

*Лалин Е. Д., Белоусов В. В., Желябовский С. В.*

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА ИЗ ЖИДКИХ ОТХОДОВ БРОДИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

*Работа выполнена под руководством к.т.н. Иванова О. О.*

*ТГТУ, Кафедра «Технологическое оборудование  
и пищевые технологии»*

В современных условиях мирового дефицита энергоносителей и тяжелой экологической ситуации следует обратить внимание на возможность перевода пищевых производств на безотходные, в частности спиртовую промышленность, которая при использовании в своем производстве мелассы загрязняет своими многотонными отходами близлежащие к предприятию территории. Это связано с тем, что утилизация жидких отходов таким методом как сушка весьма энергоемка. И все же существует ряд методов утилизации ЖООБП, позволяющих не только не усугубить экологическую обстановку, но и принести прибыль предприятию.

Одним из таких методов является анаэробное сбраживание ЖООБП бактериями метаногенного сообщества, позволяющее получать сотни тысяч кубометров биогаза в год и ценные сельскохозяйственные удобрения.

Технологическое оборудование для процессов получения биогаза весьма громоздко (реакторы объемом 500 – 10000 м<sup>3</sup> для сахарных, спиртовых заводов; 1 – 20·10<sup>6</sup> м<sup>3</sup> – для свалок бытовых и промышленных отходов) и в связи с этим ошибки в просчете процесса дорого обходятся, к тому же уравнения, а точнее системы, описывающие процесс как правило имеют дифференциальный вид, не так уж и просто рассчитать вручную, поэтому для этого применяют математическое моделирование.

Математическое моделирование любого биотехнологического процесса, аппарата или системы сводится к оценке скорости протекания биохимических процессов, которая определяется скоростью биохимической деятельности (роста) микрореагентов в зависимости от одного или нескольких параметров среды, обеспечивающей протекание метаболических процессов. При этом микрореагенты представляют весьма сложные объекты, математическое описание которых с традиционных представлений применяемых для описания технологических объектов оказывается затруднительным и возможно только на основе обширной системы допущений.

При непрерывном перемешивании можно считать весь объем культиватора однородно заполненным, концентрации субстрата и клеток микроорганизмов в каждой точке объема одинаковыми, и описывать поведение этих концентраций во времени с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Математическая модель процесса получения биогаза из ЖООБП имеет вид [1, 2]:

$$\mu(S) = \mu_m \frac{S_1}{S_1 + S_1} \cdot \dots \cdot \frac{S_6}{K_6 + S_6} \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu(S)X - DX \quad (2)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = D(S_{1_0} - S_1) - \alpha_1 \mu(S)X \quad (3)$$

...

$$\frac{dS_6}{dt} = D(S_{6_0} - S_6) - \alpha_6 \mu(S)X \quad (8)$$

$$\frac{dP}{dt} = \beta \mu(S)X \quad (9)$$

где (1) – зависимость мультипликативного влияния концентрации субстрата по механизму Моно ( $K_1$ - $K_6$  – константы Михаэлиса;  $S_1$ - $S_6$  – концентрации компонентов субстрата;  $\mu_m$  – максимальная скорость роста, определяемая генетическими возможностями популяции); (2) – зависимость для расчета прироста биомассы за счет поглощения субстрата ( $X$  – концентрация микроорганизмов;  $D$  – относительная скорость потока (для непрерывного процесса)); (3) - (8) – уравнения для определения количества субстрата, поглощенного микроорганизмами ( $\alpha_1$ -  $\alpha_2$  – коэффициент, показывающий, какая часть поглощенного субстрата идет на приращение биомассы); (9) – зависимость для расчета количества накопленного целевого продукта ( $\beta$  – коэффициент, показывающий, сколько продукта выделяется при приращении биомассы).

Составленная математическая модель позволяет при заданных концентрациях составляющих субстрата, коэффициентах Михаэлиса, экономических коэффициентах, коэффициенте накопления продукта, начальной концентрации микроорганизмов определить концентрацию целевого продукта, микроорганизмов, компонентов субстрата как при непрерывном, так и при периодическом ведении процесса.

Рассмотрим мелассную после спиртовую барду как один из видов жидких отходов бродильных производств. Химический состав мелассной после спиртовой барды указан в таблице 1 [3].

Т а б л и ц а 1

**Химический состав после спиртовой мелассной барды**

Органические соединения	Количество, %	Неорганические вещества	Количество, %
	Мас. СВ		Мас. СВ
Глицерин	6...12	Калий	8,5...13
Триметилглицин (бетаин)	16...26	Натрий	1,3...2,5
Аминокислоты, в том числе глутаминовая кислота	15...25	Кальций	0,5...2,5
Органические кислоты	3...10	Ионы $SO_4^{2-}$	0,6...4,6
Редуцирующие вещества	4...6	Ионы $Cl^-$	0,9...3
Коллоиды	13...15	Всего:	13...18
Всего:	80...87	Микроэлементы (Fe, Co, Mg, Cu и др.)	0,12...0,14

Для вычисления были приняты приближенные значения концентраций компонентов субстрата и кинетических коэффициентов.

Исходные данные для расчета:  $S_1=5$  г/л;  $S_2=6$  г/л;  $S_3=4$  г/л;  $S_4=8$  г/л;  $S_5=7$  г/л;  $S_6=10$  г/л;  $P=0$  г/л;  $K_{s1}=0,5$  г/л;  $K_{s2}=0,9$  г/л;  $K_{s3}=0,7$  г/л;  $K_{s4}=0,65$  г/л;  $K_{s5}=0,45$  г/л;  $K_{s6}=0,8$  г/л;  $\alpha_1=0,53$  г/г;  $\alpha_2=0,34$  г/г;  $\alpha_3=0,45$  г/г;  $\alpha_4=0,47$  г/г;  $\alpha_5=0,39$  г/г;  $\alpha_6=0,51$  г/г;  $\beta=0,3$  г/г;  $X_0=3$  г/л;  $\mu_m=0,52$  1/ч;  $D=0,241$  ч<sup>-1</sup>;

В результате расчета математической модели были получены зависимости концентраций компонентов субстрата, микроорганизмов и целевого продукта от времени при периодическом (рис. 2, табл. 2) и непрерывном (рис. 3, табл. 3) ведении процесса.

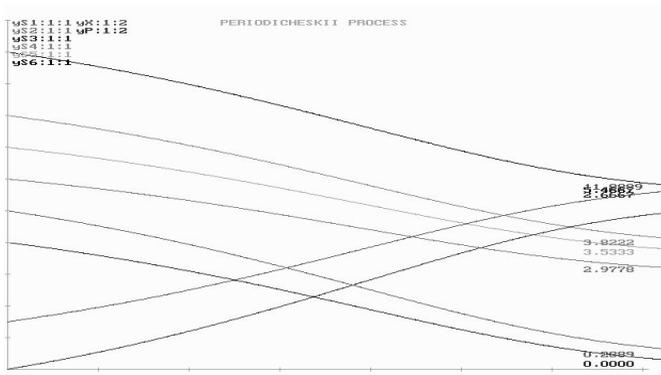


Рис. 2. Результаты расчета периодического процесса

Таблица 2

Результаты расчета периодического процесса

Компонент субстрата	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
Концентрация, г/л	0,288	2,977	0	3,822	3,533	5,488

Концентрация микроорганизмов по окончании процесса  $X - 11,888$  г/л.

Концентрация целевого продукта  $P - 2,667$  г/л.

Время протекания процесса - 31 час.

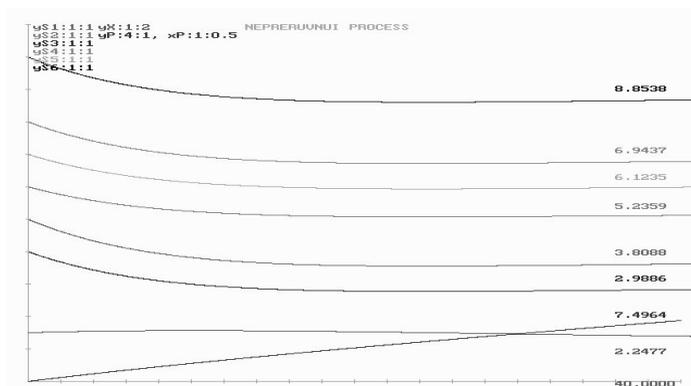


Рис. 3. Результаты расчета непрерывного процесса

## Результаты расчета непрерывного процесса

Компонент суб- страта	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
Равновесная концентрация, г/л	3,808	5,235	2,988	6,943	6,123	8,853

Равновесная концентрация микроорганизмов:  $X = 2,247$ .

Время стабилизации процесса – 26 часов.

При помощи математической модели, соответствующей поставленной практической задаче можно приближенно описать процесс получения биогаза из ЖООБП. При рассмотрении различного аппаратного оформления следует учитывать, характерное распределение концентрационных и температурных полей.

Данная математическая модель применима для приближенных расчетов и требует уточнения кинетических коэффициентов. Результатом математического моделирования биотехнологических процессов является создание универсальной математической модели, позволяющей описать процесс биотрансформации в биореакторе любого типоразмера. Предполагается, что такие математические модели будут включать в себя своеобразные зависимости “коэффициент – функция”, входными в которые будут конструктивные параметры биореактора.

## Список литературы

1. Васильев Н.Н. и др. Моделирование процессов микробиологического синтеза”. М., Лесная промышленность, 1975, 341 с.
2. Яровенко В.Л., Равинский Л.А. Моделирование и оптимизация микробиологических процессов спиртового производства. М., Пищевая промышленность, 1978, 247 с.
- 3.Н.А. Березкина, О.А. Плотникова, О.В. Солопова, Н.А. Филиппова. Эффективность вермикюльтуры как биологического агента при утилизации мелассной барды. Труды ТГТУ, выпуск 17, Технологические процессы и оборудование. Автоматизация технологических процессов. Машиностроение и металловедение. Строительство и архитектура. Сборник научных статей молодых ученых и студентов. ТГТУ, 2005 г.