

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В БИОРЕАКТОРЕ

Д-р техн. наук В.И. Барков.

ТОО «Казахский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства»,
Республика Казахстан

MODELING OF MICROBIOLOGICAL PROCESS IN THE BIOREACTOR

V.I. Barkov Doctor of Technical sciences.

LLP «Kazakh scientific research institute mechanization and electrification of agriculture», Republic of Kazakhstan
E-mail: kazniimesh@yandex.kz

Резюме: Получены результаты теоретического расчета выхода биогаза в психрофильном, мезофильном и термофильном режимах, а также при комбинированном сбраживании субстрата. На основании полученных данных разработана усовершенствованная технология комбинированного сбраживания сельскохозяйственных биоотходов. Это позволит получить исходные данные для разработки новых конструктивно-технологических схем биогазовых установок, которые позволят повысить эффективность переработки отходов животноводства за счет интенсификации процесса био конверсии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТЕХНОЛОГИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТХОДОВ, БИОГАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, БИОРЕАКТОР, БИОГАЗ, ОРГАНИЧЕСКИЕ УДОБРЕНИЯ.

Abstract: The results of theoretical calculation of biogas yield in psychrophilic, mesophilic and thermophilic conditions, as well as in the combined fermentation of the substrate. Based on these data, the advanced technology combined fermentation of agricultural biowaste. This will provide baseline data for the development of new structural and technological schemes of biogas plants that will improve the efficiency of processing animal waste due to the intensification of the process of bioconversion.

KEYWORDS: TECHNOLOGY BIOLOGICAL TREATMENT, BIOGAS TECHNOLOGY, BIOREACTOR, BIOGAS, ORGANIC FERTILIZERS.

1. Введение

Основа управления биосинтетической активностью микроорганизмов – реакция микробной клетки на изменение внешних условий. Поэтому для разработки технологий переработки сельскохозяйственных отходов необходимо исследовать, как влияют на кинетику метаногенеза параметры состояния системы. Это позволит получить исходные данные для разработки конструктивно-технологической схемы высокопроизводительного оборудования для биогазовых технологий [1,2].

2. Предпосылки и средства для решения проблемы

2.1. Теоретическая модель

Физические макроскопические величины, характеризующие состояние системы, являются параметрами ее состояния. В качестве параметров состояния отдельных элементов моделируемого объекта рассматривают температуру субстрата, скорость биохимических реакций, концентрацию водородных ионов (pH), время протекания процесса.

Конструктивные характеристики изучаемого объекта – это геометрические размеры: длина, ширина, высота, диаметр, площадь поверхности и объем биореактора и газгольдера.

Величины удельной скорости роста культуры и скорости разбавления культуры представляют собой расходные характеристики.

Все физические величины, используемые для математического описания микробиологического процесса, подразделяются на 2 группы - переменные и постоянные. К переменным относятся температура окружающей среды и скорость разбавления культуры, продолжительность стадий кислотного и щелочного сбраживания и выход биогаза. Постоянные физические величины – это теплоемкость, плотность и вязкость субстрата.

При биологических окислительно-восстановительных процессах, к которым относится и метановое брожение, концентрация водородных ионов (pH) значительно влияет на активность ферментативных реакций. Специалисты считают, что оптимальное значение pH для метановых бактерий – 7...7,6, расширение этого интервала до 6,5 снижает выход биогаза на 30...40%, а до 6 – почти полностью тормозит развитие метановой микрофлоры [2,3,4].

Таким образом, устойчивость и интенсивность процесса метанового сбраживания в биореакторе зависит от сбалансированности всех стадий процесса, оптимального взаимодействия всех групп микроорганизмов в каждой фазе переработки.

Модель микробиологического процесса можно представить в виде уравнения, описывающего скорость роста культуры микроорганизмов в субстрате [2].

$$\frac{dx}{d\tau} = (V_{\text{рост}} - V_{\text{разб}})x, \quad (1)$$

где x – количество микроорганизмов в 1 мл субстрата; τ – время протекания процесса; $V_{\text{рост}}$ – удельная скорость роста культуры; $V_{\text{разб}}$ – скорость разбавления культуры, зависящая от дозы загрузки.

В случае, если

$$V_{\text{разб}} = V_{\text{рост}}, \text{ то } \frac{dx}{d\tau} = 0, \quad (2)$$

следовательно, количество микроорганизмов в субстрате остается постоянным.

Анаэробное брожение наиболее эффективно протекает при постоянном росте количества микроорганизмов. Таким образом, условие интенсификации процесса имеет вид:

$$V_{\text{разб}} < V_{\text{рост}}, \text{ тогда } \frac{dx}{d\tau} \geq 0. \quad (3)$$

Зависимость скорости роста культуры микроорганизмов от температуры среды описывается эмпирической формулой [2]

$$V_{\text{рост}} = 0,013 \cdot t - 0,129, \text{ сут}^{-1}, \quad (4)$$

где t – температура процесса, °C.

Тогда:

- при психрофильном режиме ($t=20^{\circ}\text{C}$) $V_{\text{рост}}=0,131 \text{ сут}^{-1}$,
- при мезофильном режиме ($t=30^{\circ}\text{C}$) $V_{\text{рост}}=0,261 \text{ сут}^{-1}$,
- при термофильном режиме ($t=55^{\circ}\text{C}$) $V_{\text{рост}}=0,586 \text{ сут}^{-1}$.

С другой стороны, скорость роста зависит от скорости разбавления, которая, в свою очередь, зависит от дозы загрузки биореактора субстратом [5] $V_{рост} = f(D)$

$$D = \frac{Q_{ЗС}}{Q_{СБ}} 100, \quad (5)$$

где $Q_{СБ}$ - масса субстрата в биореакторе; $Q_{ЗС}$ - масса загружаемого субстрата.

Таким образом, анализ зависимостей (1)...(5) позволяет сделать вывод, что скорость роста микроорганизмов зависит от температуры, дозы загрузки, времени протекания процесса (экспозиции), стадии процесса брожения и бактериального состава ассоциации микроорганизмов.

Тогда целевую функцию для процесса образования биогаза целесообразно представить в виде кинетической модели Конто [2]

$$B = B_{ПРЕД} C_{ОВ} \left(1 - \frac{K}{V_{рост} \tau - 1 + K}\right) \rightarrow \max, \quad (6)$$

где B - выход биогаза с 1 м³ объема биореактора, м³/м³; $B_{ПРЕД}$ - предельный выход биогаза на единицу массы субстрата при бесконечно большой продолжительности процесса, м³/кг; $C_{ОВ}$ - концентрация органического вещества в субстрате, %; τ - продолжительность сбраживания, сут; K - кинетический параметр процесса.

Результаты теоретического расчета выхода биогаза в психрофильном, мезофильном и термофильном режимах, а также при комбинированном сбраживании субстрата в термофильном и мезофильном режимах приведены таблице 1.

Таблица 1 – Выход биогаза в психрофильном, термофильном, мезофильном и комбинированном режимах.

Температурный режим	Скорость роста микроорганизмов, $V_{рост}$, сут ⁻¹	Предельный выход биогаза, $B_{ПРЕД}$, м ³ /кг	Содержание органического вещества, $C_{ОВ}$, %	Выход биогаза с 1 м ³ биореактора, B , м ³ /м ³
Психрофильный	0,13	0,09...0,18	8,4	0,6...1,2
Мезофильный	0,26	0,18...0,4	8,4	1,2...2,16
Термофильный	0,58	0,32...0,6	8,4	2,16...4,13
Термофильный и мезофильный	0,26...0,58	0,18...0,6	8,4	3,36*...6,26**

Анализ полученных данных показывает, что при принятых условиях выход биогаза в термофильном режиме может составлять 2,16...4,13 м³/м³, в мезофильном режиме, соответственно - 1,2...2,16 м³/м³ и в психрофильном – 0,6...1,2 м³/м³, а при одновременном сбраживании субстрата в термофильном и мезофильном режимах - 3,36...6,26 м³/м³.

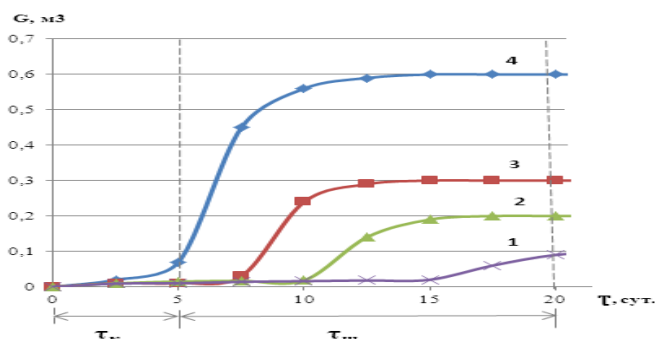
2.2. Экспериментальная установка

Данные теоретических исследований были проверены на лабораторной биогазовой установке с реактором объемом 0,5 м³. Результаты приведены на рисунке 1, где показана зависимость интенсивности процесса сбраживания биомассы от дозы загрузки в мезофильном и термофильном режимах.

Полученные данные говорят о том, что при изменении дозы загрузки биомассы от 3 до 20% удельный выход биогаза составляет для мезофильного режима 0,2...1,2 м³/м³ в сутки и для термофильного режима 0,4...2,16 м³/м³ в сутки. Стадия кислотного брожения наиболее эффективно протекает в мезофильном режиме, а её продолжительность снижается от 15 до 5 суток при увеличении дозы загрузки от 3 до 20%. Следовательно, оптимальные условия кислотного брожения следующие: температура – 30...35 °С, время экспозиции – 3...5 суток, доза загрузки – не менее 20%.

Результаты лабораторных исследований в двухкамерного биореактора (таблица 2) показали, что кислотная стадия протекает при температуре 34°С, продолжается 3...5 суток, затем брожение переходит в щелочную стадию. Щелочная

стадия характеризуется интенсивным выделением биогаза, наиболее эффективно протекает в термофильном режиме при температуре 53 °С, время экспозиции – 7...15 суток, доза загрузки – 10...12%, выход биогаза составляет 2,1...3,4 м³/м³.



1 – доза загрузки 3% (15 л/сут); 2 – доза загрузки 6% (30 л/сут); 3 – доза загрузки 15% (60 л/сут); 4 – доза загрузки 20% (100 л/сут); τ_k - время экспозиции в стадии кислотного брожения; $\tau_{щ}$ - время экспозиции в стадии щелочного брожения.

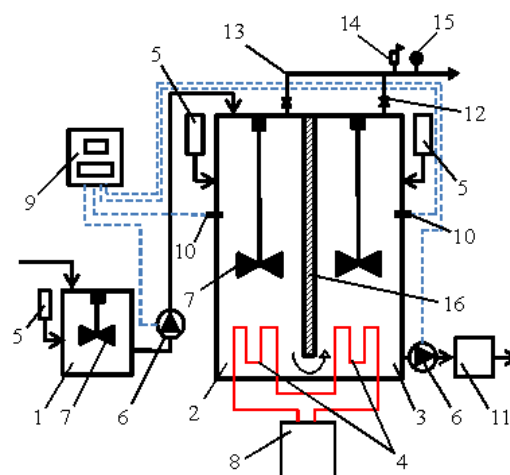
Рисунок 1 – Зависимость продолжительности стадий кислотного и щелочного сбраживания и выхода биогаза от дозы загрузки биомассы в биогазовую установку с объемом реактора 0,5 м³

Таблица 2 – Результаты испытаний двухкамерного биореактора

Температурный режим в камерах биореактора	Доза загрузки камер, %	Время экспозиции, сут	Кислотность субстрата, pH	Выход биогаза с 1 м ³ биореактора, B , м ³ /м ³
Камера кислотного сбраживания- 34°С	15...20	3...5	4,8...7,2	-
Камера щелочного сбраживания- 53°С	10...12	7...10	6,7...7,7	2,1...3,4

2.3 Средства решения проблемы

На основании результатов исследований разработана усовершенствованная технология анаэробной переработки отходов (рисунок 2).



1- емкость для предварительной подготовки сырья; 2-камера кислотного брожения; 3-камера щелочного брожения; 4 – двухсекционный теплообменник; 5 - дозатор; 6 - фекальный насос; 7 – автоматическая мешалка; 8 - топливный котел; 9 – контроллер; 10 – датчики температуры; 11 – резервуар-накопитель готового удобрения; 12 – вентиль; 13 – газопровод; 14 – аварийный клапан; 15 – манометр 16 – перегородка.

Рисунок 2 - Технология переработки отходов

Предложенная технология включает в себя следующие операции:

1. Навоз поступает в емкость 1, в которой выполняется функция предварительной подготовки субстрата:

- гомогенизация субстрата с помощью мешалки 7;
- химическая обработка (дозатор 5);
- обработка комплексом гидrolитических групп микроорганизмов (дозатор 5);
- выдерживание при температуре процесса.

Оптимальный вариант предварительной подготовки навоза – гомогенизация и выдерживание при температуре процесса. В этом режиме выделение биогаза начинается в течение одних суток после загрузки в реактор, а содержание метана в нем возрастает до 49...52%, по сравнению со спонтанным режимом.

2. В камере 2 реализуется функция кислотного сбраживания субстрата в мезофильном режиме: доза загрузки 15...20%; кислотность pH = 4,8...7,2; температура 32...40°C; продолжительность экспозиции $\tau = 3...5$ сут.

Регулирование процесса сбраживания производится применением стимулирующих добавок метанола, ацетата или целлюлозы через дозатор 5. Бактериальный состав регулируется внесением штаммов активных ассоциаций микроорганизмов.

3. В камере 3 реализуется функция щелочного брожения субстрата (метаногенез) в термофильном режиме: доза загрузки 10...12%; кислотность pH = 6,7...7,7; температура 50...55°C; продолжительность экспозиции $\tau = 7...15$ сут.

Регулирование процесса сбраживания производится применением стимулирующих добавок и введением штаммов эффективных микроорганизмов, содержащих, например, метаногенерирующие культуры *Methanobacterium omelianskii* и *Methanococcus mazei* (дозатор 5).

4. В камерах 2 и 3 расположены секции теплообменника соединенного технологическими трубопроводами с топливным котлом 8 и служат для нагрева биомассы до заданной температуры процесса в каждой камере. Камеры 2 и 3 разделены перегородкой с теплоизолирующим экраном, которая обеспечивает поддержание мезофильного и термофильного режимов в камерах с различной температурой. Таким образом, в камерах биореактора создаются две зоны нагрева биомассы с различной температурой, что позволяет интенсифицировать процесс анаэробной переработки.

5. Время экспозиции субстрата в камерах 2 и 3 регулируется соотношением их объемов – $V_K / V_{Щ}$, поскольку процесс в кислотной фазе идет значительно интенсивнее, чем в щелочной фазе, то объем камеры кислотного 2 брожения принимается меньше, камеры щелочного 3 брожения в 2,3...3 раза.

Таким образом, разработанная технология анаэробной переработки отходов позволяет интенсифицировать процесс сбраживания. Например, в камере 2 объемом 1,5 м³ при дозе загрузки 20% кислотная фаза процесса протекает при мезофильной температуре и продолжается 72 часа (3 сут), а в камере 3 объемом 3,5 м³ при дозе загрузки 10% щелочная фаза процесса протекает при более высокой термофильной температуре 55°C и продолжается 168 часов (7 сут).

Удельный расход электроэнергии на нагрев составляет 3,5 кВт·ч/т, что ниже, чем биогазовой установки БУ-5 с однокамерным биореактором – 4,55 кВт·ч/т, следовательно энергозатраты снижены в 1,3 раза.

Преимущество деления процесса анаэробной переработки на отдельные фазы, протекающие в разных камерах, проявляется в том, что в каждой фазе создаются оптимальные условия для развития и жизнедеятельности той популяции микроорганизмов, которая необходима для повышения эффективности брожения биомассы.

На базе данной технологии разработана новая конструктивно-технологическая схема двухкамерного биореактора, защищенная инновационным патентом [6].

3. Заключение

Моделирование микробиологического процесса в биореакторе позволило обосновать оптимальные температурные режимы в кислотной и щелочной стадиях сбраживания субстрата: температура – 30...35 °C и 50...55 °C, соответственно, а также обосновать время экспозиции: 3...5 суток и 7...15 суток, соответственно, и дозы загрузки камер биореактора – 15...20% и 10...12%.

Разработанная усовершенствованная технология биологической обработки отходов позволяет повысить эффективность конверсии отходов и агротехнические свойства получаемых органических удобрений, производительность установки, снизить энергоемкость процесса.

Таким образом, можно обеспечить эффективное использование биогазовых установок на животноводческих фермах и реализовать блочно-модульный принцип комплектации оборудования.

4. Литература

- 1 Барков В.И. Совершенствование технологии биологической обработки сельскохозяйственных отходов. /Материалы II международной научно-технической конференции «Машины для сельского хозяйства», Варна, 2014.- С. 82-84
- 2 Дубровский В.С., Виестур У.Э., Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. – Рига: Зинатне, 1988. -204с.
- 3 F. Fantozzi, C. Buratti. Biogas production from different substrates in an experimental Continuously Stirred Tank Reactor anaerobic digester// Bioresource Technology, 2009 – December, Volume 100, Issue 23.
- 4 Redoxpotential als MessgroÙe für Biogasanlagen. Euroheat and Power. 2012. 41, №6, с.71.
- 5 Барков В.И. Результаты испытаний биогазовой установки в фермерском хозяйстве// Материалы VII международной научно-практической конференции «Бъдещите изследвания», Т.13. София изд.: Бял ГРАД-БГ ООД. – 2011. – С. 58-62. (Токмолдаев А.Б., Аблианов В.А., Сарыбаев Б.А.)
- 6 Инновационный патент №23450 Республика Казахстан, МПК C02F11/04. Биореактор /Сейтбеков Л.С., Барков В.И., Токмолдаев А.Б., Аблианов В.А. опубл. 15.12.2010, бюлл. №12. – С. 4.