На правах рукописи

ТАХАНОВ МИХАИЛ ПУРБАЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗА В МЕТАНТЕНКАХ ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОВОЗМУЩЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КИСЛОТНОСТИ СБРАЖИВАЕМОЙ СРЕДЫ

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Якутск – 2025г.

Работа выполнена в Федеральном государственном
автономном образовательном учреждении высшего образования
«Северо – Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (СВФУ)

Научный руководитель	доктор технических наук, доцент **Петров Николай Вадимович**
Официальные оппоненты:	**Бондаренко Анатолий Михайлович,** доктор технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт-филиал ФГБОУ ВО "Донской государственный аграрный университет" в г. Зерограде. **Бадмаев Юрий Цырендоржиевич,** кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В. Р. Филиппова".
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино – Балкарский государственный аграрный университет имени М.В. Комкова»

Защита состоится «25» декабря 2025 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.211.01 созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук по адресу: 630501, Новосибирская обл. Новосибирский район, р. п. Краснообск, ул. Центральная, зд. 7, а/я 463, телефон (факс): +7(383)348-12-09, e-mail: sibime@sfsca.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеки, автореферат и диссертация размещены на сайтах: https://www.sfsca.ru, https://vak.minobrnauki.gov.ru.

Отзыв на автореферат, оформленный установленным порядком просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета и e-mail: ds24121101@sfsca.ru.

Автореферат разослан «_ _ _» _ _ _ _ _ _2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н, доцент — Иванников Алексей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Анаэробная утилизация свиного навоза проводится с помощью применения различных метантенков – они могут быть в виде цилиндрических или прямоугольных резервуаров, а также могут содержать в рабочем реакторе дополнительный биофильтр для накопления метаногенной микрофлоры. На наш взгляд, наиболее эффективны метантенки с биофильтрами. По сравнению с обычными метантенками процесс переработки отхода в них максимально ускоряется за счет удержания колонии метаногенов на поверхности биофильтра, которая возрастает в процессе сбраживания. Однако, проведенные исследования показали малую эффективность большинства имеющихся в настоящее время устройств, в связи с чем возникает необходимость модернизации метантенков с биофильтрами для интенсификации и повышения качества переработки свиного навоза анаэробным сбраживанием с целью получения органического удобрения и сопутствующего продукта в виде биогаза - альтернативного источника энергии.

Следует отметить, что в данное время недостаточно научных знаний о влиянии кислотно-щелочного баланса (*pH*) на кинетику процесса анаэробного сбраживания, в том числе, исследований по динамике изменения *pH* в процессе метаногенеза, а также по разработке эффективных методов контроля и регулирования кислотности в метантенках.

Таким образом, разработка модернизированной технологии анаэробного сбраживания, включающей контроль кислотности и управление гидровозмущением, позволяет значительно повысить эффективность переработки свиного навоза. Данная технология обеспечит стабильное производство биогаза как надежного альтернативного источника энергии и высококачественных органических удобрений, а также будет способствовать решению проблемы утилизации отходов сельскохозяйственных предприятий.

Степень разработанности темы. Вопросам анаэробного сбраживания навоза сельскохозяйственных животных посвящены работы Баадера В., Бадмаева Ю.Ц., Бондаренко А.М., Васильевой А.С., Васильева Ф.А., Велькина В.И., Друзьяновой В.П., Евтеева В.К., Ильина С.Н., Имад Саад Саиед Белаля, Караевой Ю.В., Катраевой И.В., Ковалева А.А., Литти Ю.В., Петрова Н.В., Просвирнина В.Ю., Савватеевой И.А., Семеновой О.П., Фиапшева А.Г., и других авторов.

Исследования по вопросам влияния кислотно-щелочного баланса (*pH*) на кинетику процесса отражены в работах Горленко В.А., Егоровой Т.А., Andrews J.F, Batstoone D.J. и других авторов.

Цель работы. Повышение эффективности анаэробной переработки свиного навоза в метантенках с биофильтром путем применения дополнительного устройства гидровозмущения и системы автоматической электронной регулировки кислотности сбраживаемой массы.

В соответствии с целью работы поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Провести анализ метантенков с биофильтрами и обосновать способ утилизации свиного навоза.

2. Разработать математическую модель и модернизированную конструкцию метантенка с биофильтром, учитывающие зависимость максимального выхода биогаза от усилия гидровозмущения, скорости сбраживания и кислотности субстрата.

3. Произвести испытание экспериментального метантенка и выполнить экономическую оценку предлагаемого способа утилизации свиного навоза.

Объект исследования. Анаэробный способ утилизации свиного навоза путем применения метантенка с биофильтром для получения органического удобрения и попутного продукта в виде биогаза.

Предмет исследования. Закономерности интенсификации процессов перемешивания

сбраживаемого субстрата в метантенке с биофильтром; влияние кислотности сбраживаемой среды на эффективность процесса переработки отхода.

Научная гипотеза – повышение эффективности процесса переработки свиного навоза в метантенке возможно путем применения гидровозмущения и автоматической электронной регулировки кислотности сбраживаемой среды.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования является применение системного подхода к объекту исследования в качестве целостного комплекса теоретических и экспериментальных результатов с использованием теории подобия и планирования экспериментов, методов экспериментального исследования, математического программирования и имитационного моделирования. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась с помощью ЭВМ, программ Excel, CurveExpert Professional, MathCAD, MS Visio, а также языка программирования Python.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель, описывающая процесс переработки свиного навоза в метантенке с биофильтром с учетом параметров создаваемого гидровозмущения, скорости сбраживания, величины кислотности сбраживаемого субстрата, влияющих на максимальный выход биогаза.

2. Новый способ утилизации свиного навоза, основанный на автоматизированном контроле кислотно-щелочного баланса pH сбраживаемого отхода и оптимизации его гидродинамических параметров, обеспечивающий эффективность переработки с увеличением выхода биогаза на 25-30 % по сравнению с известными методами.

Новизна технических решений защищена 1 патентом на изобретение, 1 свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Теоретическая значимость работы:

1. Разработана математическая модель процесса анаэробной утилизации свиного навоза, позволяющая устанавливать закономерности влияния pH на кинетику процесса сбраживания, выраженную через коэффициент скорости сбраживания $k_{br}(pH)$ и функцию активности микроорганизмов $f(pH)$. Модель учитывает, как процесс ингибирования метаболической активности при отклонении pH от оптимального значения, так и асимметричность влияния кислой и щелочной сред, что позволяет более точно прогнозировать производительность метантенка с биофильтром.

2. Предложена методика расчета коэффициента эффективности гидровозмущения η, который количественно описывает влияние процесса перемешивания субстрата на скорость сбраживания, что обеспечивает достижение точности при применении модели и ее адекватную адаптацию к реальным условиям эксплуатации метантенков.

3. Разработан способ регулирования подачи субстрата в зависимости от текущего значения pH, включающий коэффициент коррекции $\alpha(pH)$. Данный способ позволяет предотвратить закисание субстрата в метантенке при низких значениях pH и оптимизировать производительность метантенка в рабочем диапазоне кислотности среды.

4. Обоснован и рассчитан тепловой баланс предложенной системы переработки навоза.

Практическая значимость работы:

- операторам и инженерам биогазовых установок: разработанная математическая модель позволит оптимизировать процесс сбраживания, регулируя кислотность среды pH, скорость подачи субстрата и интенсивность гидровозмущения, что повышает выход биогаза и снижает риск закисания субстрата в метантенке;

- сельскохозяйственным предприятиям: результаты работы позволят эффективно утилизировать органические отходы в качественное удобрение и биогаз, снижая затраты на переработку и получая дополнительный источник энергии;

- научным и образовательным учреждениям: материалы исследования могут быть

включены в учебные программы по биотехнологии, возобновляемой энергетике и экологии для подготовки специалистов.

Реализация результатов исследования. Результаты исследований докладывались на региональных уровнях и одобрены ученым советом Автодорожного факультета СВФУ им. М.К. Аммосова, Инженерным факультетом ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет». Практическое внедрение предложенных разработок осуществлено в период с 2017 по 2025 годы в СХПК «Усольский свинокомплекс», СХАО «Белореченское» и ИП КФХ «Ботоев». Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», СВФУ им. М.К. Аммосова при обучении студентов по направлениям подготовки «Агроинженерия», «Наземные транспортно-технологические средства» и «Эксплуатация транспортно-технологических машин комплексов».

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель анаэробного сбраживания в метантенке с дополнительным устройством гидровозмущения и электронной системой управления загрузкой свежей массы в зависимости от кислотности среды;

- модернизированный анаэробный способ переработки свиного навоза.

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением расчетных данных с результатами экспериментальных исследований, использованием пакетов прикладных программ при анализе опытных данных, а также положительной апробацией разработанных технических средств в эксплуатационных условиях.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на: международной научно – практической конференции молодых ученых, посвященной 80-летию образования ИрГСХА (Иркутск, 2014); региональной студенческой научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию со Дня рождения А.А. Ежевского (Иркутск, 2015); международной научно-практической конференции Иркутского ГАУ, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Хуснидинова Ш.К. (Иркутск, 2016); международной научно – практической конференции молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (Иркутск 2016, 2017, 2019, 2020); ежегодной научной конференции преподавателей, научных работников и аспирантов ВСГУТУ (Улан-Удэ, 2016, 2017); международной научно-практической конференции «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии» ИрГСХА (Иркутск, 2016, 2017, 2022); во II этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений МСХ РФ по Сибирскому федеральному округу в номинации: «Технические науки» (Красноярск, 2017); VIII национальной научно – практической конференции с международным участием «Чтения И.П. Терских», посвященной 85-летию Иркутского ГАУ (Иркутск, 2019); X Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Терских Ивана Петровича «Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК» (Иркутск, 2022); международной научно – практической конференции посвященной 85-летию профессора Кривко Н.П. (п. Персиановский, 2022); Всероссийской научно-практической конференции «Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития» (Благовещенск, 2023); Международной межвузовской научно – технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова (Москва, 2024).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 5

публикаций из перечня ВАК, получен 1 патент на изобретение; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы, приложений. Полный объем работы содержит 142 страницы машинописного текста, в том числе 35 рисунков и 28 таблиц, список использованных источников состоит из 185 наименований на 19 страницах.

Диссертационная работа была начата в ФГБОУ ВО ИрГАУ и завершена в ФГАОУ ВО СВФУ им. М.К. Аммосова. В СВФУ исследования проведены в соответствии с планом научно-исследовательской работы в рамках отраслевой программы «Применение альтернативного топлива из отходов в промышленном производстве на 2022-2030 годы» (госрегистрация № 16042п-П11 от 28 декабря 2021 г.) и соответствует Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации п.20 б) «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы диссертационной работы, ее краткая характеристика, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе проведен анализ существующих способов утилизации свиного навоза анаэробным сбраживанием, рассмотрены способы применения биогазовых технологий. Обосновано, что наиболее эффективным из них является переработка в метантенках с биофильтрами - за счет удержания колонии метаногенов на поверхности биофильтров, количество бактерий в метантенке возрастает с течением процесса сбраживания, соответственно, процесс разложения органического отхода интенсифицируется. Однако, проведенные исследования показали малую эффективность большинства имеющихся в настоящее время устройств. В связи с этим, предлагается модернизировать способ анаэробной утилизации свиного навоза путем применения метантенка с биофильтром, имеющим дополнительное устройство для создания гидровозмущения и электронный блок управления кислотностью сбраживаемого субстрата (рис.1).



Рисунок 1 – Определение параметров предлагаемого метантенка с биофильтром: К1-отсутствие механизма перемешивания; К2-наличие механизма перемешивания; К3-отсутствие гидровозмущения; К4-наличие гидровозмущения; К5-отсутствие системы контроля pH; К6-наличие системы контроля pH и автоматической регулировки гидровозмущения

Основными факторами, влияющими на качество работы метантенков являются: состав сбраживаемого навоза, его влажность, рабочая температура сбраживания и уровень кислотности перерабатываемого субстрата. Анализ известных метантенков с биофильтрами позволил составить следующий вывод: производительность существующих устройств недостаточно высокая, отсутствуют метантенки с автоматической регулировкой *pH* среды сбраживаемого субстрата и недостаточно проработан вопрос эффективного перемешивания для равномерного распределения фазовых слоев. Таким образом, возникает необходимость интенсификации работы метантенков с биофильтрами для улучшения глубины переработки свиного навоза анаэробным сбраживанием, позволяющих производить максимальный объем биогаза. Биогаз – оценивает качество процесса переработки субстрата.

Во второй главе приведены теоретические исследования по обоснованию способа утилизации свиного навоза. Предлагаемая схема нового способа утилизации свиного навоза имеет следующий вид (рис.2):

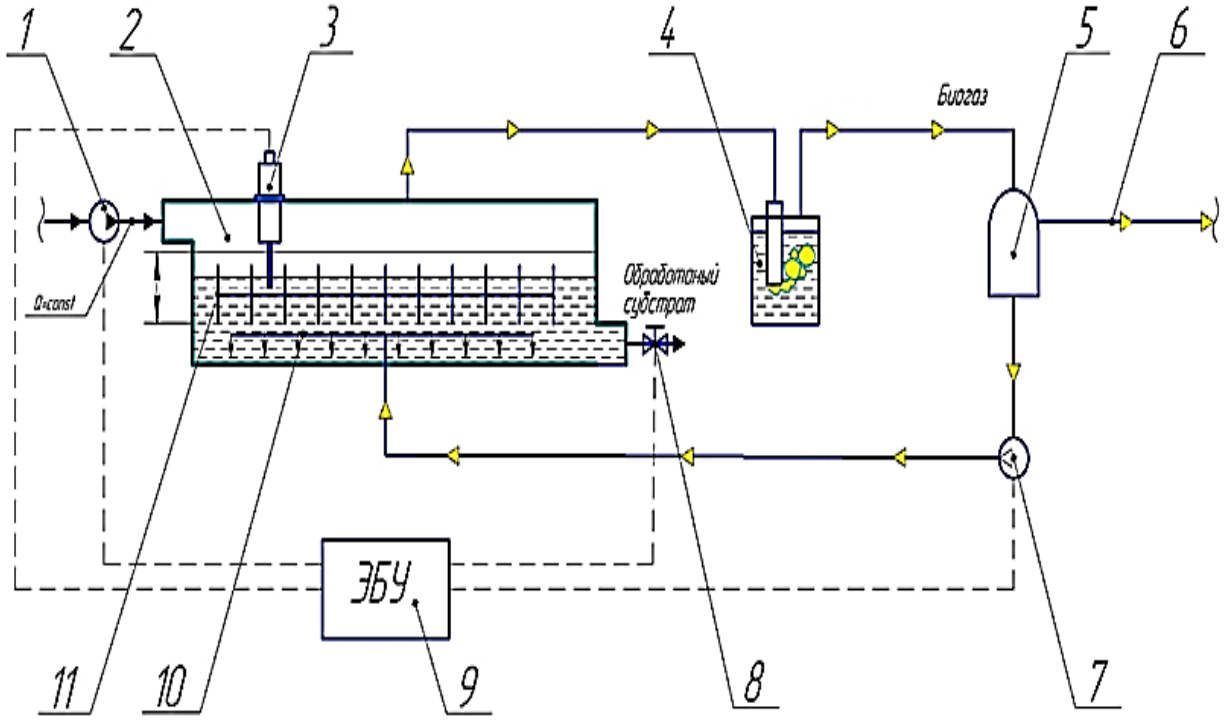


Рисунок 2 – Схема предлагаемого способа утилизации: 1 – жидкостный насос; 2 – реактор; 3 – *pH*-метр; 4 – гидравлический затвор; 5 – газгольдер; 6 – биогаз потребителю; 7 – газовый насос; 8 – сливной вентиль; 9 – ЭБУ; 10 – перфорированная труба; 11 – иммобилизатор

Свежий навоз насосом (6) подается в метантенк (1). Изменение кислотности субстрата фиксируются *pH*–метром (3), данные с которого передаются в ЭБУ(4). В свою очередь, ЭБУ осуществляется регулировка кислотности субстрата (уменьшение или повышение) путем управления гидровозмущением – подачей конкретного объема биогаза насосом (7) из газгольдера (5) в перфорированную трубу (2).

При этом, особое внимание уделяется исследованию влияния кислотно-щелочного баланса на активность метаногенных микроорганизмов. Установлено, что отклонения *pH* от оптимального значения (7,1) приводят к существенному снижению скорости образования биогаза, что необходимо учитывать при проектировании биогазовых установок.

Разработана методологическая база исследований (таблица 1):

Таблица 1 - Методологическая база исследований

Входные данные					
Характеристики субстрата: - Масса субстрата (m) – постоянная доза загрузки. - Содержание органического вещества (C) – доля органики в субстрате. - Удельный выход биогаза (Y) – объем биогаза, который можно получить из 1 кг субстрата.	**Условия процесса:** - Постоянная температура – учитывается через k_{br0}. - Текущее значение pH – влияет на $k_{br}(pH)$. - Оптимальное значение pH (pH_{opt}).	**Параметры гидровозмущение:** - Коэффициент эффективности (η) – учитывает влияние гидровозмущение на скорость сбраживания.			
Чёрный ящик					
Задачи:					
Математическая модель Скорость выделения биогаза описывается дифференциальным уравнением: $G(t) = f\left(G_{max}; k_{br}(pH); \eta; t\right)$ где: - (G_{max}) - максимальный объём биогаза, который может быть получен из данного субстрата ($м^3$), - ($k_{br}(pH)$) - коэффициент скорости сбраживания ($день^{-1}$), - η – коэффициент эффективности перемешивания ($\eta > 1$), - (t) – время (дни).	**Определение параметров:** - Максимальный объем биогаза (G_{max}): $G_{max} = f(m; C; Y)$ - Коэффициент скорости сбраживания $k_{br}(pH)$: $k_{br}(pH) = f(k_{br0}; \alpha(pH); f(pH); \frac{m}{m_0})$ - Коэффициент эффективности гидровозмущение η рассчитывается как отношение констант скорости сбраживания с гидровозмущением ($k_{br}^{с\ гидровозмущением}$) и без гидровозмущение ($k_{br}^{без\ гидровозмущение}$): $\eta = f\left(k^{с/ас}_{br}; k^{б/ас}_{br}\right)$	**Экспериментальная часть:** - Подготовка субстрата - Запуск процесса сбраживания - Измерение объёма биогаза	**Анализ данных:** - Построение графика $G(t)$ - Построение графика k_{br}	**Верификация модели:** - Сравнение теоретических и экспериментальных данных	**Оптимизация процесса:** - Анализ влияния условий на k_{br}
Выходные данные					
Объем выделенного биогаза $G(t)$ – результат расчетов					

Теоретический анализ базируется на детальном изучении процесса движения метаногенных микроорганизмов внутри метантенка. Ключевым параметром при этом является выход биогаза (G(t)), по которому определяется качество процесса анаэробной переработки отходов. В результате исследования научной литературы определены основные факторы: коэффициент скорости сбраживания; гидровозмущение; кислотность. Полнота переработки навоза в метантенке, основанная на действии указанных выше факторов, позволяет сформулировать три основных принципа процесса преобразования органического вещества (рис.3):

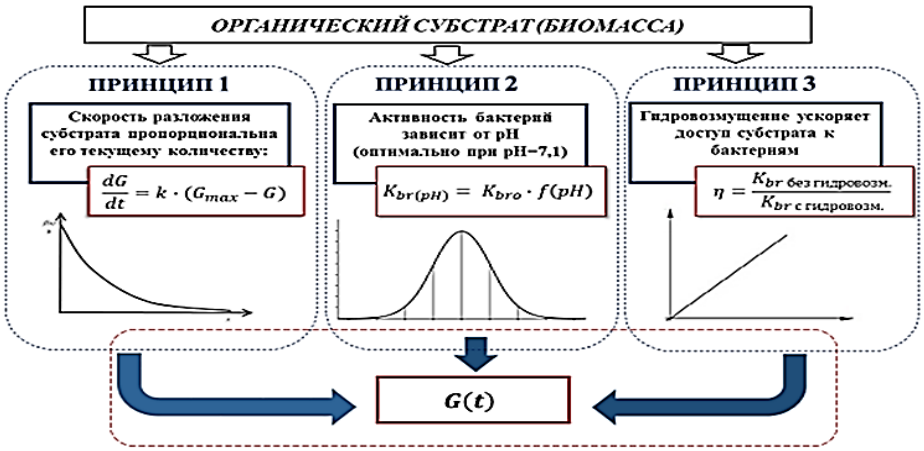


Рисунок 3 – Ключевые принципы для разработки математической модели

Математическое описание процесса анаэробного сбраживания в установке с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения осуществлено дифференциальной моделью, основанной на динамике накопления биогаза в метантенке. Исходное уравнение модели имеет следующий вид:

$$\frac{dG}{dt} = \eta \cdot k_{br}(pH) \cdot (G_{\max} - G(t)) \quad (1)$$

где, $G(t)$ - текущий объем биогаза, G_{max} - максимальный выход газа для конкретного типа субстрата, $k_{br}(pH)$ - pH-зависимый коэффициент скорости, η - коэффициент, учитывающий эффективность гидровозмущения субстрата. Значение $\eta=1,2$ было установлено в ходе серии предварительных экспериментов и подтверждает существенное влияние гидродинамики на интенсивность процесса.

Уравнение после интегрирования имеет вид:

$$G(t) = G_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\eta \cdot k_{br}(pH) \cdot t}\right) \quad (2)$$

Максимальный выход биогаза рассчитывается по формуле:

$$G_{\max} = m \cdot COB \cdot B_0 \quad (3)$$

где, m - масса субстрата (кг), COB - содержание органического вещества в субстрате (доля от 0 до 1), B_0 - удельный выход биогаза для данного типа органического вещества (м³/кг).

С учетом влияющих факторов уравнение коэффициента скорости сбраживания примет вид:

$$k_{br}\left(pH, \overline{m}\right) = k_{br0} \cdot \alpha(pH) \cdot f(pH) \cdot \frac{\overline{m}}{m_0} \quad (4)$$

где, (kbr_0) - коэффициент скорости при оптимальном pH (pH_{opt}), $\alpha(pH)$ – коэффициент коррекции скорости подачи субстрата, $f(pH)$ – функция, описывающая влияние pH на активность микроорганизмов, $\frac{\overline{m}}{m_0}$ - относительная скорость подачи субстрата.

Для теоретического обоснования коэффициента скорости при оптимальном pH (k_{br0}) воспользуемся формулой Т.А. Егоровой:

$$k_{br0} = \mu_{\max} \cdot Y \cdot \frac{1}{X_0} \quad (5)$$

где, Y – экономический коэффициент (кг биомассы/ кг субстрата, 0,2 кг), X_0 – начальная концентрация биомассы (для типовых биогазовых установок 1 кг/м^3), μ_{max}=0,12 сут$^{-1}$ (диапазон 0,08-0,15) для мезофильного режима.

Функцию активности метаногенов $f(pH)$ можно выразить следующей модифицированной зависимостью Andrews с оптимальным значением $pH=7,1$:

$$f(pH) = \exp\left[-\left(\frac{pH - pH_{opt}}{m}\right)^2\right] \quad (6)$$

где, $pH_{opt}=7,1$ – оптимальное значение pH, $m=0,225$ – эмпирический коэффициент, характеризующий ширину рабочего диапазона.

Коэффициент коррекции скорости подачи субстрата $\alpha(pH)$ является ключевым параметром в модели, связывающим динамику поступления свежего органического материала с текущим уровнем pH в метантенке. Без учета данного коэффициента математическое моделирование процессов анаэробного сбраживания теряет физико-химическую достоверность. Данные, полученные по модели ADM1 (Anaerobic Digestion Model) для упрощения расчетов аппроксимируем методом наименьших квадратов:

$$\begin{cases} 0, & pH \le 6,3 \\ \alpha(pH) = \dfrac{pH - 6,3}{0,225}, & 6,3 < pH < 7,1 \\ 1. & pH > 7,1 \end{cases} \quad (7)$$

Зависимость (7) позволяет составить следующие выводы:

1. При *pH<6,3* – полная остановка подачи для предотвращения закисания.

2. В рабочем диапазоне *6,3-7,1* – линейная зависимость обеспечивает плавное регулирование.

3. При *pH*≥7,1 – максимальная подача для достижения производительности.

Скорость подачи субстрата $\overline{m}(t)$ определяет нагрузку на биологическую систему, контролирует баланс между поступлением питательных веществ и их усвоением. Данный фактор необходимо учитывать для предотвращения перегрузки метантенка. Скорость подачи должна быть пропорциональной метаболической емкости системы, учитывать текущее состояние среды *pH* и обеспечивать устойчивость процесса. Эти требования реализуются через следующую зависимость:

$$\overline{m}(t) = \overline{m_0} \cdot \alpha(pH) \quad (8)$$

где, $\overline{m_0}$ - базовая скорость подачи (0,225 м^3/с), *α(pH)*- коэффициент коррекции (0<α≤1).

В рамках разработанной математической зависимости предлагается следующая система управления объемной скоростью подачи субстрата, основанная на мониторинге кислотно-щелочного баланса (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры управления скоростью подачи субстрата в метантенк

pH	Коэффициент *α(pH)*	Скорость подачи субстрата $\overline{m}(pH)$, м^3/с	Обоснование
≤6,3	0	0	Полная остановка подачи для исключения закисания
6,4	0,125	0,028	Линейное увеличение: $\alpha = \frac{6,4-6,3}{0,225} = 0,125$
6,5	0,25	0,056	$\alpha = \frac{6,5-6,3}{0,225} = 0,25$
6,6	0,375	0,084	$\alpha = \frac{6,6-6,3}{0,225} = 0,375$
6,7	0,5	0,112	$\alpha = \frac{6,7-6,3}{0,225} = 0,5$
6,8	0,625	0,14	$\alpha = \frac{6,8-6,3}{0,225} = 0,625$
6,9	0,75	0,168	$\alpha = \frac{6,9-6,3}{0,225} = 0,75$
7,0	0,875	0,196	$\alpha = \frac{7,0-6,3}{0,225} = 0,875$
≥7,1	1	0,225	Максимальная скорость подачи для достижения оптимальной производительности метантенка

Формула (8) позволяет существенно повысить эффективность работы метантенка за счет следующих ключевых показателей:

1) дозы загрузки свежего навоза, автоматически регулируемой в зависимости от кислотности субстрата;

2) увеличения производительности метантенка на 15-20% по сравнению с известными установками, определяемого интенсификацией образования биогаза.

Разработанная математическая модель (2) позволяет прогнозировать производительность метантенка и оптимизировать его параметры управлением значений уровня кислотности и созданием оптимального гидровозмущения субстрата.

В третьей главе изложена методика экспериментального исследования, проводившегося с целью верификации математической модели и оптимизации параметров процесса. Методика основана на поэтапном исследовании каждого фактора при фиксированных параметрах.

Экспериментальные исследования включают в себя следующие основные этапы:

1) запуск и выход на стационарный режим работы метантенка;

2) организация гидродинамических возмущений сбраживаемого потока зависящих от параметров *pH* в процессе анаэробного сбраживания;

3) выгрузка обработанного субстрата для понижения уровня свободной поверхности сбраживаемого субстрата;

4) заполнение метантенка необходимой величиной загрузки исходной биомассы.

На кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» Автодорожного факультета Северо–Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова запущена экспериментальная биогазовая установка с биофильтром, содержащая систему контроля pH и автоматическую регулировку процесса гидровозмущения (рис. 4).

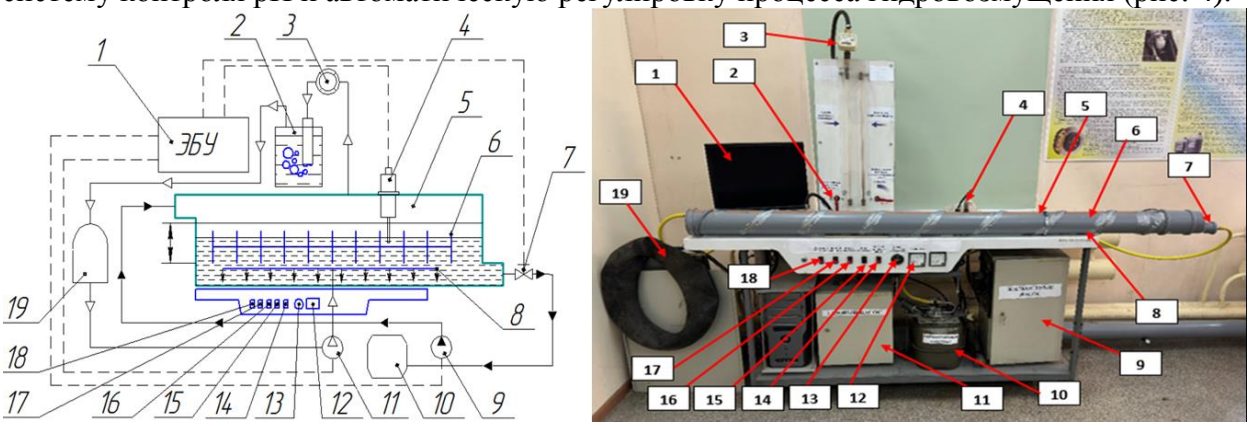


Рисунок 4 – Общий вид биогазовой установки: 1 – электронный блок управления; 2 – гидравлический затвор; 3 – газовый насос; 4 – pH датчик; 5 – метантенк; 6 – иммобилизатор; 7 – клапан слива; 8 – перфорированная труба; 9 – жидкостный насос; 10 – приемный резервуар; 11 – газовый насос; 12 – pH значение субстрата в метантенке; 13 – уровень субстрата в реакторе; 14 – кнопка подачи биогаза на гидровозмущение; 15 – кнопка слива субстрата из реактора; 16 – кнопка подачи субстрата в реактор; 17 – кнопка включения зажигания; 18 – масса; 19 – газгольдер

Сбраживаемый субстрат подается в метантенк(5) жидкостным насосом Fletxcom TZ-01 (9). В метантенке (5) имеется биофильтр, который служит уловителем микроорганизмов для удержания и увеличения колонии метаногенов. Для слежения за уровнем кислотности сбраживаемого субстрата в метантенке предусмотрен *pH*-метр (4) с функцией передачи сигнала на ЭБУ (1). В свою очередь, ЭБУ управляет подачей биогаза, создающего гидровозмущение. При этом, биогаз под давлением насоса JZ-HC01-10 (11) подается через перфорированную трубу (8), установленную в нижней части метантенка. Происходит интенсификация разложения отходов путем оптимизации процесса перемешивания субстрата. Объем выхода биогаза фиксируется с помощью газового счетчика СГБМ-1,6(3). Получаемый биогаз очищается при прохождении через гидрозатвор (2). Переработанный субстрат сливается через клапан (7) в приемный резервуар (10).

На рисунке 5 показана схема алгоритма коррекции регулировочных параметров процесса работы метантенка. Как видно из данного алгоритма, корректировка регулировочных параметров заключается в изменении показаний pH и гидровозмущений.

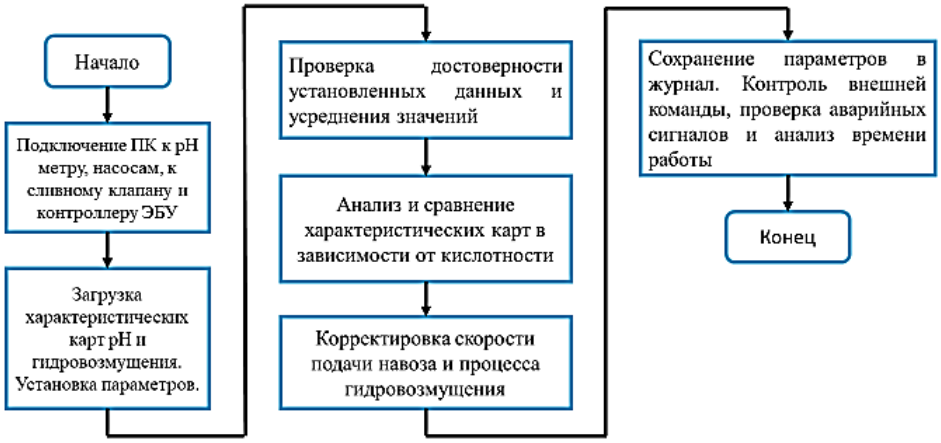


Рисунок 5 - Схема алгоритма корректировки параметров метантенка

По результатам теоретических исследований были определены оптимальные режимы работы биогазовой установки. Анализ полученных данных произведен с использованием пакета прикладных программ STATISTICA, MATLAB, MSOffice.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований.

Подтверждены теоретические результаты значений оптимального диапазона кислотности сбраживаемого субстрата – pH=6,8÷7,2. В ходе проведения исследований выявлены закономерности, демонстрирующие влияние уровня pH на качество процесса разложения отходов, определяемое объемом выхода биогаза (рис.6).

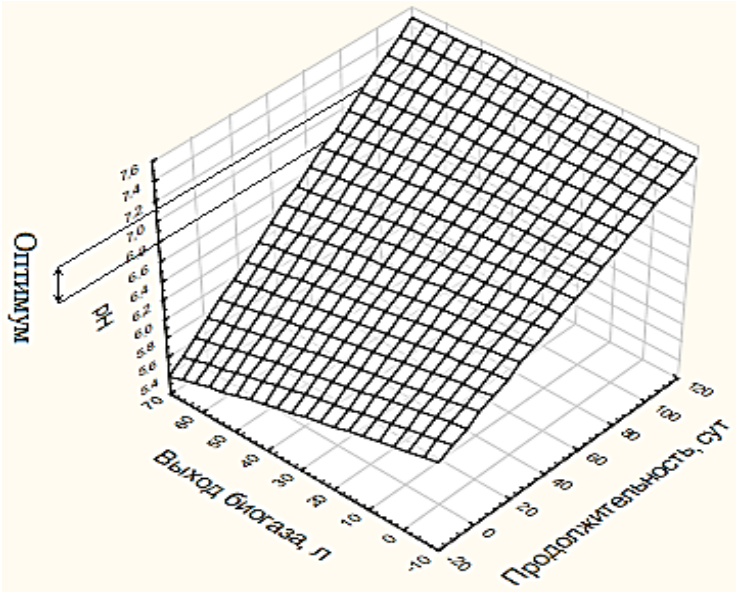


Рисунок 6 – Поверхность, описывающая зависимость суточного выхода биогаза от кислотности субстрата, pH (средние значения за 10 сут)

Максимальный выход биогаза получен при $pH=7,1$ (59,5 л/сут), что соответствует теоретическому прогнозу (61,9 л/сут). Погрешность значений не превышает 5%.

Определены и обоснованы значения объемной скорости подачи свежего навоза при различных режимах загрузки метантенка. Обосновано, что повышение объемной скорости подачи субстрата до 0,168 м^3/с способствует линейному росту выхода биогаза. При скорости 0,225 м^3/с система достигает устойчивого состояния с коэффициентом полезного действия 97,5%.

В таблице 3 представлен накопленный объем биогаза (в литрах) при различных скоростях подачи, когда pH = 7,1, η = 1,2.

Таблица 3 – Накопленный объем биогаза (л) при разных скоростях подачи (*pH=7,1, η=1,2*)

Объемная скорость подачи субстрата, $м^3/с$	Выход биогаза, л/сут										
	Сутки										Σ за 10 суток
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,028	1,2	2,5	4,8	7,9	12,1	17,3	23,6	31,2	40,1	50,5	191,2
0,056	2,5	5,1	9,8	15,8	23,2	32,1	42,7	55,0	69,3	85,7	341,2
0,084	3,8	7,7	14,7	23,7	34,3	46,9	61,8	78,8	98,5	120,9	491,1
0,112	5,0	10,2	19,6	31,6	45,4	61,7	80,9	102,6	127,7	156,1	640,8
0,14	6,3	12,8	24,5	39,5	56,5	76,5	100	126,4	156,9	191,3	790,7
0,168	7,5	15,3	29,4	47,4	67,6	91,3	119,1	150,2	186,1	226,5	940,4
0,196	8,8	17,9	34,3	55,3	78,7	106,1	138,2	174,0	215,3	261,7	1090,3
0,225	10,0	20,4	39,2	63,2	89,8	120,9	157,3	197,8	244,5	296,9	1240

Как отмечалось выше, полнота переработки отходов определяется объемом вырабатываемого биогаза и его качеством. В свою очередь, объем биогаза зависит от объемной скорости подачи субстрата в метантенк, когда управляющие процессом факторы находятся в следующих значениях - pH=7,1 и η=1,2 (рис.7).

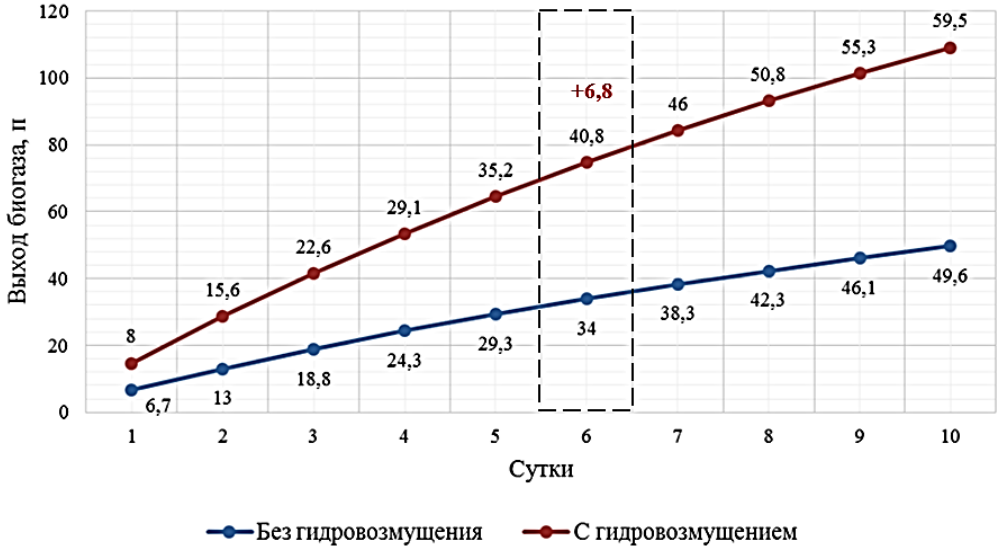


Рисунок 7 – Графики сравнения выхода биогаза с гидровозмущением и без гидровозмущения

В целях повышения эффективности гидродинамических воздействий проведены экспериментальные исследования без гидровозмущения (η=1,0) и с гидровозмущением (η=1,2) при равных условиях. Результаты показаны на рисунке 10 (при *pH*=7,1 и объемной скорости подачи субстрата 0,225 $м^3/с$).

Таким образом, эффект гидровозмущения максимально улучшает процесс массообмена, способствует равномерному распределению субстрата и предотвращает зону закисания в метантенке с биофильтром. Следовательно, подтверждена теоретическая зависимость скорости сбраживания от коэффициента гидровозмущения, *η=1,2*.

Выявлено, что при *pH*<6,3 происходит закисание субстрата и процесс прекращается. Диапазон кислотности *pH* = 6,3÷6,8 требует плавного увеличения объемной скорости подачи субстрата в метантенк для восстановления процесса сбраживания. Значение кислотности *pH*=6,8÷7,1 способствует установлению оптимального режима разложения отхода при максимальной объемной скорости подачи субстрата. При *pH*>7,1 процесс анаэробного разложения ухудшается, что вызывает снижение подачи свежего субстрата. На основе полученных данных и модели (2), предложена характеристическая карта управления процессом (таблиц 4).

Таблица 4 – Характеристическая карта автоматического управления процессом анаэробного сбраживания

pH	Объемная скорость подачи субстрата ($м^3/с$)	Гидровозмущение (%)	Статус	Формула коррекции
6,0	0,0	100	Аварийный останов.	V=0
6,1	0,0	100	Аварийный останов.	V=0
6,2	0,0	100	Аварийный останов.	V=0
6,3	0,056	80	Критический режим	V=0,056
6,4	0,064	75	Восстановление	V=0,056+0,1(pH-6,3)
6,5	0,073	70	Восстановление	*V=0,064+0,15(pH-6,5)*
6,6	0,098	65	Восстановление	*V=0,073+0,2(pH-6,5)*
6,7	0,123	60	Восстановление	*V=0,098+0,25(pH-6,6)*
6,8	0,168	50	Переходный режим	*V=0,123+0,3(pH-6,7)*
6,9	0,196	45	Оптимальный режим	*V=0,168+0,2(pH-6,8)*
7,0	0,225	40	Оптимальный режим	*V=0,225(максимум)*
7,1	0,225	40	Оптимальный режим	*V=0,225*
7,2	0,211	45	Щелочная коррекция	*V=0,225-0,1(pH-7,1)*
7,3	0,196	50	Щелочная коррекция	*V=0,211-0,15(pH-7,2)*
7,4	0,182	55	Щелочная коррекция	V=0,196-0,2(pH-7,3)
7,5	0,168	60	Щелочная коррекция	V=0,182-0,25(pH-7,4)

В результате проведения экспериментальных исследований отмечена высокая эффективность системы регулировки, что подтверждается следующими ключевыми показателями:

- время реакции системы составляет менее 1 мин;
- точность поддержания уровня *pH* варьируется в пределах ±2,5%;
- полное восстановление оптимальных условий происходит за 2 ч.

Адекватность математической модели оценена сравнительным анализом расчетных данных с экспериментальными (рис. 8-9).

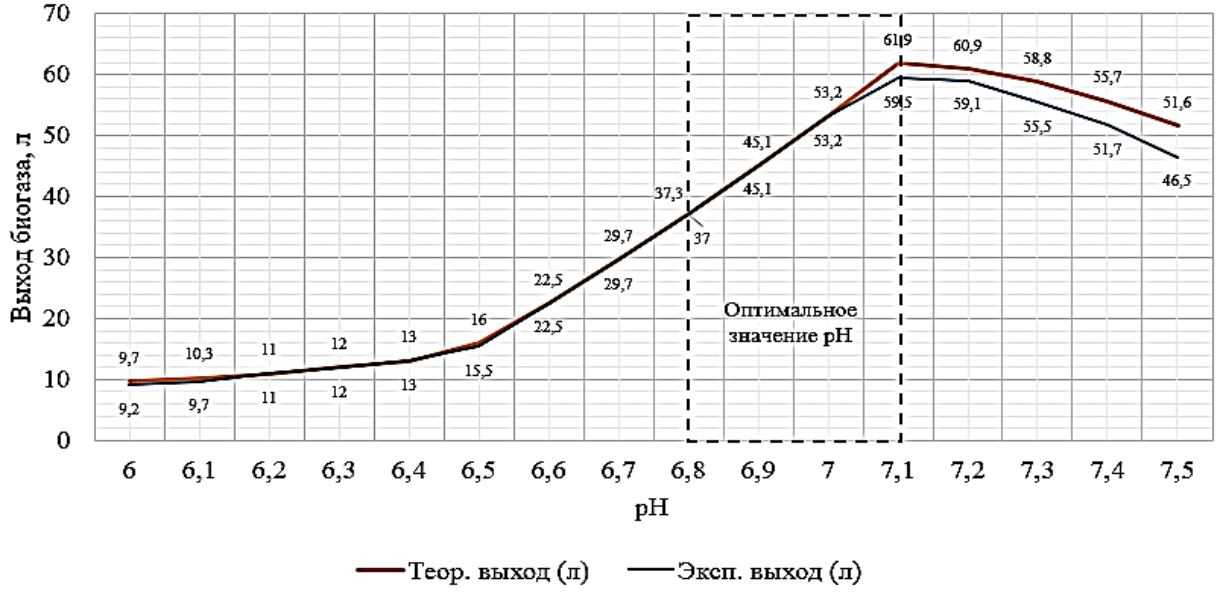


Рисунок 8 – Графики влияния кислотности *pH* на выход биогаза (10 сут)

Сравнительный анализ выхода биогаза в зависимости от *pH* показывает максимальное совпадение при *pH* 6,2–7,0 (отклонение ≤1%). На рисунке 9 показано влияние объемной скорости подачи субстрата на выход биогаза:

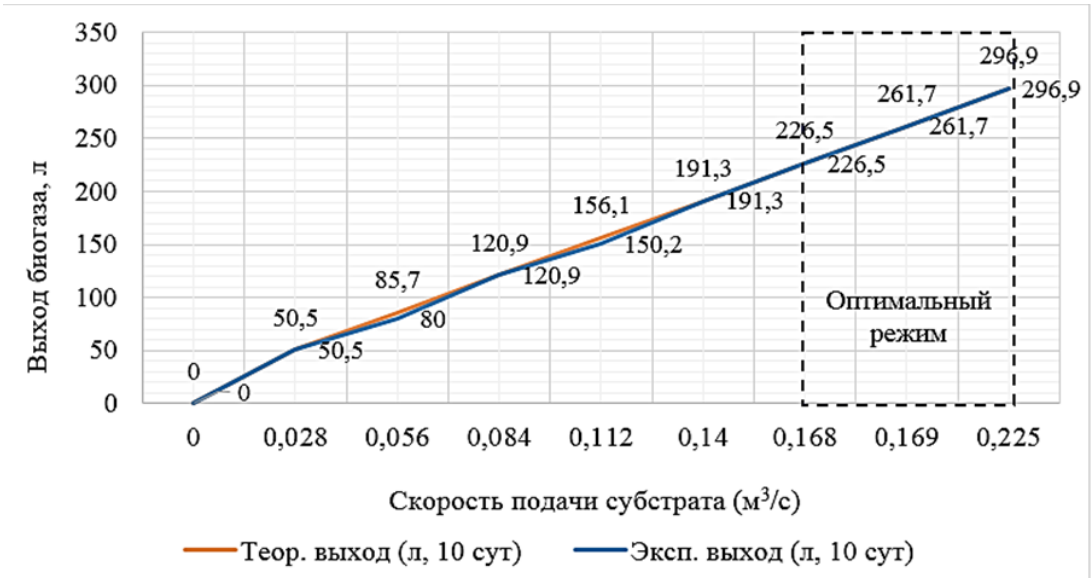


Рисунок 9 – Графики влияния объемных скоростей подачи субстрата (*pH*=7,1 и η=1,2)

Теоретические и экспериментальные результаты по выходу биогаза показали полное совпадение при значениях объемных скоростей подачи субстрата 0,056–0,225 м^3/с. Наблюдается допустимая погрешность (6,7%) при 0,028 м^3/с из-за нелинейности на малых скоростях.

На рисунке 10 показана эффективность гидровозмущения (η), при значениях *pH=7,1* и объемной скорости подачи субстрата 0,225 м^3/с.

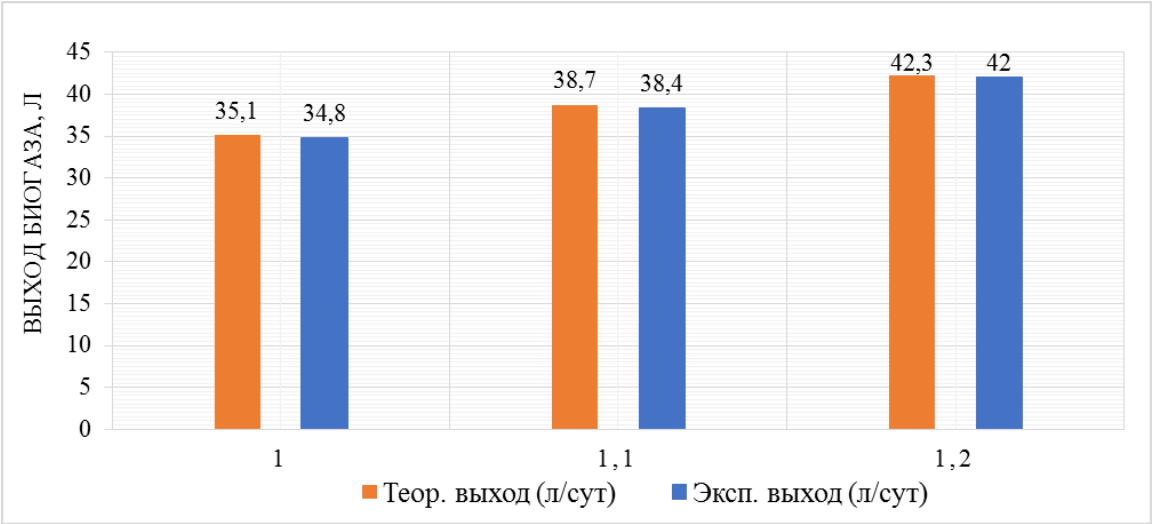


Рисунок 10 – Графики эффективности гидровозмущения

Теоретические и экспериментальные данные показывают линейный рост производительности с увеличением коэффициента гидровозмущения, η. Погрешность составляет ≤1% для всех значений.

В пятой главе выполнена оценка экономической эффективности внедрения биогазовой установки с анаэробным биофильтром для переработки навоза свинофермы на 110 голов (годовой объем 200,75 т), которая показала высокую результативность проекта.

Капитальные затраты на новую установку составили 274 600 руб., что превышает затраты базового варианта с лагунами (150 000 руб.). Однако, эксплуатационные затраты по новому варианту - 353 руб./т., существенно ниже, чем по базовому варианту – 1500 руб./т. Приведенные затраты на переработку единицы навоза сократились с 1612 руб./т до 558 руб./т.

Годовой экономический эффект от внедрения установки достигает 2 459 591 руб. и формируется за счет нескольких факторов: экономия на снижении затрат на переработку (211 591 руб.), доход от произведенного биогаза объемом 17,8 тыс. м³ (542 000 руб.) и от полученных биоудобрений объемом 180,7 т (1 606 000 руб.), а также экономия на утилизации отходов (100 000 руб.). Рассчитанный срок окупаемости капитальных вложений составляет не более 2-х лет, что свидетельствует о высокой экономической целесообразности и эффективности предлагаемого технического решения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе предложен новый способ утилизации, позволяющий повысить эффективность анаэробной переработки свиного навоза. Получены следующие научные и практические результаты:

1. Анализ существующих методов утилизации свиного навоза выявил существенные недостатки известных подходов, таких как компостирование и вывоз на поля. В ходе исследования установлено, что анаэробное сбраживание в метантенках оказывает более высокую эффективность, а также обеспечивает экологически безопасную утилизацию отходов, производство биогаза, как возобновляемого энергоносителя и получение высококачественных органических удобрений.

2. Обоснован способ утилизации свиного навоза, позволяющий повысить эффективность анаэробной переработки за счёт применения метантенка, оснащенного устройством гидровозмущения и системой контроля кислотности.

3. Разработана математическая модель процесса анаэробного сбраживания в модернизированном метантенке, описывающая образование биогаза в зависимости от коэффициента эффективности гидровозмущения (η=1,2), скорости сбраживания $k_{br}(pH)$ и кислотности субстрата pH=6,8-7,1 для достижения максимального выхода биогаза G_{max}. Верификация модели показала ее адекватность с погрешностью прогнозирования не более 10%.

4. Разработана конструкция экспериментального метантенка, обеспечивающая гидровозмущения для оптимального перемешивания субстрата и автоматизированную систему контроля кислотно-щелочного баланса в диапазоне pH 6,8-7,1. Подтверждено, что предложенная конструкция увеличивает выход биогаза на 15-20% по сравнению с известными аналогами.

5. Экспериментальные исследования на опытно-производственной установке подтвердили эффективность предложенных технических решений. Применение системы автоматического регулирования pH позволило поддерживать оптимальный кислотно-щелочной баланс (7,0) на протяжении всего цикла сбраживания. Введение контролируемого гидровозмущения с оптимальным коэффициентом эффективности η=1,2 способствовало сокращению продолжительности цикла сбраживания на 25% по сравнению с известными метантенками. Полученные экспериментальные данные полностью соответствуют результатам математического моделирования.

6. Выполнена экономическая оценка внедрения разработанного способа утилизации свиного навоза на примере хозяйства с поголовьем 110 животных. Годовой экономический эффект составляет 2 459 591 руб./год, который складывается из сокращения затрат на переработку отходов, замещения традиционных энергоносителей биогазом и

дополнительного дохода от реализации органических удобрений. Срок окупаемости капитальных затрат на модернизацию не превышает 2-х лет.

Рекомендации к производству

Результаты выполненных исследований рекомендуется внедрять в свиноводческие комплексы и фермы, применяющие гидравлические системы удавления навоза и заинтересованные в интенсификации утилизации производимого отхода энергосберегающим анаэробным способом.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективным направлением дальнейшей работы является разработка способа обезвоживания или усушки получаемой объемной массы жидкого удобрения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

а) публикаций в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Таханов М.П. Создание возмущений в метантенке / М.П. Таханов, Ф.А. Васильев // Вестник ИрГСХА. – 2017. – Вып. 80. – С. 143-148.

2. Таханов М.П. Применение углекислого газа в виде подкормки в защищенном грунте / М.П. Таханов, В.К. Евтеев, Ф.А. Васильев // Вестник ИрГСХА. – 2017. – Вып. 80. – С. 88-91.

3. Таханов М.П. Оценка инвестиций при внедрении технологии анаэробной переработки навозных стоков животноводческого комплекса / М.П. Таханов, Ф.А. Васильев, А.С. Васильева // Вестник ИрГСХА. 2017. № 81-1. С. 80-86

4. Таханов М.П. Повышение эффективности работы метантенка гидродинамическим возмущением сбраживаемого потока / М.П. Таханов, О. М. Осмонов // Вестник ДальГАУ, – 2023. – Том 17 – С. 120-127.

5. Таханов, М. П. Лабораторная установка для проведения экспериментов по анаэробному метановому сбраживанию / М. П. Таханов, Н. В. Петров // Дальневосточный аграрный вестник. – 2025. – Т. 19, № 2. – С. 134-141. – DOI 10.22450/1999-6837-2025-19-2-134-141

б) Публикации в других изданиях:

6. Таханов М.П. Классификация методов переработки навоза / М.П. Таханов, В.К. Евтеев // Материалы Междунар. Науч.- практ. Конф. Молодых ученых, посвящ. 80-летию образования ИрГСХА, научные исследования и разработки к внедрению в АПК (28-29 апр. 2014г.). – Иркутск, 2014. – С. 164-167

7. Таханов М.П. Классификация систем навозоудаления / Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: материалы регион. Студенч. науч.-практ. конф. с междунар. Участием, посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию со дня рождения А.А. Ежевского, (25-26 марта 2015г.): - Иркутск, 2015. – Ч. 3. – С. 223-227.

8. Таханов М.П. Установка для анаэробной переработки животноводческих стоков на крупных свиноводческих комплексах / М.П. Таханов, В.К. Евтеев // Актуальные проблемы биотехнологии и ветеринарной медицины. Материалы международной научно – практической конференции молодых ученых. 2017. С. 85-89.

9. Таханов М.П. Установка по метановому сбраживанию / М.П Таханов, В.К. Евтеев // Материалы VIII Национальной научно – практической конференции с международным участием «Чтения И.П. Терских», посвященной 85-летию Иркутского ГАУ. 2019. С. 82-86.

10. Таханов М.П. Метантенка с буферной емкостью / Таханов М.П. // В сборнике: Климат, экология, сельское хозяйство Евразии. Материалы XI Международной научно – практической конференции. п. Молодежный, 2022. С. 335-339.44

11. Таханов, М.П. Классификация методов переработки биомассы / М.П. Таханов, О.М. Осмонов // Материалы X Национальной научно - практической конференции с международным участием «Чтения И.П. Терских», посвящённой 90 - летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Терских Ивана Петровича «Актуальные вопросы инженерно - технического и технологического обеспечения АПК» (6 - 8 октября 2022 г.): - Иркутск, 2022 – С. 197 - 202.

12. Таханов, М.П. Установка по метановому сбраживанию / М.П. Таханов, О.М. Осмонов // Материалы X Национальной научно - практической конференции с международным участием «Чтения И.П. Терских», посвящённой 90 - летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Терских Ивана Петровича «Актуальные вопросы инженерно - технического и технологического обеспечения АПК» (6 - 8 октября 2022 г.): - Иркутск, 2022 – С. 202 - 205.

13. Таханов М.П. Модернизированная анаэробная технология переработки навозных стоков / М.П. Таханов, О.М. Осмонов // В сборнике: Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития. Материалы всероссийской научно – практической конференции. Благовещенск, 2023. С. 246-252.

14. Таханов М.П. Реинжиниринг биогазовой технологии организацией гидродинамических возмущений в метантенке / М.П. Таханов, О.М. Осмонов // В сборнике: Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов. Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.), посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова. Москва, 2024. С. 420-424.

в) патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и базы данных:

15. Таханов М.П. «Программа для численного прогнозирования потребности моторного биогаза для заправки машинно-тракторного парка сельскохозяйственных предприятий» Свидетельство о государственной регистрации ЭВМ «2022682143 от 18.11.2022г // Петров Н.В., Друзьянова В.П.

16. RU 2 678 673 C1 Владелец патента: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского» (RU) Автор: Таханов Михаил Пурбаевич (RU), начало действия: 2017.09.18, Публикация: 2019.01.30.