

**Материалы молодежной прикладной IT школы
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
И МОДЕЛИ В ЭКОЛОГИИ**

УДК 004.02

**Результаты исследования однокомпонентной модели
производства биогаза из однородного органического сырья**

А.А. Баюк

АлтГУ, г. Барнаул

Поиск альтернативных возобновляемых источников энергии рассматривается в качестве приоритетного направления развития промышленного и научного прогресса человечества. Одним из таких источников является биогаз – смесь газов с преобладающим содержанием метана, полученный путём анаэробного сбраживания органического сырья, которым являются различные отходы сельскохозяйственного производства, послеуборочные растительные остатки традиционных пищевых культур, биомасса промежуточных культур, выращиваемых на полях сидерального пара, а также специально выращиваемые высокоэнергоемкие энергетические культуры.

В данной работе исследуется следующая нелинейная динамическая система, описывающая процесс производства биогаза:

$$\dot{W} = -kWf_H(S) + K_{flow}(W_0 - W), \quad (1)$$

$$\dot{S} = \gamma kWf_H(S) - \rho_m f_M(S) \frac{SB}{K_S + S} - K_{flow}S, \quad (2)$$

$$\dot{B} = Y \rho_m f_M(S) \frac{SB}{K_S + S} - (K_D + K_{flow})B, \quad (3)$$

$$\dot{P} = \theta \cdot (1 - Y) f_M(S) \rho_m \frac{SB}{K_S + S} \quad (4)$$

где W и S – концентрация исходного субстрата и продуктов гидролиза соответственно (г/л); B – концентрация биомассы метаногенных микроорганизмов (г/л); P – суммарный выход биогаза (г/л); k – константа скорости гидролиза (1/сут); γ – коэффициент конверсии субстрата в жирные кислоты (стехиометрический коэффициент); ρ_m – максимальная удельная скорость метаногенеза в терминах утилизации биомассы летучих жирных кислот (1/сут); K_S – константа полунасыщения в уравнении

Моно для интенсивности метаногенеза (г/л); Y – доля субстрата, идущая на рост микробной биомассы; $(1-Y)$ – доля субстрата, идущая на образование биогаза, K_D – коэффициент распада микробной биомассы (1/сут), θ – переводной коэффициент потока утилизации жирных кислот в биогаз (мл/г); K_{flow} – интенсивность притока свежего субстрата неизменного структурного состава, равная интенсивности оттока общего интермедиата из рабочей области реактора (1/сут). Таким образом, эту величину можно интерпретировать как долю содержимого всего объема реактора, замещаемую в единицу времени исходным субстратом. $\dot{W}, \dot{S}, \dot{B}, \dot{P}$ – производные по времени t .

Искомые функции системы (1)–(4) удовлетворяют следующим начальным условиям: $W(0) = W_0$; $S(0) = 0$; $B(0) = B_0$; $P(0) = 0$.

Функции $f_H(S)$ и $f_M(S)$ описывают ингибирование реакций гидролиза и микробной ферментации жирными кислотами:

$$f_*(S) = \left(1 + \left(\frac{S}{A_*} \right)^{N_*} \right)^{-1},$$

$A_* = A_H$ или $A_* = A_M$ – масштабные коэффициенты в функции ингибирования гидролиза продуктом и в функции ингибирования ферментации субстратом соответственно.

Введение в рассмотрение фактора ингибирования различных стадий процесса продуктами гидролиза позволит воспроизвести в модели эффект «пробки», возникающий в случае, когда начальная концентрация субстрата велика, а начальное содержание метаногенных микроорганизмов в реакторе мало.

Существенным требованием, предъявляемым к данной модели, является возможность нахождения оптимальных режимов производственного цикла – нахождение наилучшего с экономической точки зрения соотношения между выходом биометана и темпами подачи/замены исходного субстрата в зависимости от состава сырья. Последнее предполагает необходимость множественных расчетов модели для разных вариантов в автоматическом режиме, то есть проведение специально спроектированных компьютерных экспериментов по оптимизации, варьированию параметров, анализу чувствительности и т.д.

Для решения поставленной задачи разработан программный модуль на языке программирования высокого уровня Python. Интерфейс программного модуля позволяет осуществлять: скачивание информации по выбранной модели в виде PDF-файла; ввод начальных данных; определять стационарные решения системы по заданным параметрам модели;

производить визуализацию результатов расчетов в виде графиков фазовых кривых и графиков изменения параметров исследуемой модели в течение определенного промежутка времени; определять оптимальные значения параметров модели производства биогаза: начальное количество исходного субстрата и начальное количество биомассы метаногенных микроорганизмов.

Приведем выборочные результаты компьютерных экспериментов с моделью, описывающей периодическое дискретное обновление растительного сырья в биореакторе в равноотстоящие моменты времени. На рисунке 1 представлены графики динамики основных динамических переменных модели в установившемся режиме работы биореактора (когда влияние начальных значений оказывается полностью нивелировано). Динамика продуктов исходного сырья (график А), гидролиза (график Б) и микробной биомассы (график В) подчиняются периодическому циклу обновления сырья, а интегральный выход метана (график Г) демонстрирует квазилинейный рост с незначительными колебаниями интенсивности внутри периодов рециклизации.

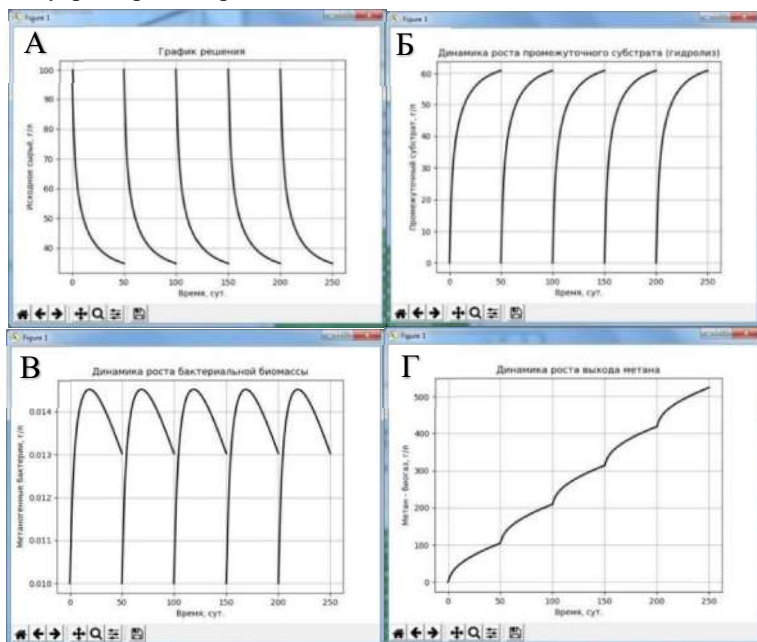


Рисунок 1 – Результаты эксперимента имитации работы биореактора с дискретным обновлением сырья. Динамика в установившемся режиме (А – органический субстрат, Б – продукты гидролиза, В – биомасса метаногенных микробов, Г – выход метана)

В ходе тестовых прогонов модели наблюдалось как качественное, так и количественное соответствие графиков динамики переменных состояния с соответствующими результатами упрощенной версии модели «Метан», разработанной В.А. Вавилиным [1]. Данная модель позволяет адекватно отразить влияние качества исходного сырья как на темпы производства, так и на интегральный выход конечного продукта (биогаза). Также в ней полностью воспроизводится эффект «пробки», то есть критическое замедление процесса и принципиальная невозможность переработать весь объем исходного субстрата при малой концентрации начальной биомассы метаногенных микробов.

В данной работе мы рассмотрели модель, описывающую процесс получения метана в виртуальном биореакторе из однородного органического сырья. Для её построения и численного анализа нами использовалась платформа имитационного моделирования Python. В ходе проведенных исследований был получен ряд нетривиальных результатов, позволивших сформулировать конкретные рекомендации по выбору оптимальных режимов работы подобного биореактора, обеспечивающих его устойчивое функционирование в зависимости от выбранных критериев эффективности [2, 3].

Библиографический список

1. Вавилин В.А. Как эффективно получать биогаз? // Природа. – 2008. – №11.
2. Топаж А.Г., Вигонт В.А., Хворова Л.А. Имитационная модель процесса производства биогаза из многокомпонентного растительного сырья. Анализ и параметрическая оптимизация // Химия растительного сырья. – 2018. – №1.
3. Топаж А.Г., Жариков А.В., Баюк А.А., Хворова Л.А. Исследование математической модели производства биогаза из растительного сырья // Известия Алтайского гос. ун-та. 2018. №1 (99).