

На правах рукописи

Костромин Денис Владимирович

**АНАЭРОБНАЯ ПЕРЕРАБОТКА
ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА
В БИОРЕАКТОРЕ С БАРБОТАЖНЫМ
ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
Марийский государственный технический университет.

Научный руководитель: **доктор технических наук, профессор
Сидыганов Юрий Николаевич**

Официальные оппоненты: **доктор технических наук, профессор
Кирсанов Владимир Вячеславович**

**кандидат технических наук
Ковалев Дмитрий Александрович**

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Марийский государственный университет»
(ГОУ ВПО МарГУ)

Защита состоится « 4 » марта 2010 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 006.034.01 Государственного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка» (ГНУ ГОСНИТИ) по адресу: 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д.1, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ГОСНИТИ по адресу: 109428, г. Москва, 1-й Институтский пр., д.1.

Автореферат разослан и опубликован на сайте <http://www.gosniti.ru>
« 28 » января 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Соловьев Р.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

На животноводческих комплексах РФ в связи с планируемым увеличением поголовья по программе “Ускоренное развитие животноводства” в рамках приоритетного национального проекта “Развитие сельского хозяйства” и внедрением новых технологий содержания предполагается высокая концентрация сельскохозяйственных животных. Это обстоятельство может привести к накоплению вокруг сельхозпредприятий больших неиспользуемых объемов навозных стоков, что создаст условия к загрязнению грунтовых вод и воздушного бассейна, а так же биологической загрязненности патогенными микроорганизмами прилегающих территорий.

Применение технологии анаэробной переработки в сельскохозяйственном производстве позволяет решить не только экологические проблемы, встающие перед животноводческими хозяйствами, но и увеличить рентабельность предприятия за счет получения высококачественных органических удобрений и биогаза, пригодного для получения тепла или электроэнергии. Однако, несмотря на перечисленные выше преимущества, метод анаэробной переработки еще не нашел широкого применения. Это обусловлено рядом факторов: низкой скоростью прохождения процесса метаногенерации и как следствие, высокой стоимости биогазовых комплексов. При этом низкая скорость процесса сбраживания обусловлена неоднородностью температурного поля, создающегося в биореакторе, и наличием ингибиторов среды.

Для решения данной проблемы может быть использован метод интенсификации процесса сбраживания на основе барботажного перемешивания, который позволяет свести к минимуму температурную неоднородность и отводить ингибирующие продукты жизнедеятельности бактерий в биореакторе. Сдерживающим фактором в развитии данного направления является отсутствие комплексных исследований, направленных на совершенствование конструкции и обоснование параметров и режимов работы биореактора с барботажным перемешиванием. В связи с этим исследование анаэробной переработки органических отходов животноводства в биореакторе с барботажным перемешиванием является актуальной проблемой, представляющей научный и практический интерес.

Работа выполнялась в рамках ГК № 02.552.11.7005 по выполнению научно-исследовательских работ: «Выполнение работ по развитию центра коллективного пользования «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей», (ЦКП ЭБЭЭ)» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы»; ГК № 6538Р/9098 от 01.02.2009 года по программе "У.М.Н.И.К." фонда

содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере; ГК № П208 от 22.07.2009 “Разработка новых способов и технических систем для переработки органических отходов, получения экологически чистых энергоносителей, удобрений и рекультивации нарушенных земель” в рамках ФЦП «Научные и научно педагогические кадры инновационной России на 2009-2012 годы».

Цель исследования. Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов животноводства путем интенсификации процесса сбраживания субстрата в биореакторе с барботажным перемешиванием.

Объект исследования. Технологический процесс анаэробной переработки навоза КРС, исследуемым элементом которого является биореактор с барботажным перемешиванием, а так же исходный субстрат для анаэробной переработки.

Предмет исследования. Закономерности процессов теплообмена и биологической активности в сбраживаемом субстрате при барботажном перемешивании.

Методика исследования. Кинематическая вязкость и поверхностное натяжение субстрата определялись в соответствии с общепринятыми методиками для сред близких к жидкостям. Процессы теплообмена и биологической активности в биореакторе при барботажном перемешивании сбраживаемого субстрата исследовались методами математического моделирования на базе положений гидравлики, биотехнологии и теплопередачи с использованием теории подобия. Экспериментальные исследования проводились методом физического моделирования и натурального эксперимента, с использованием теории планирования эксперимента. Результаты исследований обработаны с помощью методов математической статистики и с применением программы пакета *Statistica v6.0*.

Научная новизна.

Впервые для условий анаэробной переработки органических отходов животноводства экспериментально определены кинематическая вязкость и поверхностное натяжения сбраживаемого субстрата; разработана математическая модель движения биогазового пузырька, образующегося в сбраживаемом субстрате при барботировании в зависимости от свойств субстрата, отличающаяся учетом специфики пузырькового режима барботажного перемешивания; получено уравнение для определения коэффициента теплоотдачи в объеме биореактора с барботажным перемешиванием, отличающееся учетом его конструктивно-технологических параметров; разработана математическая модель функционирования анаэробной биологической системы, учитывающая специфику ингибирования метаболической активности субстрата в биореакторе с барботажным перемешиванием. Новизна технического решения подтверждена патентом РФ на полезную модель.

Практическая ценность работы.

Система барботажного перемешивания в биореакторе, рекомендуемая для ускоренной анаэробной переработки органических отходов животноводства, позволяет интенсифицировать процесс сбраживания за счет сведения к минимуму температурной неоднородности и отвода ингибирующих продуктов жизнедеятельности бактерий. Разработанная методика инженерного расчета позволяет определять конструктивные и технологические параметры биореактора с барботажным перемешиванием при проектировании технологии анаэробной переработки. Обоснованы рациональные параметры процесса барботажного перемешивания при анаэробной переработке органических отходов животноводства.

Реализация результатов исследования.

Материалы диссертационной работы использованы при разработке технических предложений, которые переданы заинтересованным организациям – ОАО «Тепличное».

По результатам исследований разработана, изготовлена и запущена в эксплуатацию в ОАО «Тепличное» Республики Марий Эл биогазовая установка по ускоренной переработке навоза КРС с системой барботажного перемешивания.

Результаты работы внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 110300.62 в курсе «Механизация животноводства».

На защиту выносятся:

1. Установленные значения кинематической вязкости и поверхностного натяжения сбраживаемого субстрата на основе органических отходов животноводства.

2. Математическая модель, описывающая процессы теплообмена и ингибирования анаэробного биологического субстрата на основе органических отходов животноводства в биореакторе с барботажным перемешиванием.

3. Полученные экспериментальные данные анаэробной переработки органических отходов животноводства в биореакторе с барботажным перемешиванием.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на научных конференциях профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов и сотрудников МарГТУ в 2006-2009 годах, МГАУ в 2007 г, на научно-практической конференции в рамках международной научно-образовательной школы-конференции по биоинженерии и приложениям «Перспективы развития инноваций в биологии» (МГУ г.Москва 2007г.), на научно-практическом семинаре «Национальные приоритеты развития России: образование, наука, инновации» в рамках коллективной экспозиции Минобрнауки России и Роснауки, VIII

Московского международного салона инноваций и инвестиций (ВВЦ г.Москва 2008г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 5 печатных работах, в том числе 1 в журналах перечня ВАК, получены два патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 7 таблиц, 37 рисунков, список литературы из 143 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, дана краткая характеристика работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследований» анализируется современное представление технологии анаэробной переработки органических отходов животноводства. Рассматриваются основные этапы сбраживания, основные влияющие факторы и требования, предъявляемые к процессу, основные схемы и конструкции биогазовых установок, приведена их классификация.

Большой вклад в развитие научных знаний о процессе анаэробной переработки органических отходов животноводства внесли Амерханов Р.А., Андрюхин Т.Я., Ананиашвили Г.Д., Архипченко И.А., Гюнтер Л.И., Денисов В.А., Дурдыбаев С.Д., Кирсанов В.В., Коваленко В.П., Ковалёв Н.Г., Ковалёв А.А., Ковалёв Д.А., Мишуров Н.П., Пузанков А.Г., Савин В.Д., Сидыганов Ю.Н., Тарасов С.И., Харламов Е.П., Цой Ю.А., Черепанов А.А., Шамшуров Д.Н., Шрамков В.М., Баадер В., Беккер М.Е., Дубровскис В., Евтеев В.К., Мариненко Е.Е. и др.

Анализ проблемы показал, что для повышения эффективности процесса анаэробной переработки необходимо ускорить период сбраживания. В общем, скорость процесса определяется скоростью одной из составляющих элементарного процесса, которая протекает медленней других. Все реакции, протекающие во время процесса сбраживания, очень сильно зависят от стабильности температурного режима и активной реакции среды рН. Применения барботажного перемешивающего устройства для решения данной проблемы позволит не только свести к минимуму температурную неоднородность, но и позволит также отводить продукты жизнедеятельности бактерий, что необходимо для их роста.

Вопросами движения среды и теплообмена в ней при барботажном воздействии занимались Рамм В.М., Кутателадзе С.С., Старикович М.А., Тодес О.М., Касаткин А.Г., Пилбс Ф., Гарбер Х., Броунштейн Б.И., Жильцова О.А., Тур А.А. Кафаров В.В., Биркин С.М. и др. Работы по обоснованию и интенсификации теплового режима в биореакторных установках, микробиологическому исследованию биохимических

процессов проводили Панцхава Е.С., Друзьянова В.П., Марченко В.И., Келов К., Хашимото Е., Ковалев А.А., и др.

По результатам анализа широкого спектра работ отечественных и зарубежных исследований отмечается, что в новых условиях ужесточения требований к охране окружающей среды и экономической эффективности существующие биогазовые установки не обеспечивают оптимального периода сбраживания, а применяемые в них механические средства перемешивания субстрата требуют регулярного ремонта и замены, нарушая при этом непрерывность процесса. Использование барботажного перемешивания, исключая движущие конструктивные части, позволяет свести к минимуму данный недостаток, а так же комплексно оптимизировать температурный режим и микробиологию среды в биореакторе.

В соответствии с вышеизложенным, определена цель, сформулированы положения диссертации, выносимые на защиту, и поставлены **задачи исследований:**

1. Исследовать кинематическую вязкость и поверхностное натяжение сбраживаемого субстрата на основе органических отходов животноводства в зависимости от технологических параметров процесса сбраживания.

2. Разработать конструкцию биореактора, обеспечивающую применение барботажного перемешивания с ускоренной анаэробной переработкой органических отходов животноводства.

3. Разработать математическую модель, описывающую распространение теплоты, ингибирующих процессов в сбраживаемом субстрате, энергобаланс установки при барботажном перемешивании.

4. Экспериментально определить коэффициенты критериального уравнения процесса распространения теплоты, проверить теоретические данные, полученные при моделировании биореактора с барботажным перемешиванием.

5. Разработать методику инженерного расчета биореактора с барботажным перемешивающим устройством по ускоренной анаэробной переработке органических отходов животноводства.

6. Разработать технологическую линию утилизации органических отходов животноводства на основе биореактора с барботажным перемешиванием.

7. Оценить экономическую эффективность использования ускоренной анаэробной переработки органических отходов животноводства.

Во второй главе «Теоретические исследования барботажного перемешивания субстрата» рассмотрены закономерности движения газового пузырька в субстрате, распространения теплоты, ингибирующих процессов и тепловой баланс биореактора с системой барботажного перемешивания.

В основу описания движения биогазового пузырька положена модель, связанная с определением сил, действующих на пузырек в момент его отрыва (рис 1). При этом форма пузырька рассматривается как шаровидная с диаметром d_n , не учитывающая образование шейки вблизи отверстия и отлична от диаметра отверстия d .

Отрыв биогазового пузырька происходит при достижении равенства архимедовой силы сумме трех других сил:

$$P_a = P_m + R + P_c, \quad (1)$$

где P_a - сила Архимеда; P_m - сила тяжести; R - сила поверхностного натяжения; P_c - сила сопротивления росту пузырька, которая определяется уравнением Ньютона при обтекании препятствий жидкостью.

Для решения выражения (1), определены необходимые и достаточные числа подобия, описывающие процесс образования биогазового пузырька: число Рейнольдса Re_0 , число Архимеда Ar_0 , число Вебера We_0 . Использование этих чисел подобия позволяет получить уравнение для определения безразмерного диаметра в следующем виде:

$$\bar{d}_n^5 - 6 \frac{Re_0^2}{We_0 Ar_0} \bar{d}_n^2 - 20,25 \frac{Re_0}{Ar_0} \bar{d}_n - 2,15 \frac{Re_0^2}{Ar_0} = 0, \quad (3)$$

где \bar{d} - безразмерный диаметр пузырька.

$$\bar{d} = \frac{d_n}{d} \quad (4)$$

Для практического определения скорости движения субстрата при барботажном перемешивании определена скорость всплытия пузырьков биогаза:

$$U = \frac{\mu Ar \sqrt{We_m}}{d_n \rho (18 \sqrt{We_m} + 0,6 \sqrt{Ar})}, \quad (5)$$

где μ - динамическая вязкость субстрата; ρ - плотность субстрата.

При всплытии биогазового пузырька в субстрате он встречает сопротивление. В результате возникает возмущение в сбрасываемом субстрате. Максимальная скорость возмущения потока будет находиться на поверхности биогазового пузырька, и уменьшаться по мере удаления от его центра. При всплытии биогазовые пузырьки передают движение субстрату.

Рассмотрен объем, выделенный вокруг частицы, который является цилиндрическим, не учитывающим влияния малых объемов на границах, течение осесимметричное. Составлена система уравнений Навье-Стокса, которая содержит необходимое и достаточное количество уравнений,

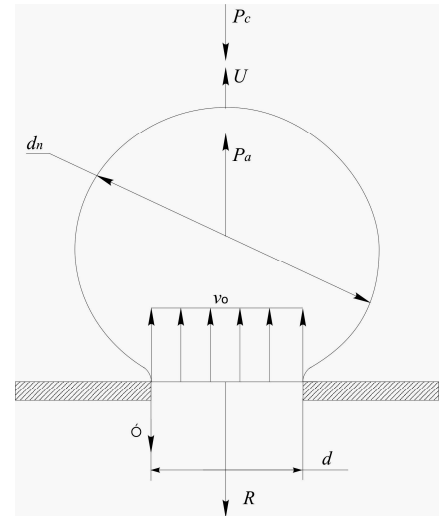


Рис.1. Схема сил, действующих на пузырек в момент отрыва.

граничных условий к ним.

В конечном счете, применение барботажного перемешивающего устройства в биореакторе оценивается скоростью установления однородности температурного поля. Степень температурной однородности характеризует интенсивность теплообмена в сбразиваемой среде, поэтому коэффициент теплоотдачи α :

$$\alpha = f(T/T_{omn}). \quad (5)$$

Используя вторую теорему подобия, были выбраны параметры интенсифицирующие теплообмен в сбразиваемом субстрате и составлена функция:

$$\alpha = f(U, \mu, c, \lambda, \rho, d', D, \mu/\mu_c) \quad (7)$$

где D – диаметр биореактора; $d' = d_n * n$ – объемный диаметр биогазовых пузырьков; c – теплоемкость; λ – теплопроводность; μ/μ_c – отношение вязкостей стенки тепловой рубашки и в центре биореактора.

Основываясь методом анализа размерностей теории подобия, уравнение преобразуется в критериальное уравнение, описывающее процесс теплоотдачи сбразиваемого субстрата в условиях барботажного перемешивания.

$$Nu = K \cdot Re^A \cdot Pr^B \cdot S^E \quad (8)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Pr – критерий Прандтля; S – симплекс вязкости пристеночного слоя сбразиваемого субстрата и ядра.

Определяющей величиной в уравнении (8) является критерий Нуссельта, поскольку он содержит искомый коэффициент теплоотдачи.

Субстраты для анаэробной переработки органических отходов животноводства восприимчивы к метаболизации, когда они представлены в культуральной среде малыми концентрациями и напротив, становятся ингибиторами роста при высоких концентрациях. Сделано допущение, что модель ингибирования распространяется только на фазу метаногенеза, наиболее критичную к биохимическому составу обрабатываемого субстрата; в фазе метаногенеза субстрат состоит из летучих органических кислот, большая часть которых находится в ионизированной форме, и только часть - в неионизированной форме. Это позволило для описания взять за основу модель ингибирования Андреу. При этом соотношение ионизированных и неионизированных кислот является функцией pH , причем эти молекулярные формы кислот являются ингибирующими по отношению к метаногенной биомассе.

В случае, когда значение $pH < 8,3$, что характерно для переработки животноводческих стоков АПК, имеют место особенности: концентрация ионов CO_3^{--} незначительна по сравнению с концентрацией ионов HCO_3^- ; концентрации ионов H^+ и OH^- незначительны по сравнению с концентрацией других ионов. В этом случае условия электронейтральности можно записать в виде:

$$\sum v_a C_a + (HCO_3^-) = \sum v_c C_c \quad (9)$$

В результате, модели роста биомассы и субстрата в дифференциальной форме запишутся в виде:

$$\frac{dX}{dt} = k_0 \frac{1}{1 + \frac{x_s}{x} + \frac{x}{x_i}} X \quad (10)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k_0 \cdot x}{a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{x_s}{x} + \frac{x}{x_i}} \quad (11)$$

где k_0 - экспоненциальная скорость роста бактериальной культуры; x - концентрация субстрата; x_s - коэффициент потенциальной метаболической активности (пороговая константа Моно); x_i - константа ингибирования.

Используя критерий стабильности процесса сбраживания: $\frac{dk}{dx} > 0$ и вводя $a = \frac{X - X_0}{x_0 - x}$ - коэффициент использования субстрата за период роста,

система уравнений (10) и (11) преобразуется в уравнение, характеризующее работу биотехнологической системы с ингибиторами, находящимися в ионизированной форме:

$$\left(1 + \frac{ax_s}{ax_0 + X_0} + \frac{ax_0}{ax_i}\right) \cdot \lg \frac{X}{X_0} - \frac{1}{ax_i} (X - X_0) + \frac{ax_s}{ax_0 + X_0} \cdot \lg \frac{ax_0}{ax_0 + X_0 - X} = k_0(t - t_0) \quad (12)$$

где X - концентрация биомассы, t - время.

Математическая модель процесса анаэробной переработки обеспечивает возможность проведения расчетов параметров анаэробной биологической системы переработки органических отходов животноводства в биореакторе с барботажным перемешиванием.

В заключении составлен тепловой баланс биореактора с барботажным перемешиванием, учитывающий положительный энергобаланс при производстве товарного биогаза при анаэробной переработке органических отходов животноводства.

Таким образом, получены уравнения, описывающие движение субстрата, теплообмен и биохимические характеристики в биореакторе в процессе барботажного перемешивания.

В третьей главе «Методика исследования», в соответствии с задачами теоретических исследований, приведены описания экспериментальной установки, разработана программа, методика проведения исследования, обработка опытных данных и оптимизация параметров барботажного перемешивания при анаэробной переработке органических отходов животноводства с учетом факторов, оказывающих наибольшее влияние.

Для проведения исследований были выбраны наиболее распространенные в регионе и отвечающие технологическим требованиям на компостирование навозные стоки животноводческого комплекса КРС.

Концентрация сухого вещества и сухого органического вещества, зольность, кинематическая вязкость и поверхностное натяжение сбраживаемого субстрата, pH среды, концентрации биомассы и летучих органических кислот определялись по общепринятым методикам с использованием лабораторного оборудования.

Исследования процесса анаэробной переработки проводили в мезофильном режиме при температуре 306...308К. Для исследования процесса теплообмена при сбраживании была смонтирована экспериментальная установка с барботажным перемешивающим устройством.

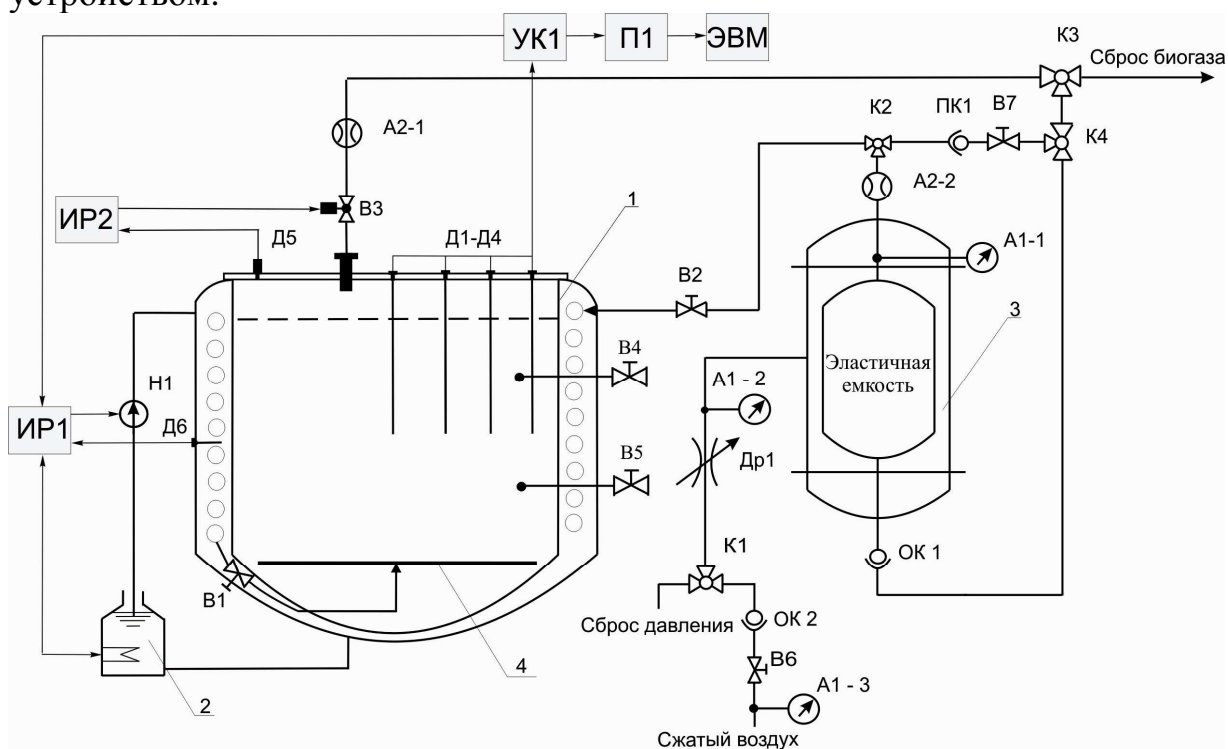


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2), состоящая из биореактора 1, водонагревательного котла 2 для задания и поддержания требуемой температуры в реакторе, с автоматическим регулированием количества выделяемого тепла, газгольдера 3 для сбора, хранения и нагнетания давления биогаза для перемешивания, барботажного перемешивающего устройства 4, позволяет оценивать все параметры получаемого теплообмена на всех этапах переработки, а так же контролировать микробиологические параметры.

Определение свойств сбраживаемого субстрата, оптимальных режимов и параметров барботажного перемешивания и анаэробной переработки производились с использованием математической теории планирования эксперимента.

Доверительная вероятность при оценке моделей принята 95 %. Значимость отдельных коэффициентов регрессии производилась независимо, с помощью критерия Стьюдента. Для проверки гипотезы об адекватности моделей использовали критерий Фишера.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» в соответствии с поставленными задачами исследованы теплообмен и биохимические характеристики в биореакторе в процессе барботажного перемешивания.

На первом этапе экспериментальных исследований определены кинематическая вязкость и поверхностное натяжение сбрасываемого субстрата в зависимости от температуры и концентрации сухого вещества.

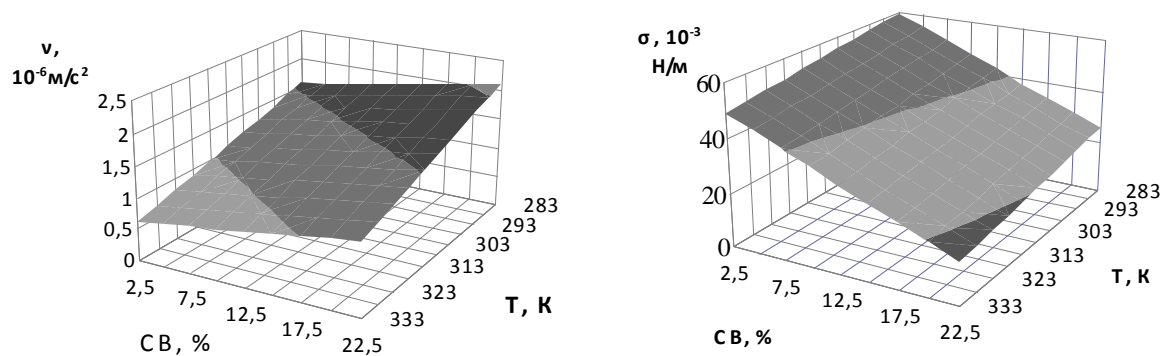


Рисунок 3. Зависимость кинематической вязкости и поверхностного натяжения от температуры и содержания сухого вещества.

Поверхности отклика показывают (Рис. 3), что оба параметра зависят как от содержания сухого вещества (СВ), так и от температуры (Т). Регрессионный анализ экспериментальных данных позволил получить эмпирические формулы для определения кинематической вязкости (ν) и поверхностного натяжения (σ):

$$\nu = 6,75 + 0,03 \cdot СВ - 0,02 \cdot T, \text{ м}^2/\text{с} \cdot 10^{-6} \quad (13)$$

$$\sigma = 119,96 - 1,69 \cdot СВ - 0,02 \cdot T, \text{ Н/м} \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

Для определения распространения теплоты в стационарных условиях и определения температурной неоднородности сбрасываемого субстрата, в следствии коллоидно-полидисперсионного состава среды, на втором этапе экспериментальных исследований были проведены измерения температуры на разных расстояниях от стенки поверхности нагрева при свободном распространении теплоты.

В результате относительная стабилизация температур происходит на расстоянии 65-85 мм при содержании СВ 8 %. Наблюдается значительный температурный градиент 8...10 К между теплообменной рубашкой и сбрасываемым субстратом. Причем, основной перепад температур наблюдается в пределах этого теплового пограничного слоя. Внутри объема сбрасывания происходит выравнивание температуры и она приобретает однородность. При увеличении содержания СВ до 18% в

сбраживаемом субстрате тепловой пограничный слой увеличивается до 0,24м.

Для описания процесса распространения теплоты в объеме сбраживаемого субстрата без перемешивания, ввиду наличия высокого теплового пограничного слоя, использовалось критериальное уравнение, учитывающее различия полей температур, вязкости и толщины пограничного слоя при нагревании. Проведенные исследования и использование пакета статистической обработки данных STATISTICA 6.0 для регрессионного анализа эксперимента позволили получить уравнение, описывающее процесс распространения теплоты в сбраживаемом субстрате от теплообменной стенки биореактора для геометрически подобных реакторов:

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr_{жс} \cdot Pr_{жс})^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c}\right)^{0,25} \quad (15)$$

Анализ показывает, что при высокой концентрации СВ (>10%) теплообмен происходит в ограниченном пространстве и силы внутреннего взаимодействия частиц сбраживаемого субстрата уравнивают подъемную силу свободного движения вблизи поверхности теплоносителя. Передача теплоты естественной конвекцией в сбраживаемом субстрате, в пределах теплового пограничного слоя затрудняется, и распространение теплоты происходит теплопроводностью. При этом, $\alpha=32$ Вт/м²·К, максимальный выход биогаза составил 0,4 м³ с кг СОВ при концентрации СВ в сбраживаемом субстрате 13%.

Для выявления влияния барботажного перемешивания на интенсификацию теплообмена в биореакторе на третьем этапе рассмотрены процессы вынужденного движения и исследована интенсивность теплообмена между горизонтальным цилиндром и средой – для геометрически подобных реакторов.

Выявлено, что наиболее интенсивное перемешивание происходит при скорости движения среды близкой к максимально допустимой – 0,4 м/с. При барботажном перемешивании сбраживаемой среды с указанной выше скоростью, после 120-140 секунд перемешивания достигается требуемая температурная однородность, соответствующая технологическим требованиям процесса сбраживания.

Экспериментальные данные обрабатывались согласно полученному критериальному уравнению (8). Для инженерных расчетов трубчатых биореакторов с системой барботажного перемешивания получено рабочее уравнение, учитывающее влияние технологических параметров системы на коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = 0,36 \cdot U^{0,67} \cdot \mu^{-0,2} \cdot c^{0,33} \cdot \lambda^{0,67} \cdot \rho^{0,67} \cdot n^{-1,5} \cdot d^{-0,83} \cdot D^{0,5} \cdot \mu_c^{-0,14} \quad (16)$$

При этом, $\alpha=85$ Вт/м²·К, максимальный перепад температуры 2 К, при концентрации СВ в сбраживаемом субстрате 13%.

С целью выявления положительного эффекта от барботажного

перемешивая на процесс анаэробной переработки органических отходов животноводства, в работе были проведены комплексные исследования его технологических параметров.

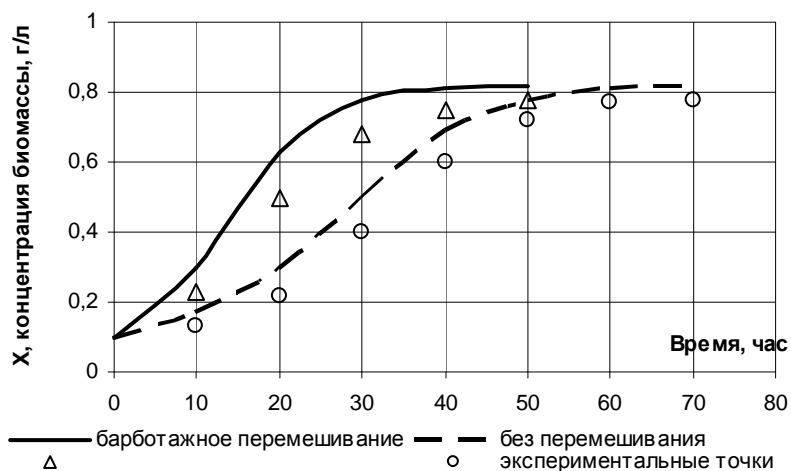


Рисунок 4. Изменение концентрации биомассы X в зависимости от продолжительности сбраживания

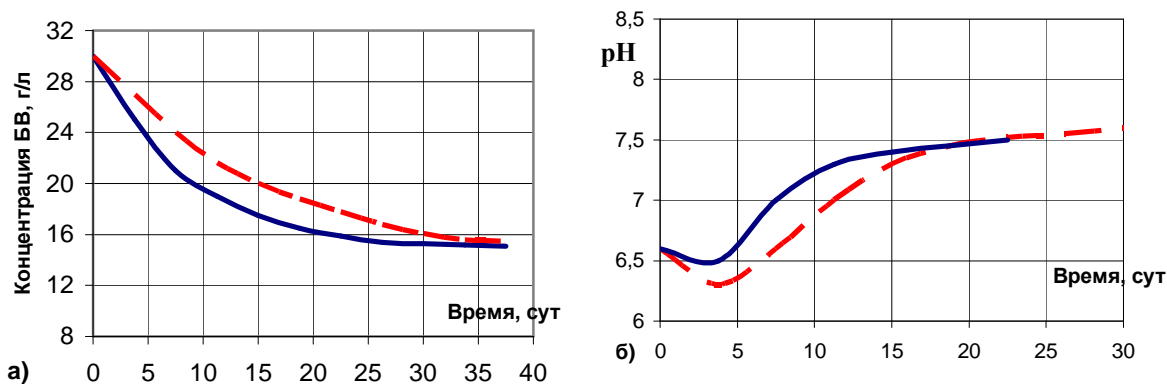
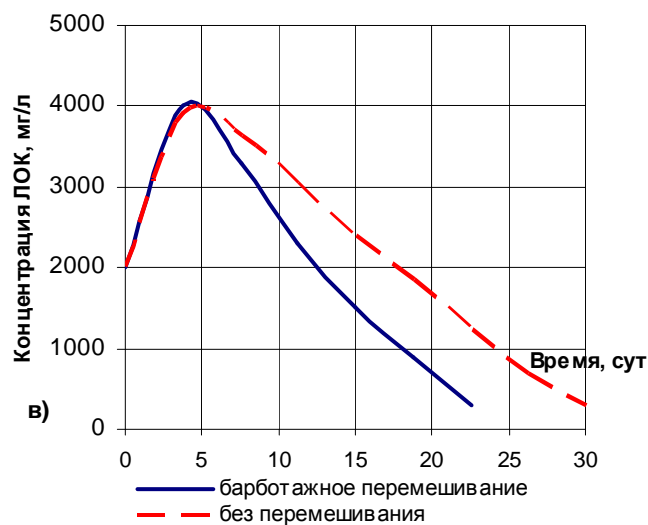


Рисунок 5. Влияние наличия барботажного перемешивания в процессе анаэробной переработки органических отходов животноводства на

- концентрацию беззольного вещества
- pH среды
- концентрацию летучих органических кислот



При отсутствии перемешивания процесса развивается по модели ингибирования Андреу, а процесс барботажного перемешивания позволяет сбраживаемой среде приближать развитие культуральной среды по модели

Моно (Рис. 4). Наращивание максимальной концентрации биомассы до 0,8г/л при этом ускорилось на 20 часов по сравнению со стационарным режимом сбраживания.

Для оценки эффективности применения барботажного перемешивания определялась концентрация беззольного вещества, концентрация летучих органических кислот, рН среды в сбраживаемом субстрате (Рис 5).

Снижение концентрации беззольного вещества до уровня в 16 г/л, для сбраживания с барботажным перемешиванием составило 22 дня, без перемешивания – 30 дней, дальнейшее проведение процесса является нецелесообразным, поскольку значительного снижения концентрации не происходит. Оптимальный рост метаногенных бактерий происходит при рН = 7 (в диапазоне значений 6,8 -7,2). На рост же кислотообразующих бактерий, как показывает концентрация летучих органических кислот, рН-среды влияет сравнительно мало.

Таким образом, при оптимальном режиме сбраживания и однородном температурном поле, в результате применения барботажного перемешивания, удельный выход биогаза с 1 кг СОВ составил 0,75 м³, а период сбраживания снизился на 25 %.

На основании полученных данных разработана комплексная технологическая линия для анаэробной переработки органических отходов животноводства с получением качественных продуктов в виде биогаза, идущего на получение электрической энергии и высококачественного органического удобрения. Данная технологическая линия, помимо получения прямых продуктов, позволяет решать задачи обеспечения охраны окружающей среды и санитарно-гигиенического благополучия животноводческого комплекса.

В пятой главе «Технико-экономическая эффективность выполненных исследований» приведена методика расчета системы анаэробной переработки органических отходов животноводства и определена ее эффективность.

В основу расчета экономической эффективности положен принцип сравнения биогазовой установки с барботажным перемешивающим устройством и без него. Эффективность применения новой технологической линии по переработке органических отходов составила 181,1 тыс. руб/год, срок окупаемости 1,4 г. При этом обеспечивается полное уничтожение семян сорных трав, обеззараживание и улучшение экологической обстановки в районе животноводческой фермы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментально изучены и определены кинематическая вязкость и поверхностное натяжение субстрата на основе органических отходов животноводства, которые могут быть использованы в качестве справочных характеристик при расчетах использования процесса барботажного перемешивания в анаэробных биореакторах.

2. Разработана конструкция биореактора с барботажным перемешиванием, позволяющая интенсифицировать процесс анаэробной переработки органических отходов животноводства: свести к минимуму температурную неоднородность и отводить ингибирующие продукты жизнедеятельности бактерий.

3. Разработанная математическая модель процессов теплообмена и ингибирования биологической активности в анаэробно сброживаемом субстрате на основе органических отходов животноводства, а так же энергобаланс биогазовой установки на базе биореактора с барботажным перемешиванием позволяют производить расчеты технико-технологических параметров системы.

4. Экспериментальные исследования биореактора с барботажным перемешиванием по переработке органических отходов животноводства показали адекватность полученной математической модели и достоверность полученных результатов. Выявлено, что процесс барботажного перемешивания при анаэробной переработке позволяет снизить ингибирующее действие летучих органических кислот и ускорить снижение концентрации беззольного вещества на 25 %, удельный выход биогаза в мезофильном режиме с 1 кг СОВ составил 0,75 м³.

5. Разработана методика инженерного расчета биореактора с системой барботажного перемешивания, позволяющая производить расчеты его конструктивно-технологических параметров.

6. Разработана технологическая линия по ускоренной анаэробной переработке органических отходов животноводства, с применением вертикального биореактора с барботажным перемешивающим устройством, основные принципы которой и ее конструктивного исполнения защищены патентом РФ.

7. Результаты производственных испытаний системы переработки органических отходов животноводческого комплекса КРС ОАО «Тепличное» Республики Марий Эл подтвердили ее работоспособность при применении биореактора с барботажным перемешиванием. Годовой экономический эффект по приведенным затратам – 181,1 тыс. руб, срок окупаемости – 1,4 года.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах (курсивом выделены работы опубликованные в изданиях перечня ВАК):

1. Костромин, Д. В. Совершенствование технологического процесса метанового сбраживания в биоэнергетических установках / Д. В. Костромин, Д. Н. Шамшуров // Перспективы развития инноваций в биологии: материалы науч.-практ. конф. в рамках междунар. науч.-образоват. школы-конференции по биоинженерии и приложениям (23 ноября 2007 года, г. Москва) / МГУ им. М. В. Ломоносова, биолог. фак. – М.: Инноватика, 2007. – С. 42-43. (0,1 п.л./0,05 п.л.).

2. Сидыганов, Ю. Н. Барботажное перемешивание в биореакторах анаэробного сбраживания / Ю. Н. Сидыганов, Д. Н. Шамшуров, Д. В. Костромин // Национальные приоритеты развития России: образование, наука, инновации: сб. тез. выступлений участников программы (3 – 6 марта 2008 года, г. Москва). – М., 2008. – С. 218-219. (0,06 п.л./0,02 п.л.).

3. Сидыганов, Ю. Н. Анаэробная переработка отходов для получения биогаза / Ю. Н. Сидыганов, Д. Н. Шамшуров, Д. В. Костромин // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 2008. – № 6. – С. 42-43. (0,34 п.л./0,2 п.л.).

4. Костромин, Д. В. Моделирование теплообмена сбраживаемого субстрата в условиях барботажного перемешивания / Д. В. Костромин // Наука в условиях современности: сб. ст. проф.-преп. сост., докторантов и асп. МарГТУ по итогам науч.-техн. конф. в 2009 г. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – С. 70-73. (0,25 п.л./0,25 п.л.).

5. Костромин, Д. В. Тепловой баланс биореактора с применением барботажного перемешивания / Д. В. Костромин // Наука в условиях современности: сб. ст. проф.-преп. сост., докторантов и асп. МарГТУ по итогам науч.-техн. конф. в 2009 г. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – С. 74-77. (0,25 п.л./0,25 п.л.).

6. Патент на полезную модель № 88989. Устройство для перемешивания субстрата для анаэробных биореакторных комплексов / Д. В. Костромин, Ю. Н. Сидыганов, А. В. Канарский, Д. Н. Шамшуров.

7. Патент на полезную модель № 81961. Система комплексной переработки органических отходов / Е. М. Романов, Ю. Н. Сидыганов, Д. В. Костромин.

8. Положительное решение о выдаче патента на полезную модель. Система глубокой переработки органических отходов / Д. В. Костромин, Ю. Н. Сидыганов, А. В. Канарский, Д. Н. Шамшуров. – № 2009143550 от 24.11.2009 г.

Подписано в печать 27.01.2010.

Тираж 100 экз. Заказ № 4287

Редакционно-издательский центр
Марийского государственного технического университета
424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17