерам для предотвращения или снижения вредного воздействия на окружающую среду и сокращения энергопотребления, ведет открытую и прозрачную деятельность [1].

Исходя из мировой практики можно предложить несколько вариантов сбора и утилизации биогаза на полигоне твердых бытовых отходов (ТБО) в г.Алматы, который является наибольшим местом захоронения отходов, обслуживающий город и окрестные поселки. В его пределах накоплено порядка 13,5 млн.тонн отходов, из которых можно собрать 1740 м³/ч биогаза.

Поэтому наиболее привлекательными проектами являются производство биогаза. Для этого на участке возле полигона достаточно установить несколько биогазовых установок с защитой от превышения давления и комбинированной рамочно-лопастной конструкцией мешалки якорного типа с автоматизированным электроприводом. В данной работе на основе известных математических моделей и имитационного моделирования Any Logic созданы компьютерные программы для проведения предварительного прогноза процесса анаэробного брожения в биогазовых установках с защитой от превышения давления и комбинированной рамочно-лопастной конструкцией мешалки якорного типа с автоматизированным электроприводом [2].

Математическая модель. Морфологический состав отходов для г.Алматы был получен в результате хронометража и представлен в табл.1. Согласно исследованиям морфологического состава отходов г.Алматы, пищевые отходы составляют около 30% [3].

Таблица 1 – Морфологический состав отходов г.Алматы

Наименование компонента	г. Алматы, 2008 г.	г. Алматы, 2012 г.	Среднее арифметическое
1	2	3	4
Пищевые отходы	32,50	23,40	27,95
Бумага и картон	27,60	27,80	27,70
Садово-парковые отходы	0,00	0,00	0,00
Древесные отходы	1,20	2,40	1,80
Резина, кожа, кости	0,70	0,04	0,37

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
Текстиль	2,40	1,30	1,85
Другие органические*	4,30	5,53	4,92
Пластик	8,30	14,30	11,30
Металл	2,90	1,60	2,25
Стекло	4,30	8,60	6,45
Строительный мусор	10,80	9,40	10,10
Отсев	0,70	0,00	0,35
Неорганические отходы*	4,30	5,53	4,92
Всего	100	100	100
Сумма органических компонентов	68,7	60,5	64,6
Сумма неорганических компонентов	31,3	39,5	35,4

Как видно из таблицы, существенный удельный вес пищевых отходов еще раз подтверждает эффективность применения биогазовых установок.

Математическое и компьютерное моделирование с использованием математических моделей являются самыми эффективными способами проведения вычислительных экспериментов, так как являются менее затратными по сравнению с натурными экспериментами. В работах Л.И.Ружинской, А.А.Фоменкова выполнен анализ известных моделей анаэробного сбраживания органического вещества с получением биогаза. Показаны модели, которые часто используются в литературе, где описывается кинетика сбраживания метана и параметры кинетического процесса. Различные модели дают описание роста и развития популяции микроорганизмов, деградацию компонентов и получение продуктов в биореакторе анаэробного типа [4]. Имеются работы, связанные с имитационными экспоненциальными графиками, модифицированными графиками Гомперца, процесса получения биогаза из ТБО в анаэробных реакторах [5]. Также создаются модели оптимизации процесса получения биогаза, комплексные модели, включающие кинетику роста микрофлоры, где учитывают различные механизмы зарядки и интервалы времени, температура процессов и ингибирующие эффекты [6].

В работах А.Г. Топаж, В.А.Вигант, Л.А. Хворова [7] приведена математическая модель в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями. Для моделирования используется пакет имитационных процессов Any Logic.

Рассмотрим следующую задачу [7] для моделирования процесса производства биотоплива из органических бытовых отходов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_i}{\partial t} &= -k_i \cdot W_i \cdot f_H(S), \quad i = 1, \dots, M, & W(0) &= W_0, \\ \frac{\partial S}{\partial t} &= \gamma \cdot \sum_{i=1}^M k_i \cdot W_i \cdot f_H(S) - \rho_M \cdot f_M(S) \cdot \frac{S \cdot B}{K_S + S}, & S(0) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = Y \cdot (1 - \theta) \cdot \rho_M \cdot f_M(S) \cdot \frac{S \cdot B}{K_S + S}, \quad P(0) = 0,$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \theta \cdot \rho_M \cdot f_M(S) \cdot \frac{S \cdot B}{K_S + S} - K_D \cdot B, \quad B(0) = B_0,$$

$$f_H(S) = \left(1 + \left(\frac{S}{A_H} \right)^{N_H} \right)^{-1}, \quad f_M(S) = \left(1 + \left(\frac{S}{A_M} \right)^{N_M} \right)^{-1}$$

где W – концентрация исходного субстрата (г/л); S – концентрация продуктов гидролиза (г/л); W_i – составляющие вектора концентраций исходного сырья различных типов; P – суммарный выход биогаза (г/л); k – константа скорости гидролиза; k_i – характерные для W_i типов константы скорости гидролиза; M – число рассматриваемых типов сырья (в нашем случае 3); B – концентрация метаногенных микроорганизмов; γ – коэффициент конверсии субстрата в жирные кислоты (стехио-метрический коэффициент); ρ_M – максимальная удельная скорость метаногенеза в терминах утилизации биомассы летучих жирных кислот; K_S – константа полунасыщения в уравнении Моно для интенсивности метаногенеза; $(1-\theta)$ – доля субстрата, идущая на образование биогаза; Y – переводной коэффициент потока утилизации жирных кислот в единицы выхода конечного продукта (биогаза); K_D – коэффициент распада; $f_H(S)$ и $f_M(S)$ описывают ингибирование реакций гидролиза и микробной ферментации жирными кислотами (закисление).

Значения постоянных коэффициентов, используемых в модели (1), приведены в виде системно-динамической таблицы в работе [7]. Используя модель (1), нами была построена модель в Any Logic. Имитационная модель и графики основных показателей процесса приведены на рис.1. На рис.1 через $W1, W2, W3$ обозначены концентрации исходного сырья различных типов в виде компонентов вектора W_i .

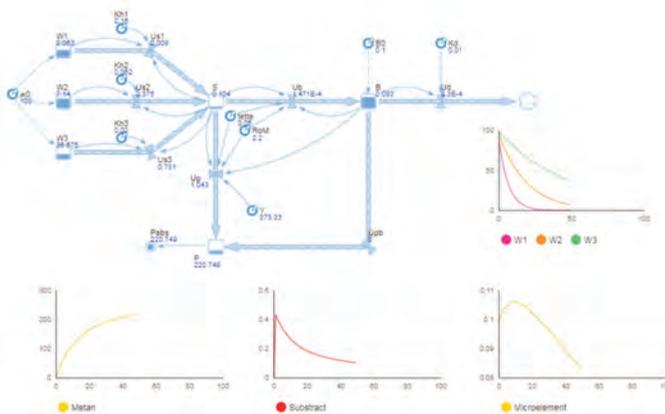


Рисунок 1 – Модель биогаза в Any Logic

При постройке модели выбрана единица времени «дни», так как все коэффициенты даны в формате 1/сутки. Системе дифференциальных уравнений (1) построена соответствующая полунейвная разностная схема следующего вида:

$$\begin{aligned}
 W_i^{n+1} &= W_i^n - \tau \cdot k_i \cdot W_i^n \cdot f_H(S^n), \quad i = 1, 2, 3. \\
 S^{n+1} &= S^n + \tau \cdot \left(\gamma \cdot \sum_{i=1}^3 k_i \cdot W_i^n \cdot f_H(S^n) - \rho_M \cdot f_M(S^n) \cdot \frac{S^n \cdot B^n}{K_S + S^n} \right), \\
 P^{n+1} &= P^n + \tau \cdot \left(Y \cdot (1 - \theta) \cdot \rho_M \cdot f_M(S^{n+1}) \cdot \frac{S^{n+1} \cdot B^n}{K_S + S^{n+1}} \right), \\
 B^{n+1} &= B^n + \tau \cdot \left(\theta \cdot \rho_M \cdot f_M(S^{n+1}) \cdot \frac{S^{n+1} \cdot B^n}{K_S + S^{n+1}} - K_D B^n \right).
 \end{aligned} \tag{2}$$

$n = 1, 2, 3, \dots, N$

Для численного решения разностных уравнений составлена программа на алгоритмическом языке C++. Известные значения вектора концентраций исходного сырья различных типов задается в виде одномерного массива, концентрация продуктов гидролиза, – суммарный выход биогаза, концентрация биомассы метаногенных микроорганизмов в программе рассматриваются как переменные зависящие от дискретного времени. По заданным значениям начальных условий по рекуррентным формулам (2) вычисляются искомые величины в зависимости от времени. Затем вычисленные результаты импортируются в графический редактор и строятся графики.

Вычислительным экспериментом проводилась идентификация коэффициентов, входящих в математическую модель. Численные расчеты по математической модели (1) можно проводить в широком диапазоне шага по времени τ и коэффициентов уравнений, удовлетворяющим условиям устойчивости разностной схемы (2). Поэтому необходимо определить значение шага по времени, соответствующий реальному времени.

Используя начальные условия $W_0 = 100$ г/л, $B_0 = 0,1$ г/л, мы получаем динамику изменения P, S, B , которые представлены в виде следующих графиков (Рис.2). Здесь при шаге сетки $t = 0,01$ и $N = 50000$ дает результат, соответствующий 500 дням.

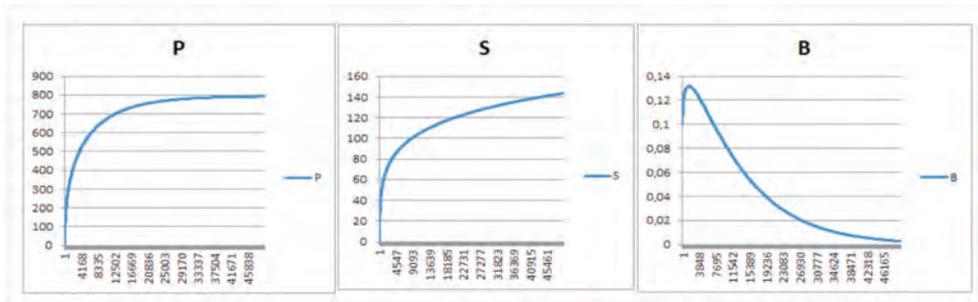


Рисунок 2 – Изменение P – суммарный выход биогаза (г/л), S – концентрация продуктов гидролиза (г/л), B – концентрация метаногенных микроорганизмов.

Задаем значение $\gamma = 0,32$, $Y = 0,85$ и получаем значения суммарного выхода биогаза, концентрации продуктов гидролиза и концентрации биомассы метаногенных микроорганизмов за 500 дней.

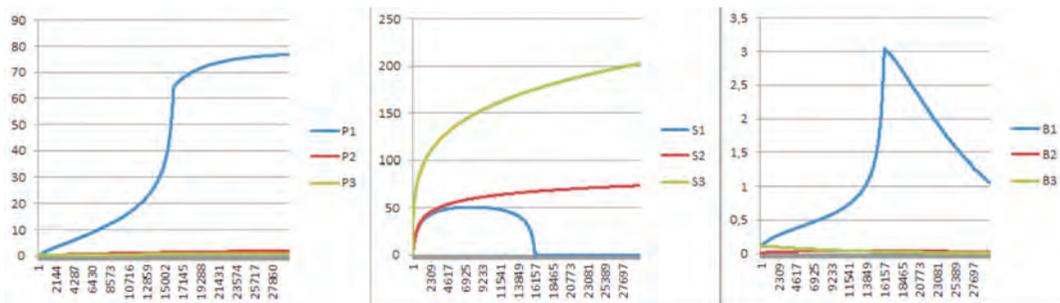


Рисунок 3 – Изменения выхода метана (P), концентрации продуктов гидролиза (S) и (B) – концентрации метаногенных бактерий

Синими линиями на рисунке показаны кривые, соответствующие начальным значениям $W_0 = 300$ г/л, $B_0 = 0,3$ г/л. При этих условиях реактор работает нормально.

При внесении слишком малого количества метаногенных микроорганизмов (красная линия, $W_0 = 300$ г/л, $B_0 = 0,005$ г/л, в этом случае наблюдается эффект «пробки» критического замедления процесса. Если внести слишком большое количество органического сырья $W_0 = 1000$ г/л, $B_0 = 0,2$ г/л. то график будет, как показано зеленой линией (Рис.3).

Таким образом, разработанный программный продукт на алгоритмическом языке C++ и имитационная модель с использованием Any Logic, созданные на основе математической модели в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяют проводить многочисленные вычислительные эксперименты для моделирования различных сценариев протекания процессов в биогазовых установках. Разработанные авторами статьи программные продукты проверены на ранее известных тестовых примерах. Установлены соответствия шага безразмерного времени реальному времени и проведены вычислительные эксперименты идентификации других коэффициентов уравнений. Созданный комплекс прикладных программ позволяет провести предварительное и прогнозное компьютерное моделирование процесса получения биогаза из различного морфологического состава органических отходов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сайт www.tartyp.kz/o-nas/
- 2 Кешуов С.А., Барков В.И., Токмолдаев А.Б. «Применение биогазовых установок в животноводстве». Алматы, 2012.
- 3 Жаппарова Ж. М. Изучение состава подземных вод вблизи полигона захоронения ТБО Карасайского района Алмагинской области: материалы 5-й Международной конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов» / Ж. М. Жаппарова. – Х.: ЭкоИнформ, 2008. – С. 195–197.

4 Л. И. Ружинская, А. А. Фоменкова «Математическое моделирование процессов анаэробного сбраживания органического субстрата. Обзор» Scientific Journal «Sciencerise» №4/2(4)2014. – С. 63-69.

5 H.M. Lo, T.A. Kurniawan, M.E.T. Sillanpää, T.Y. Pai, C.F. Chiang, K.P. Chao, M.H. Liu, S.H. Chuang, C.J. Banks, S.C. Wang, K.C. Lin, C.Y. Lin, W.F. Liu, P.H. Cheng, C.K. Chen, H.Y. Chiu, H.Y. Wu «Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors» Bioresource Technology Volume 101, Issue 16, 2010. – С.6329-6335

6 Mandy Gerber, Roland Span «An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas» IGRC, 2008

7 А.Г.Топаж, В.А.Вигонт, Л.А.Хворова «Имитационная модель процесса производства биогаза из многокомпонентного растительного сырья-анализа и параметрическая оптимизация». Химия растительного сырья – 2018 №1. – С.171-184.