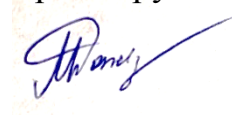


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Северо-Восточный федеральный университет имени
М.К. Аммосова"

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент Н.В. Петров

Якутск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ СВИНОГО НАВОЗА МЕТОДОМ АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ способов содержания животных и систем удаления свиного навоза в свиноводческих предприятиях	11
1.2 Виды и методы утилизации свиного навоза.....	19
1.3 Биогазовая технология органических отходов	29
1.4 Конструктивные особенности метантенков.....	34
1.5 Анализ существующих научных работ по моделированию процессов анаэробного сбраживания.....	39
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА	45
2.1 Методологическая база исследований	45
2.2 Математическая модель для анализа работы метантенка	49
2.3 Моделирование влияние кислотности-щелочного баланса (рН) на кинетику процесса.....	51
2.4 Анализ влияния режимов загрузки субстрата на производительность системы	55
2.5 Анализ гидродинамического воздействия в биогазовом реакторе.....	60
2.6 Теоретическая оценка эффективности анаэробного сбраживания свиного навоза с учетом энергетического баланса и гидродинамического воздействия	63
2.6.1 Энергетический баланс метантенка с учетом системы гидровозмущения	66
3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	72
3.1 Программа экспериментальных исследований	72
3.2 Выбор отклика, числа факторов и уровней варьирования.....	74
3.3 Методика проведения экспериментального исследования.....	77

3.4 Программа автоматической системы контроля метантенка	82
3.5 Приборы и оборудование.....	83
3.6 Оценка погрешностей, ошибок измерений и обработки результатов	86
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	90
4.1 Структурная схема экспериментального исследования.....	90
4.2 Экспериментальное исследование влияния pH на процесс метаногенеза	91
4.3 Исследование производительности систем при различных режимах загрузки.....	93
4.4 Экспериментальная оценка влияния гидродинамического возмущения ..	95
4.5 Экспериментальные данные по работе автоматической системы.....	96
4.6 Сравнительный анализ факторов с математической моделью и экспериментальными данными	99
5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В МЕТАНТЕНКЕ С АНАЭРОБНЫМ БИОФИЛЬТРОМ.....	105
5.1 Техничко-экономическое обоснование проекта и методика расчета экономической эффективности	105
5.2 Расчет капитальных и эксплуатационных затрат	106
5.3 Расчет годового экономического эффекта	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	132

ВВЕДЕНИЕ

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 диссертационного исследования.

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 Белал, 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 кислотности-щелочного баланса (рН) 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 сброживаемой 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 сброживания, величины кислотности сброживаемого субстрата, влияющих на максимальный выход биогаза.
2. Новый способ утилизации свиного навоза, основанный на автоматизированном контроле кислотно-щелочного баланса pH сброживаемого 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 сброживания, 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. Экспериментально обоснован подход, обеспечивающий 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. Ежовского (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 14 печатных работах, в том числе 5 публикации 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 им. А.А. Ежевского 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».

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ СВИНОГО НАВОЗА МЕТОДОМ АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ

1.1 Анализ способов содержания животных и систем удаления свиного навоза в свиноводческих предприятиях

В настоящее время на крупных свиноводческих фермах и комплексах широко используются гидравлические системы удаления навоза, где жидкие навозные стоки имеют низкое содержание органического вещества (не менее 5% при влажности выше 95%). Актуальными являются вопросы эффективной утилизации больших объемов жидких навозных стоков.

Выбор системы удаления навоза определяется производственным назначением и технологией содержания свиней (подстилочная и бесподстилочная) [43,44].

Гидравлические системы навозоудаления обычно применяются при бесподстилочном содержании животных на промышленных свиноводческих комплексах. В результате образуются большие объемы навозных стоков влажностью выше 95%, что значительно затрудняет их использование и переработку [43,136].

Уборка и транспортировка навоза из производственных помещений должна соответствовать определенному своду требований, направленных на обеспечение санитарно-гигиенической безопасности, минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и охрану здоровья персонала. Эти требования охватывают различные аспекты, начиная от методов сбора и заканчивая технологиями хранения и утилизации:

1) необходимо обеспечить систематичность и регулярность уборки. Скопление навоза в животноводческих помещениях приводит к повышению концентрации аммиака, сероводорода и других вредных газов, что негативно сказывается на здоровье животных и людей. Частота уборки определяется типом содержания животных, их физиологическим состоянием и

климатическими условиями. При этом, особое внимание уделяется участкам с наибольшим загрязнением, таким как места кормления и поения.

2) выбор метода уборки и транспортировки навоза должен учитывать экономическую целесообразность, экологическую безопасность и доступность необходимых ресурсов. Существуют различные системы: механизированные (скреперные, дельта-скреперные, транспортерные), гидравлические (самотечные, насосные) и комбинированные. При выборе системы необходимо учитывать размеры животноводческого комплекса, тип настила (подстилочный, бесподстилочный), а также возможность разделения навоза на жидкую и твердую фракции для дальнейшей переработки.

3) транспортировка навоза должна осуществляться в герметичных емкостях или по закрытым трубопроводам, чтобы предотвратить распространение запахов и загрязнение окружающей среды. Маршруты транспортировки должны быть проложены таким образом, чтобы минимизировать воздействие на жилые зоны и водные объекты. Важно обеспечить регулярную очистку и дезинфекцию транспортных средств, используемых для перевозки навоза.

4) необходимо обеспечить правильное хранение навоза до его утилизации. Для этого используются навозохранилища различных типов: открытые, закрытые, лагуны, силосные ямы. Местоположение навозохранилищ должно соответствовать санитарным нормам и правилам, с учетом геологических и гидрологических условий местности. Важно предотвратить попадание навозной жижи в почву и водные объекты. При хранении навоза необходимо обеспечить его аэрацию или анаэробную обработку, чтобы уменьшить выделение вредных газов и ускорить процесс разложения органического вещества. Системы удаления навоза классифицируются в зависимости от принципа действия на механические и гидравлические (рисунок 1.1).

Применение механического способа удаления свиного навоза является одним из самых распространенных на свинокомплексах с содержанием до 24

тыс. голов в год. Данный способ удаления навоза предполагает использование как стационарных, так и мобильных средств механизации. К стационарным относятся транспортеры (скребковые, штанговые, шнековые и т.д.) и скреперные установки возвратно-поступательного движения. Мобильные навозоуборочные средства – это бульдозеры различных типов и навесное оборудование.



Рисунок 1.1 – Системы удаления навоза из свиноводческих помещений

Основными достоинствами применения механических систем удаления навоза является их экономичность и получение навоза низкой влажности. В качестве недостатков данной системы удаления навоза можно отметить высокие металлоемкость и энергоемкость, невысокие показатели надежности, трудоемкость навозоуборочных работ, частота обслуживания и ремонта оборудования и т.д. Также механические системы удаления навоза недостаточно совершенны с точки зрения санитарно-гигиенических требований. Таким образом, использование механических систем наиболее целесообразно на небольших фермах и комплексах [43,44,48].

На крупных свиноводческих комплексах, с бесподстильным содержанием свиней часто используют гидравлические системы утилизации

навоза. К достоинствам этих систем относятся: незначительные трудозатраты на очистку помещений от отходов; повышенная прочность и продолжительный период эксплуатации оборудования; низкое потребление металла и энергии; соответствие нормам, применяемым к помещениям для содержания скота. Для удаления жидкого навоза из свинарников могут применяться разные виды гидравлических систем: с использованием принципа самотека и с непосредственным смывом водой.

Применение гидравлической системы для утилизации и транспортировки свиного навоза оправдано в определенных условиях. В частности, при реконструкции и расширении крупных свинокомплексов с годовым производством от 54 тысяч голов, когда другие методы удаления оказываются неэффективными. Транспортировка навоза из продольного канала свинарника обеспечивается за счет взаимодействия между потоком жидкости под давлением и массой навоза [44,101].

В системах удаления навоза, основанных на принципе самотека, различают два режима работы: периодическое и непрерывное удаление отходов. Системы, работающие в постоянном режиме и использующие самотек, особенно популярны в свиноводческих хозяйствах, где в рационе свиней нет силоса и свежей травы, а доминируют сухие корма и жидкие кормовые смеси.

Системы навозоудаления, функционирующие за счет самотека, классифицируются по способу их работы.

Системы периодического действия используются в свиноводческих комплексах, где животные питаются сухими и жидкими кормами, исключая использование комбинированного силоса и зеленых кормов.

Удаление отходов в системах постоянного функционирования происходит за счет их перемещения вниз под влиянием гравитации по наклонной плоскости. Работа основана на принципе самопроизвольного перемещения навозной массы, опирающегося на реологические свойства полужидкой фракции. Система достаточно эффективна при условии

соблюдения уровня влажности в пределах 88-92% и исключении попадания кормов в каналы. Преимущества системы заключаются в экономном потреблении воды и универсальности вне зависимости от применяемых методов содержания и рациона животных. Недостатками являются скопление осадка на дне и образование зоны застоя в конечном участке канала. Применение самотечных систем для выведения навоза нецелесообразно в свиноводческих комплексах с содержанием супоросных и лактирующих свиноматок. Данная система рекомендуется для применения на фермах с годовым содержанием животных менее 12 тыс. голов [101].

Бесподстилочное содержание скота позволяет использовать самотечную систему для удаления навоза с прерывистым циклом практически на любом животноводческом комплексе. В отличие от непрерывной самотечной системы, здесь фекалии скапливаются в специальных каналах, а слив регулируется заслонками. Главным минусом этой технологии является повышенный расход воды и интенсивное выделение H_2S при сливе, что негативно сказывается на воздушной среде помещения. В свиноводческих хозяйствах часто используется вариант прерывистой самотечной системы, где канал для навоза разделен на отдельные секции – ванны или лотки, выполненные из бетона.

Применение технологии бесподстилочного содержания свиней в связке с гидросистемой для удаления отходов обуславливает возникновение существенных объемов жидких фракций навоза, отличающихся высокой степенью влажности, зачастую превышающей 97%. Таким образом, появляется необходимость в утилизации большого объема навозных стоков. Важность решения данной задачи очевидна и достижима за счет применения различных методов утилизации свиного навоза [12,44,43,171].

Навоз свиней состоит из экскрементов, урины и технической жидкости, а также неиспользованных остатков пищи, подстилочного материала и естественных выделений организма животных (щетина, эпидермис и т. д.).

Одним из основных признаков классификации свиного навоза является степень микробиологического разложения. По данному критерию навоз различают: свежий (навоз, не имеющий признаков микробиологического разложения); слаборазложившийся (навоз, в котором в результате микробиологических процессов цвет и прочность кормовых остатков меняются незначительно); полуперепревший (навоз, в котором в результате микробиологических процессов подстилка и кормовые остатки приобретают темно-коричневый цвет, теряют прочность); перепревший (навоз тёмно-коричневого или чёрного цвета, подстилка почти не различима, так как практически полностью разложилась. Структура материала рыхлая, консистенция однородная) [68,76,74,90] (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Классификация свиного навоза по степени разложения [4]

В связи с тем, что объем органических отходов свиней и степень их разбавления водой непостоянны, объем и влажность навозных стоков варьируются в течение года. Изменения количества органических отходов связаны с системой содержания, численностью животных разных возрастных групп, рационом и методами кормления. Степень разбавления экскрементов водой зависит от способа удаления навоза, соблюдения технологических норм содержания, а также от исправности системы автоматического поения [170].

Характеристики свиного навоза классифицируются на физико-механические, химические и биологические.

К физико-механическим характеристикам относятся: уровень влажности, плотность, распределение частиц по размерам и реологические параметры (вязкость и усилие сдвига).

Ключевым показателем, характеризующим свойства свиного навоза, и определяющим выбор используемой системы удаления отходов является влажность, степень которой зависит от естественного содержания воды в фекалиях и моче (для свиней это примерно 76-78% и 94-95% соответственно, в среднем 87-88%), а также от степени разбавления водой [72,81].

Плотность навоза зависит от таких параметров как: влажность, размер частиц навозной массы, удельный вес экскрементов, удельное сопротивление фракций и др. Плотность жидкого свиного навоза составляет 1050...1010 кг/м³ [12,51,80].

Гранулометрический состав жидкого свиного навоза неоднороден и зависит от половозрастной группы, рациона и способа кормления [101].

Жидкий навоз представляет собой сложную текучую смесь, основными параметрами которой является вязкость и предел текучести, в значительной степени зависящие от уровня влажности и температурных условий. Снижение уровня влажности жидкого навоза приводит к увеличению его вязкости и, как следствие, к увеличению предела текучести. К примеру, при уменьшении влажности жидкого свиного навоза (что связано с использованием гранулированных кормов) с 95% до 80%, динамическая вязкость увеличивается с 0,2 до 1,9 Па·с, а предел текучести – с 1,2 до 90 Па. Увеличение температуры с 10 до 20⁰С вызывает снижение вязкости и предела текучести на 25-40%. Данные характеристики имеют определяющее значение при выборе рационального способа утилизации, транспортировки навоза и внесения его в качестве удобрений. [43,44,54].

Свиной навоз обладает определенным химическим составом, который определяется такими параметрами, как уровень влажности, количество зольных элементов, концентрация сухих и органических веществ, а также наличие минеральных соединений и биогенных элементов, включая

микроэлементы. Важной особенностью свиного навоза является присутствие ценных компонентов, которые оказывают существенное влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур. Основная доля азота (от 50 до 70%) в этом удобрении находится в форме, легко усваиваемой растениями. Азотные вещества встречаются в разных состояниях: твердом, растворенном и коллоидном, и могут переходить из одного состояния в другое.

Состав свиного навоза характеризуется содержанием патогенных и условно патогенных микроорганизмов (в т.ч. энтеробактерии, энтеровирусы и пр.), в связи с чем его свойства оцениваются с точки зрения экологической безопасности. Бесподстилочный навоз может быть обсеменен устойчивыми микроорганизмами, такими, как, например, возбудители туберкулеза, сибирской язвы.

Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов, свиной навоз относится к 3 и 4 классу опасности [39,43,44]. В соответствии с санитарно-ветеринарными правилами внесение в почву свежего, неподготовленного навоза запрещается.

Проведенный анализ существующих способов содержания животных, систем транспортировки и утилизации навоза, его состава и свойств показал, что:

- 1) в настоящее время свиноводческие фермы и комплексы наиболее часто применяют самотечные системы удаления навоза в условиях бесподстилочного содержания животных;
- 2) подготовка и переработка значительных объемов отходов свиноводства в виде низкоконцентрированных навозных стоков является довольно сложным трудоемким процессом, требующим принятия мер по его оптимизации;
- 3) свиноводческие комплексы и фермы являются источником отходов III или IV класса опасности, что приводит к загрязнению окружающей среды [101].

В целях обеспечения экологической безопасности и возможности вторичного использования отходов животноводства в сельскохозяйственном производстве, требуется провести анализ существующих видов и методов утилизации свиного навоза.

1.2 Виды и методы утилизации свиного навоза

В современном агропромышленном комплексе одной из важнейших задач является выбор эффективного метода утилизации свиного навоза [69,54].

Свиной навоз – это смесь органических и неорганических веществ, включающая фекалии, мочу, остатки корма, подстилочный материал и воду [70,44,43,81]. Состав и свойства свиного навоза зависят от ряда факторов, таких как возраст и физиологическое состояние животных, рацион кормления, система содержания и способы удаления навоза [43,81].

Химический состав свиного навоза содержит азот, фосфор, калий, кальций, магний и другие макро- и микроэлементы, а также органические вещества, такие как белки, жиры, углеводы и гуминовые кислоты. Содержание азота в свином навозе варьируется от 0,3 до 0,8%, фосфора – от 0,1 до 0,4%, калия – от 0,2 до 0,6% в пересчете на сухое вещество [43,81].

Физические свойства свиного навоза характеризуются тем, что он имеет высокую влажность (70-95%), плотность (1000-1100 кг/м³) и низкую вязкость. Он обладает неприятным запахом, обусловленным наличием в его составе аммиака, сероводорода, меркаптанов и других летучих органических соединений [43,81].

В числе санитарно – гигиенических показателей свиного навоза можно отметить патогенные микроорганизмы, такие как бактерии (*Salmonella*, *Escherichia coli*), вирусы (вирус ящура, вирус гриппа свиней), гельминты и простейшие. Вследствие этого, в свином навозе возможно наличие

антибиотиков и других ветеринарных препаратов, используемых для лечения и профилактики болезней животных [13,36].

Неправильная утилизация свиного навоза может привести к серьезным экологическим последствиям [72,136]. Загрязнение почвы включает в себя накопление свиного навоза на поверхности почвы, что приводит к ее засолению, подкислению и ухудшению физических свойств. Избыток азота и фосфора в почве может вызвать эвтрофикацию водоемов и загрязнение подземных вод нитратами. Свиной навоз, попадая в водоемы, загрязняет их органическими веществами, патогенными микроорганизмами и биогенными элементами. Это приводит к снижению содержания кислорода в воде, гибели водных организмов и ухудшению качества питьевой воды. Неприятный запах навоза может вызывать дискомфорт у населения, проживающего вблизи свиноводческих комплексов. Свиной навоз является источником патогенных микроорганизмов, которые могут передаваться человеку и животным через воду, почву, воздух и продукты питания [44].

Существуют различные виды и методы утилизации свиного навоза [44;81;114;134 и др.], которые можно разделить на группы (рис.1.3).

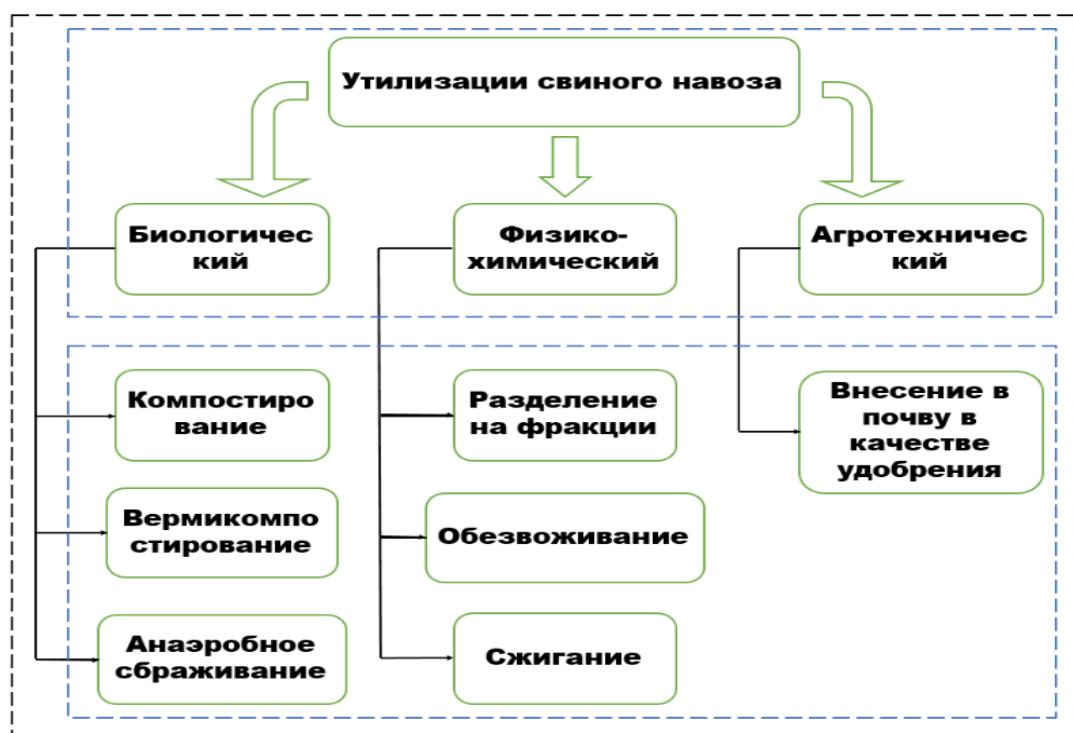


Рисунок 1.3 – Виды и методы утилизации свиного навоза

К биологическим методам относят компостирование, вермикомпостирование и анаэробное сбраживание.

Компостирование (рис.1.4) представляет собой аэробный процесс разложения органических веществ под воздействием микроорганизмов, в результате чего свиной навоз превращается в ценное органическое удобрение [44,51,80,81 и др.]. При полевом компостировании в штабелях (буртах) на открытых площадках приготовление компостов проводят при температуре наружного воздуха не ниже -5°C . Площадки должны быть обвалованными, водонепроницаемыми, например, с асфальтовым или бетонным покрытием, рассчитываемыми на нагрузку от применяемых механизмов и массы штабелей, с дренажными системами. Уровень залегания грунтовых вод не должен быть выше 1-1,5 м, чтобы компостируемые продукты не загрязняли грунтовые воды. Санитарная зона для мелких жилых массивов составляет 500 м. Для приготовления компостной смеси, смешивания ее с наполнителями и перемешивания, уборки готового компоста, могут применяться погрузчики, траки, тракторы, уборочные машины, бульдозеры [72,48,142].

На подготовленной площадке с теплоизоляционным основанием, например, из торфяной подстилки, формируют бурты в форме пирамиды, трехгранной призмы или трапеции [48]. Угол естественного откоса боковых сторон должен быть в пределах $35 - 45^{\circ}$. Ингредиенты компоста укладываются послойно, толщиной от 5 до 15 см, при этом необходимо избегать их чрезмерного сжатия. По окончании формирования бурта для минимизации теплопотерь, а также для предотвращения распространения запахов и привлечения насекомых, на поверхность наносится теплоизоляционный слой толщиной 5-20 см в летние месяцы, и 30-40 см в зимние. В качестве изоляционного материала можно использовать готовый компост (после просеивания), солому, древесные опилки или торф. Рекомендуется увлажнять бурты с интервалом в 2-4 недели. При правильном укрытии процесс компостирования продолжается даже в зимний период. Полный цикл

компостирования в буртах или штабелях обычно занимает от 1,5-2 до 3-6 месяцев, в зависимости от климата и времени года [81].

Регулярное перемешивание компоста и активная вентиляция посредством систем каналов или труб, проложенных под ним, сокращают области с недостатком кислорода. Периодическое рыхление разбивает крупные куски исходного сырья, увеличивая площадь поверхности, доступной для микроорганизмов. Это способствует более полному разложению органики в условиях высоких температур и ускоряет процесс компостирования. На протяжении 30-45 дней смесь в компостных кучах перемешивают несколько раз (примерно каждые 6-8 дней). Слишком частое перемешивание может привести к снижению температуры и влажности компостируемой массы, повреждению грибкового мицелия и актиномицетов, а также к разрушению структуры сырья и превращению его в однородную влажную массу [111,90].

Для интенсификации процесса компостирования нередко применяют добавление зрелого компоста в исходную смесь. Специальные биологические добавки могут включать в себя ферменты и микроорганизмы, полученные из компоста, а также специально отобранные штаммы, способные разрушать целлюлозу, лигнин, белки и другие биополимеры (например, стартовые культуры на основе термофильных актиномицетов, бактерий из рубца жвачных, иммобилизованных бактерий *Bacillus subtilis* и *B. licheniformis*, грибов *Pleurotus florida* и *P. ostreatus*, *Trichoderma viride* и т. п.) [9,111]. Уменьшить время созревания компоста можно также путем его орошения водным экстрактом, полученным из готового компоста. Оптимальное соотношение компоста и воды для приготовления экстракта составляет 1:100. Компост, обработанный таким экстрактом, созревает в буртах на 10-20 суток быстрее. Использование стартовых культур позволяет сократить сроки компостирования до 4-15 дней.

Автоматизированное компостирование, осуществляемое в специализированных устройствах, таких как биоконвекторы, биореакторы, ферментационные барабаны, силосы, биотоннели и траншеи, обеспечивает

максимальную эффективность переработки отходов. Благодаря этому, время, необходимое для компостирования, сокращается до 2-3 недель или даже до 2-7 дней. Объем биореакторов, используемых для компостирования, варьируется от 100 до 500 кубических метров, а производительность составляет от 0,5 до 300 тонн компоста в сутки [35].

Механизированное компостирование включает две последовательные фазы: начальную, при которой органические отходы интенсивно разлагаются при строгом контроле температуры, влажности и доступа воздуха; и заключительную, где компост созревает на открытых площадках или в специализированных установках в течение 3-4 недель, достигая стабильности, дезинфекции и оптимальной влажности [111].

В силосных реакторах вертикального типа, реализующих одноступенчатый и многоступенчатый процесс, компостирование может осуществляться как с перемешиванием, так и без него. Длительность цикла составляет от 3 до 21 суток и определяется конструкцией реактора и выбранной технологией. Для интенсификации процесса часто добавляют до трети зрелого компоста в исходную смесь. Загрузка биомассы происходит в верхней части установки, а выгрузка – в нижней. Подача воздуха для аэрации осуществляется под давлением в нижнюю зону реактора, а отвод – из верхней части [96].



Рисунок 1.4 – Общий вид компоста

Вермикомпостирование с использованием дождевых червей позволяет преобразовывать органические отходы в ценное удобрение. Ряд экспертов считают вермикультивирование ключевым методом восстановления почв, пострадавших от нерационального земледелия. По мнению приверженцев этой технологии, биогумус способен связывать и обезвреживать тяжелые металлы, а растительные гормоны, выделяемые микроорганизмами, стимулируют рост растений, увеличивая его в 4–6 раз, и повышают их устойчивость к заболеваниям и вредителям. Вермикомпостирование получило такое глобальное распространение, что была создана международная федерация, зарегистрированная в Италии, а в Дании издается специализированный журнал «Червивые новости». Тем не менее, существуют критики, утверждающие, что вермикомпост не обладает значительными преимуществами перед традиционным компостом в качестве удобрения, но при этом, его производство технологически сложнее и экономически менее выгодно. В доступной литературе недостаточно убедительных данных, подтверждающих превосходство одного метода компостирования над другим, что указывает на необходимость дальнейших исследований в этой области.

В России метод вермикомпостирования не получил широкого распространения из-за недостатка специализированного оборудования для механизации процесса и высокой стоимости переработки материалов, предназначенных для компостирования. Это, в свою очередь, сдерживает развитие рынка сбыта вермикомпоста.

Недостаточная информированность населения и сельскохозяйственных предприятий о преимуществах и технологиях вермикомпостирования. Многие фермеры и дачники остаются привержены традиционным методам удобрения и утилизации отходов, не осознавая потенциал дождевых червей в создании ценного органического удобрения [44,51,80,81 и др.].



Рисунок 1.5 – Процесс вермикомпостирования

Анаэробное сбраживание – это процесс разложения органических веществ под воздействием анаэробных микроорганизмов, в результате чего образуется биогаз [44,51,80,81 и др.].

Производство биогаза включает в себя три этапа: расщепление сложных веществ, кислотное брожение и метаногенез. В этой многоступенчатой трансформации задействовано большое количество микроорганизмов, ключевую роль среди которых играют метаногенные бактерии, которые показаны на рисунке 1.6.

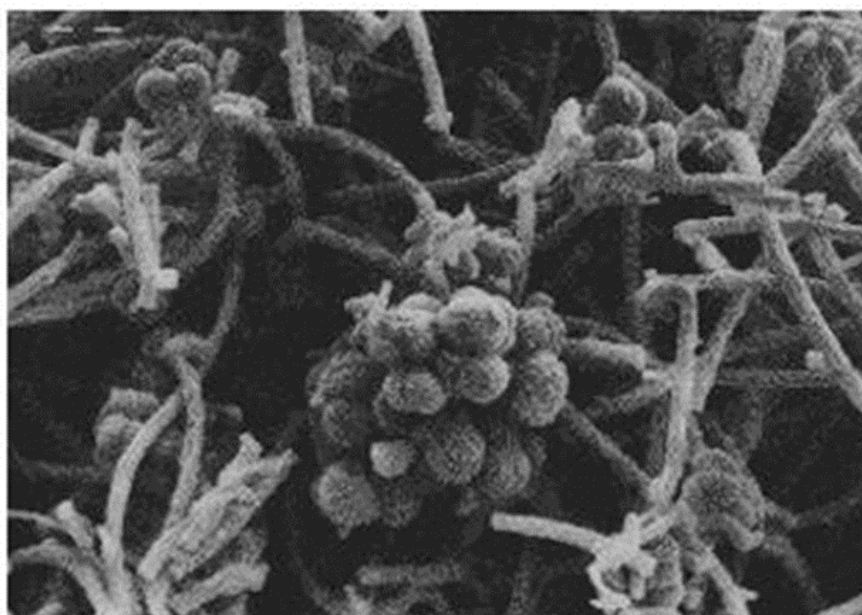


Рисунок 1.6 – Метаногенные бактерии

Бактерии разлагают длинные цепочки сложных углеводов, протеины и липиды на более короткие цепочки.

На втором этапе формирования биогаза ключевую роль играют кислотообразующие бактерии, которые разлагают сложные органические молекулы (такие как целлюлоза, протеины и липиды) до более простых соединений. В процессе ферментации образуются такие первичные продукты, как летучие жирные кислоты, спирты с низким молекулярным весом, водород, монооксид углерода, уксусная и муравьиная кислоты, а также другие соединения. Эти органические вещества служат питательной средой для метаногенных бактерий, преобразующих их в биогаз [159].

На заключительном этапе анаэробного разложения в действие вступают метаногены, расщепляющие простые органические соединения. В качестве питательных веществ они используют водород, диоксид углерода и этановую кислоту. Метаногенные бактерии обитают в бескислородной среде, необходимой для их существования. Интенсивность выделения биогаза напрямую зависит от созданных анаэробных условий.

Метан и кислотообразующие бактерии находятся в симбиозе. Кислотообразующие бактерии создают среду с оптимальными характеристиками для метаногенных бактерий (бескислородная среда и низкомолекулярные химические соединения). В свою очередь, метаногены утилизируют побочные продукты, выделяемые кислотообразующими бактериями. Без этого взаимодействия в реакционной среде сложились бы неблагоприятные условия для жизнедеятельности обоих типов микроорганизмов [150].

На рисунке 1.7 показана схема трансформации органических веществ при анаэробном сбраживании.

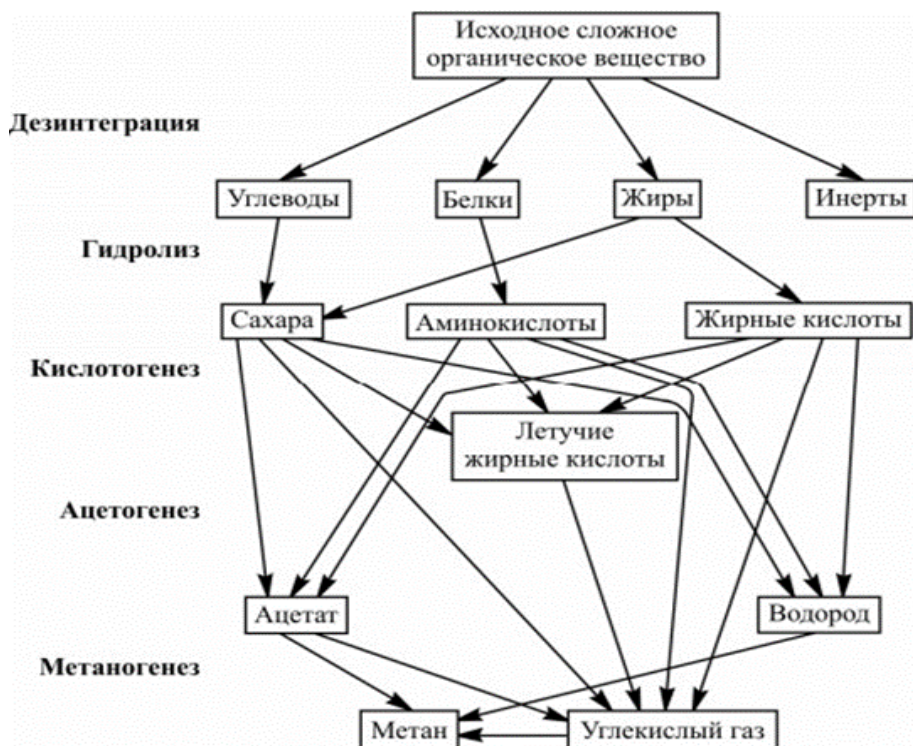


Рисунок 1.7 – Трансформация органических веществ при анаэробном сбраживании

Резко континентальный климат затрудняет проведение биологических процессов утилизации навоза, таких как компостирование и вермикомпостирование. В связи с этим, необходимо использовать технологии, адаптированные к условиям Иркутской области. Удаленность от центральных регионов затрудняет транспортировку свиного навоза на перерабатывающие предприятия и требует создания местных мощностей по утилизации отходов. Дефицит земель сельскохозяйственного назначения ограничивает возможности использования свиного навоза в качестве удобрения.

Основными недостатками существующих методов для условий Восточной Сибири являются высокая энергоемкость, сложность адаптации к сложным климатическим условиям, логистические проблемы, связанные с транспортировкой и хранением навоза, а также необходимость учета специфики почв и растительности региона [123,110]. Таким образом, существующие методы не отвечают экологическим и экономическим требованиям для эффективной утилизации свиного навоза.

Выбор оптимального метода утилизации должен осуществляться с учетом экологических, экономических и социальных факторов, а также особенностей региона. Внедрение эффективных и экологически безопасных методов утилизации свиного навоза позволит снизить негативное воздействие свиноводческих комплексов на окружающую среду, улучшить качество жизни населения и повысить конкурентоспособность отрасли. Следует учитывать необходимость разработки и внедрения адаптированных к условиям Иркутской области технологий утилизации, стимулирования использования свиного навоза в качестве удобрения [110,123].

По результатам анализа существующих методов утилизации наиболее перспективным решением является анаэробное сбраживание, позволяющее получать органическое удобрение и биогаз, который может быть использован в качестве источника энергии [136]. В дополнение к этим методам, применяются технологии обработки навоза, направленные на разделение твердой и жидкой фракций. Жидкая фракция может быть использована для орошения сельскохозяйственных культур после предварительной очистки, а твердая фракция может быть компостирована или использована в качестве подстилки для животных. Этот подход позволяет более эффективно использовать навоз и снизить риски загрязнения окружающей среды.

Таким образом, внедрение комплексного подхода к утилизации свиного навоза, сочетающего в себе анаэробное сбраживание, компостирование и разделение фракций, представляет собой устойчивое и экономически выгодное решение. Помимо снижения негативного воздействия на окружающую среду, оно способствует созданию замкнутого цикла производства, в котором отходы превращаются в ценные ресурсы, обеспечивая устойчивое развитие сельского хозяйства.

На рисунке 1.8 показана схема определения параметров предлагаемого метантенка с биофильтром. Красная линия в схеме показывает предложенный способ утилизации свиного навоза.

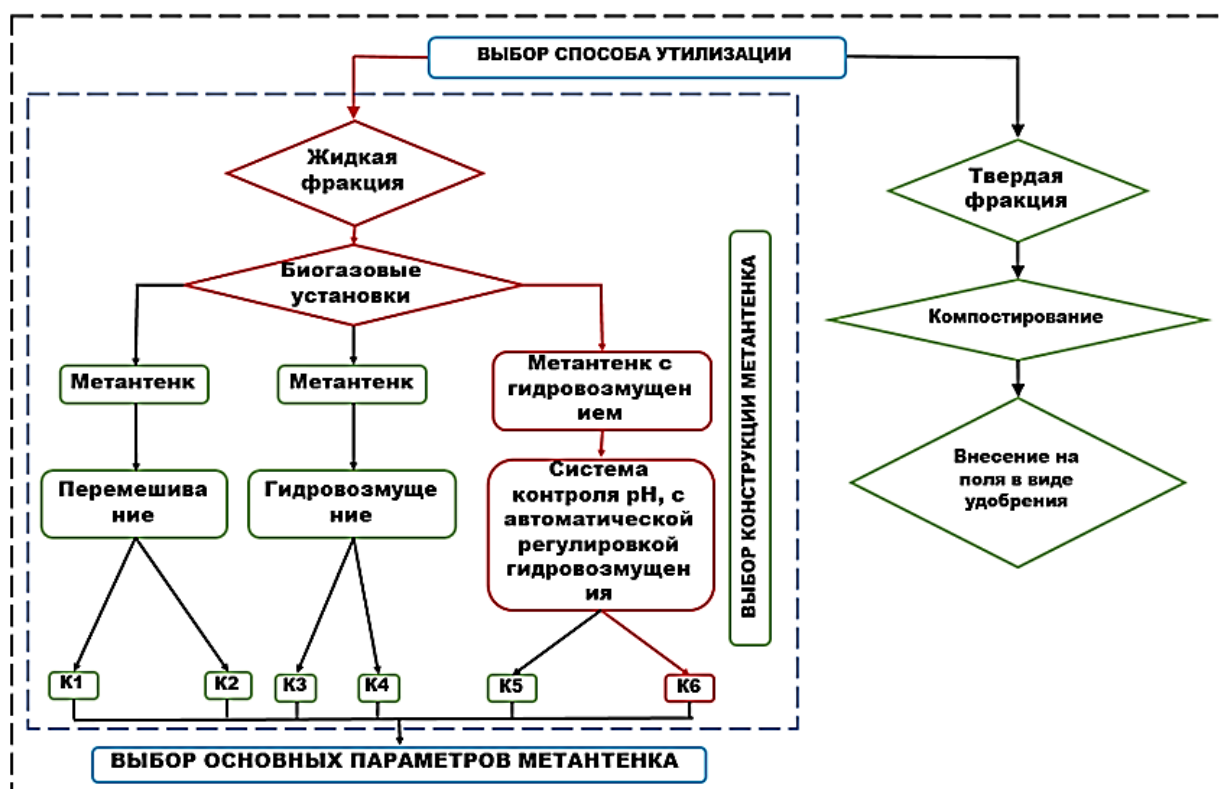


Рисунок 1.8 – Определение параметров предлагаемого метантенка с биофильтром метантенка: K1-отсутствие механизма перемешивания; K2-наличие механизма перемешивания; K3-отсутствие гидровозмущения; K4-наличие гидровозмущения; K5-отсутствие системы контроля pH; K6-наличие системы контроля pH и автоматической регулировки гидровозмущения.

С учетом особенностей региона, наиболее перспективными методами утилизации свиного навоза в условиях Восточной Сибири является анаэробное разложение, этот процесс осуществляется в герметичных реакторах (биореакторах, метантенках) при определенной температуре. В процессе участвуют различные группы микроорганизмов, осуществляющие последовательные этапы: гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и метаногенез.

1.3 Биогазовая технология органических отходов

Биогазовая технология – это перспективное направление переработки органических отходов, позволяющее не только утилизировать их, но и получать ценные продукты: биогаз и биоудобрения [13]. Суть технологии заключается в анаэробном сбраживании органического материала под

воздействием микроорганизмов в специальных реакторах – метантенках. В процессе брожения сложные органические соединения разлагаются до более простых, в результате чего образуется биогаз, состоящий преимущественно из метана (CH_4) и углекислого газа (CO_2), а также небольших примесей других газов, таких как сероводород (H_2S) и аммиак (NH_3) [8,183,185].

Преимущества биогазовой технологии показаны на рисунке 1.9.

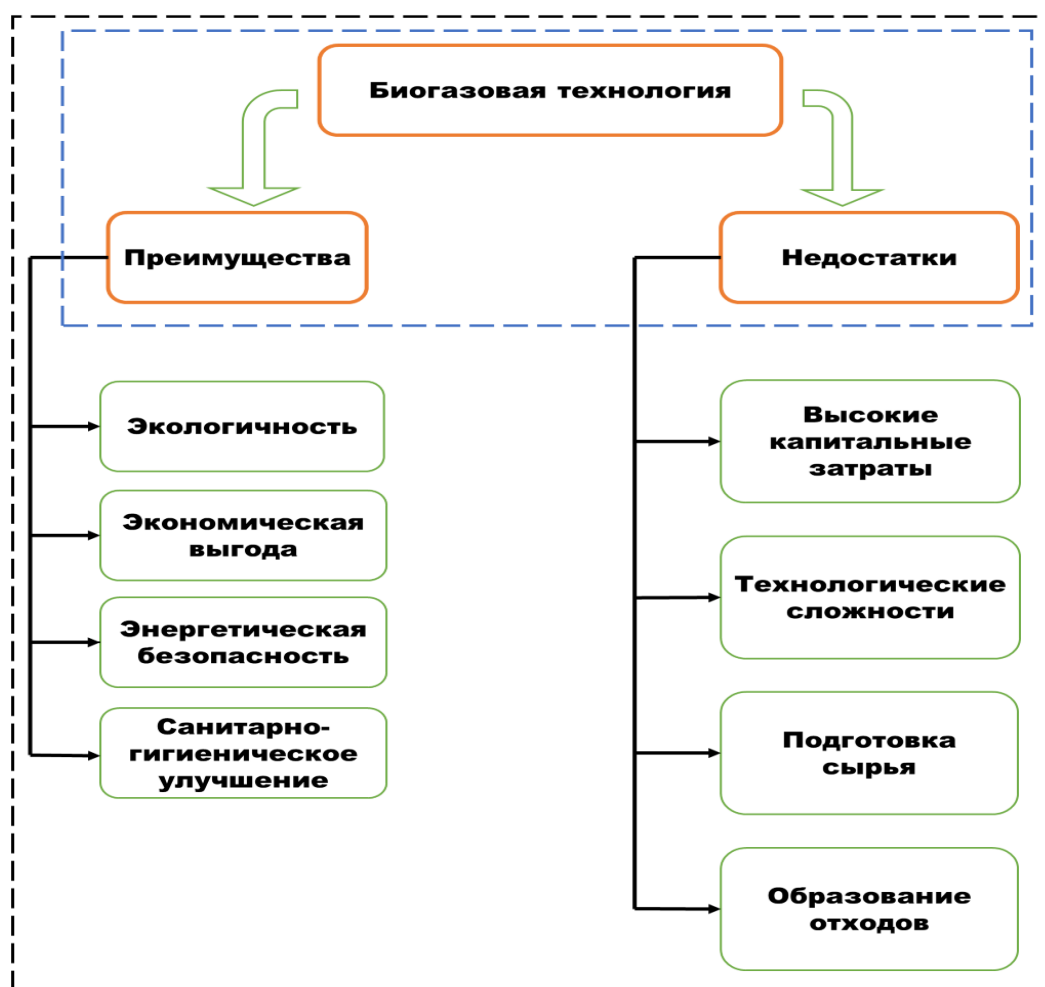


Рисунок 1.9 – Преимущества и недостатки биогазовой технологии

Несмотря на недостатки, биогазовая технология является перспективным решением для переработки органических отходов сельского хозяйства и получения возобновляемой энергии в виде биогаза. Данная технология особенно актуальна для сельскохозяйственных предприятий, пищевой промышленности и коммунального хозяйства, где образуется большое количество органических отходов.

Для эффективного функционирования биогазовой установки необходимо правильно подобрать субстрат, обеспечивающий оптимальное соотношение углерода и азота (C, N) [8,23,31,158]. Наиболее распространенными субстратами являются:

- 1) навоз сельскохозяйственных животных - содержит большое количество органических веществ и микроорганизмов, необходимых для анаэробного сбраживания;
- 2) растительные остатки - отходы сельскохозяйственных культур, такие как солома, ботва и силос;
- 3) пищевые отходы - отходы производства и потребления продуктов питания, такие как фрукты, овощи, мясо и рыба;
- 4) осадок сточных вод - отходы очистных сооружений;
- 5) органическая фракция твердых бытовых отходов (ТБО) - отходы, образующиеся в жилых домах и предприятиях, подлежащие разделному сбору.

Процесс анаэробного сбраживания состоит из нескольких этапов [50,133,153]. Описание каждого этапа процесса анаэробного сбраживания представлено ниже в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные этапы анаэробного сбраживания [119]

№	Этап сбраживания	Описание
1	Гидролиз	Разложение сложных органических соединений, таких как белки, углеводы и жиры, на более простые молекулы, такие как аминокислоты, сахара и жирные кислоты, под действием ферментов, выделяемых микроорганизмами
2	Ацидогенез	Превращение простых молекул в органические кислоты, спирты, углекислый газ и водород под действием кислотообразующих бактерий
3	Ацетогенез	Превращение органических кислот и спиртов в уксусную кислоту, углекислый газ и водород под действием ацетогенных бактерий

4	Метаногенез	Превращение уксусной кислоты, углекислого газа и водорода в метан и углекислый газ под действием метаногенных археобактерий
---	-------------	---

Для оптимизации процесса анаэробного сбраживания необходимо поддерживать оптимальные условия в метантенке, включая: температуру; кислотность pH (оптимальный pH составляет 6,5-7,5); влажность (85-95%); содержание питательных веществ; перемешивание.

Биогазовая технология представляет собой перспективный и экологически безопасный метод переработки органических отходов, позволяющий получать ценное биотопливо (биогаз) и органическое удобрение (дигестат). Технология базируется на анаэробном разложении органического вещества под воздействием комплекса микроорганизмов при отсутствии кислорода [105,50].

Объемы органических отходов, образующихся в сельском хозяйстве, пищевой промышленности и коммунальном хозяйстве, постоянно растут, создавая серьезные экологические проблемы, такие как загрязнение почвы, воды и атмосферы. Традиционные методы утилизации (захоронение на полигонах, сжигание) сопряжены с выбросами парниковых газов и загрязняющих веществ. Биогазовая технология предлагает устойчивое решение проблемы утилизации, одновременно обеспечивая получение альтернативных источников энергии и органических удобрений, что способствует развитию экономики замкнутого цикла [105].

Основные принципы биогазовой технологии [105] представлены на рисунке 1.10.

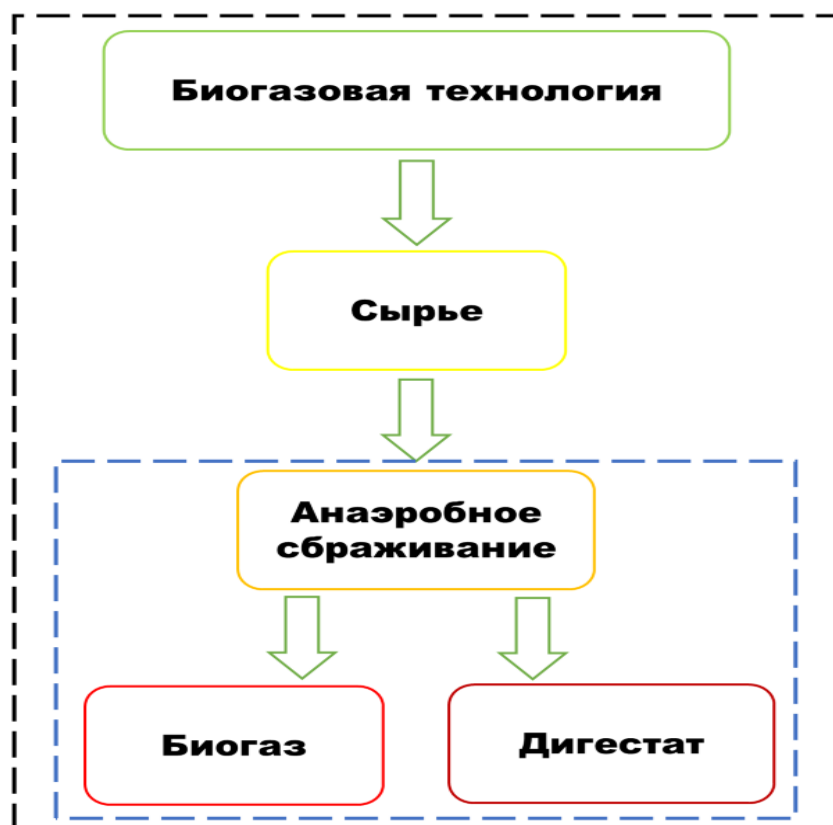


Рисунок 1.10 – Основные принципы биогазовой технологии

Сырье для биогазового производства используется в виде различных органических отходов, таких как навоз сельскохозяйственных животных, птичий помет, отходы растениеводства, пищевые отходы, осадок сточных вод и другие. Важным фактором является состав сырья, содержание сухого вещества и соотношение углерода и азота (C, N).

Основным компонентом биогаза является метан (CH_4) – горючий газ, используемый для производства электроэнергии, тепла или в качестве моторного топлива. В состав биогаза также входит углекислый газ (CO_2), сероводород (H_2S) и другие примеси, которые могут потребовать очистки [105].

Остаток, образующийся после анаэробного сбраживания, насыщен полезными веществами и микроэлементами. Он применяется как органическое удобрение и используется на возделывание сельскохозяйственных культур.

Биогазовая технология переработки органических отходов представляет собой результативный и многообещающий подход к утилизации отходов, позволяющий извлекать ценные ресурсы и минимизировать вредное воздействие на окружающую среду [105]. Будущее развитие технологии связано с усовершенствованием процессов анаэробного разложения, созданием инновационных биореакторов, применением альтернативных видов сырья и сокращением расходов на возведение и обслуживание биогазовых установок. Расширение биогазовой индустрии содействует устойчивому прогрессу сельского хозяйства, энергетической отрасли и коммунального хозяйства, а также решению экологических задач.

Следует подчеркнуть, что биогазовая технология представляет собой перспективное решение для утилизации органических отходов и производства возобновляемой энергии и удобрений. Ее повсеместное внедрение позволит уменьшить негативное воздействие на окружающую среду, усилить энергетическую независимость и улучшить экономическое положение в сельском хозяйстве и других сферах. Необходимо продолжать исследовательскую и конструкторскую деятельность в этой области с целью оптимизации технологических процессов и снижения финансовых затрат на строительство и эксплуатацию биогазовых установок.

1.4 Конструктивные особенности метантенков

Конструктивные особенности метантенков постоянно совершенствуются с целью повышения эффективности, надежности и безопасности [185]. Развитие новых технологий перемешивания и нагрева, а также автоматизация процессов управления способствуют оптимизации работы метантенков и расширению их применения в различных отраслях и обусловлены необходимостью обеспечения оптимальных условий для анаэробного сбраживания органических отходов. Основными элементами метантенка являются герметичный реактор, система перемешивания, система

нагрева, система сбора и отвода биогаза, а также система загрузки субстрата и выгрузки дигестата. Форма резервуара может быть цилиндрической, прямоугольной или сферической, выбор зависит от объема, доступной площади и экономических соображений. Герметичность резервуара играет важную роль для предотвращения утечек биогаза и попадания воздуха, что может нарушить процесс [163].

На рисунке 1.11 показана классификация конструкций метантенков, где основными недостатками являются забивание нижней части реакторов, что способствует образованию ила и, в дальнейшем, нарушению всего процесса анаэробного сбраживания.

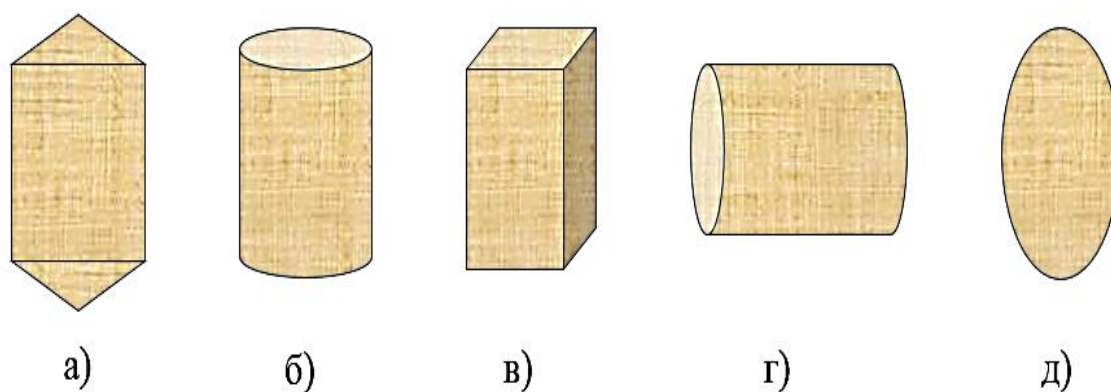


Рисунок 1.11 – Классификация конструкций метантенков: а) цилиндрические с коническим дном и верхом; б) цилиндрические с плоским дном и верхом; в) прямоугольные; г) цилиндрические горизонтальные; д) оваловые

Корпус метантенка является важнейшим элементом, обеспечивающим герметичность и теплоизоляцию реактора [185]. Традиционно для строительства метантенков используются материалы из железобетона, стали и полимерных материалов. Форма корпуса может быть цилиндрической, сферической или прямоугольной. Цилиндрические резервуары с плоским низом и верхом по сравнению с камерами с овальным сечением имеют менее благоприятные условия для тока жидкости, перемешивание содержимого в них субстрата требует больших удельных затрат энергии. К преимуществам можно отнести относительно простую технологию изготовления, которая

опирается на обширный опыт строительства емкостей для сельскохозяйственных целей (стальные, бетонные, стеклопластиковые). К таким цилиндрическим резервуарам можно отнести систему Массо (Франция), где для создания высокого давления у дна сосуда, воду и навозную жижу продавливали через твердый навоз, вследствие чего улучшались условия для роста метаногенных бактерий [166,182,183]. При снижении давления жидкая часть снова опускалась на дно резервуара. Поскольку эта установка не имела эффективной системы подогрева, то выход биогаза в течение большей части года был весьма незначителен. Цилиндрические резервуары с коническими нижней и верхней частями обеспечивают удаление корки сверху и снизу отстоявшегося субстрата. Однако, по сравнению с овальной, эта форма реактора создает менее благоприятные условия для перемещения жидкого субстрата [182,183].

В аппаратах этого типа аэрация и перемешивание культуральной жидкости осуществляются сжатым воздухом, который подается в реактор под определенным давлением. Характеристика метантенков с подводом энергии к газовой фазе представлена в таблице 1.2 [11].

Таблица 1.2 – Характеристика метантенков [11]

№	Тип метантенков	Описание
1	Барботажные	Подача воздуха в которых осуществляется через барботажные устройства, расположенные в нижней части аппарата.
2	С диффузором (эрлифтные аэраторы)	Имеющие внутренний цилиндр-диффузор, который обеспечивает перемешивание поступающих по распределительным трубам в нижнюю часть аппарата субстрата и воздуха.
3	Трубчатые (газлифтные)	Состоящие из реактора кожухотрубчатого типа, через который жидкость потоком воздуха перемещается в верхнюю часть аппарата и, попадая в сепаратор, возвращается в реактор, где снова увлекается воздухом, подвергаясь таким образом циркуляции.
4	С форсуночным воздухомраспределением	Оборудованные форсунками для подачи воздуха, расположенными в нижней части аппарата, и находящимся над ними диффузором, который обеспечивает внутреннюю циркуляцию жидкости.

Продолжение таблицы 1.2

5	Колонного типа	Представляющие собой цилиндрическую колонну, разделенную горизонтальными перегородками (тарелками) на секции; воздух барботирует через слой жидкости каждой тарелки, а перемещение жидкости через кольцевую щель обеспечивает противоточное движение жидкой и газовой фаз.
---	----------------	--

Метантенки, использующие подвод энергии непосредственно к жидкой фазе, включают в себя следующие конструкции:

- устройство с самовсасывающей турбиной, оснащенное цилиндрическим диффузором и перемешивающим элементом с полыми лопастями, и центральным валом. В процессе вращения турбины создается зона пониженного давления, что обеспечивает автоматическое всасывание воздуха. Это приводит к подъему жидкости в пространстве между диффузором и стенками аппарата с последующим возвратом обратно в диффузор;
- реакторы, использующие турбозежекторные системы перемешивания;
- аппарат, разделенный на отсеки вертикальными перегородками, в каждой из которых установлена самовсасывающая турбинная мешалка (эжектор) и диффузор, для обеспечения циркуляции жидкости между секциями в перегородках предусмотрены отверстия [183].

Метантенки с комбинированным подводом энергии. В данных устройствах реализована подача энергии как в газовую среду для обогащения кислородом, так и в жидкую среду для гомогенизации. Реактор имеет форму цилиндрического резервуара, оснащенного механическим перемешивающим устройством и барботером, который обычно располагается под первым уровнем мешалки. Также применяется классификация метантенков (таблица 1.3) на основе метода перемешивания, где различают аппараты с механическим, пневматическим и циркуляционным типами перемешивания [99,163].

Таблица 1.3 – Классификация метантенков по способам перемешивания

№	Способ перемешивания	Характеристика
1	Механический	Оснащены механическим перемешивающим устройством, включающим центральный вал и лопасти разнообразной конструкции. Подача воздуха может быть реализована посредством барботажа. Механический вибратор, расположенный вблизи барботера, содействует распылению воздуха на мелкие пузырьки.
2	Пневматический	Для улучшения смешивания и насыщения кислородом используют вращающиеся перфорированные диски, расположенные рядом с барботером, либо донные пропеллеры. Традиционная эрлифтная система оборудована диффузором, чей нижний край размещен над барботером. Предусмотрены различные способы подачи воздуха: внутрь диффузора или в окружающее его пространство.
3	Циркуляционный	Аппараты данного типа оснащены элементами (насосами, эжекторами), обеспечивающими направленное движение жидкости по замкнутой траектории. В системах циркуляции культуральной жидкости насос нередко объединяют с барботером, сочетая таким образом пневматическое и циркуляционное перемешивание. Конструкции аппаратов варьируются: существуют аппараты с "ниспадающей струей", с "погруженной струей", а также с перемешиванием посредством эжектора. В аппаратах циркуляционного типа часто используют твердые носители (насадки) для увеличения площади поверхности.

Главное требование к аппаратам - сохранение стерильности, поэтому они должны быть герметичными, все линии трубопроводов должны быть доступны для обработки горячим паром. Рабочий объем ферментера (биореактора) обычно не превышает 7/10 общего объема [8].

По проведенному анализу существующих метантенков установлено, что эффективным в условиях агропромышленного комплекса является применение конструкций метантенков с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения. На рисунке 1.12 представлена схема предлагаемой конструкции метантенка.

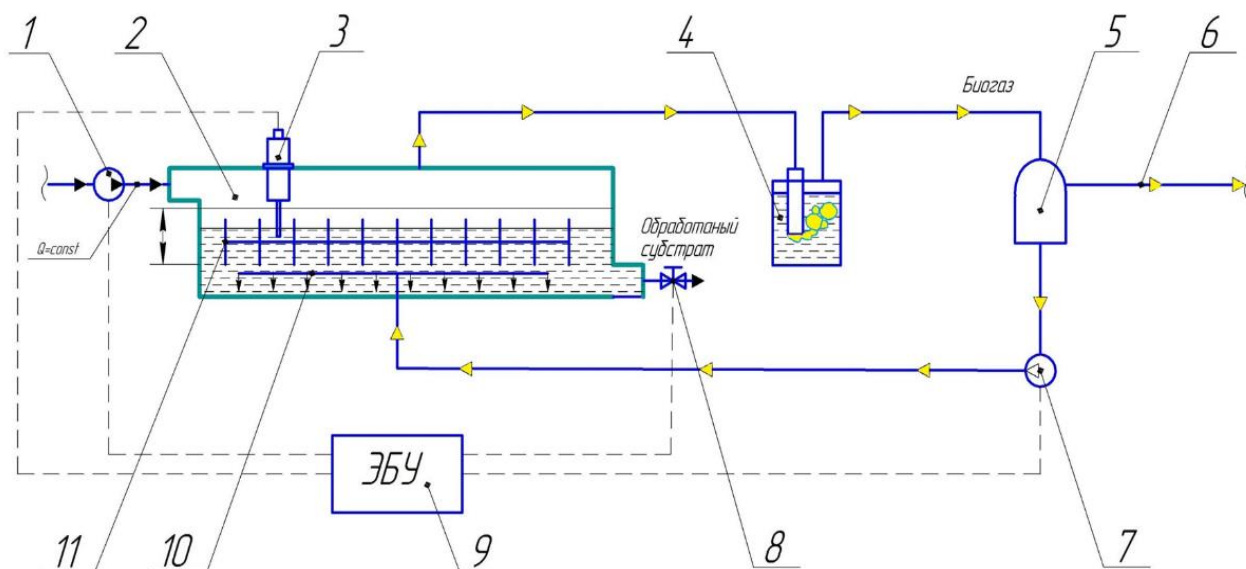


Рисунок 1.12 – Метантенк с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения: 1 – жидкостный насос; 2 – реактор; 3 – рН-метр; 4 – гидравлический затвор; 5 – газгольдер; 6 – биогаз потребителю; 7 – газовый насос; 8 – сливной вентиль; 9 – ЭБУ; 10 – перфорированная труба; 11 - иммобилизатор

1.5 Анализ существующих научных работ по моделированию процессов анаэробного сбраживания

В научной литературе процессы анаэробного сбраживания органических отходов, в частности навоза, исследовались многими авторами. Проведем анализ наиболее значимых работ:

1. Математические модели, предложенные автором Друзьяновой В.П. «Динамическая модель анаэробного сбраживания» описывает процесс разложения органических веществ. Входными параметрами являются состав навоза, температура и скорость перемешивания [50].

Математическая модель процесса сбраживания описывает изменение концентраций субстрата и продуктов метаболизма:

$$\frac{dT}{d\tau} = (\mu - \bar{\mu})T; \frac{dS}{d\tau} = \tau j_s T - V - \bar{V}; \frac{dP}{d\tau} = \tau j_p T - M + \bar{M}, \quad (1.1)$$

где, T, S, P - концентрации навоза, субстрата и продукта, μ, μ - скорости роста и метаболизма микроорганизмов, j_s, j_p - скорости разложения субстрата и образования продукта [50].

Модель скорости всплытия газового пузырька:

$$\bar{V}_H = \frac{e^{\frac{t\sqrt{l^2-4ac}}{b}} \left(l - \sqrt{l^2 - 4ac} \right) - l - \sqrt{l^2 - 4ac}}{2a \left(1 - e^{\frac{t\sqrt{l^2-4ac}}{b}} \right)}, \quad (1.2)$$

Данное уравнение описывает, как размер пузырька и плотность субстрата влияют на скорость выделения биогаза. Модель Друзьяновой В.П. представляет собой усовершенствованный динамический подход, который отличается от классических моделей за счет учета гидродинамических процессов. Однако, ее можно дополнительно усовершенствовать, интегрируя влияние pH среды и применяя более упрощенные уравнения для моделирования газовой фазы.

2. Бадмаев Ю.Ц. предлагает динамическую модель для описания скорости образования биогаза в метантенке с биофильтром. Основное уравнение имеет следующий вид:

$$V_{cf} = V_c + \Delta V, \quad (1.3)$$

где, V_{cf} - скорость образования биогаза в метантенке с биофильтром ($\text{м}^3/\text{сут}$), V_c - скорость образования биогаза в традиционной биогазовой установке, ΔV - прирост скорости за счет биофильтра [10].

После преобразований выражение скорости образования биогаза с иммобилизованной активной биомассой метанообразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре имеет вид:

$$V_{cf} = B \frac{S}{\tau_y} \left(1 - \frac{K_s}{\mu \tau_y - 1 + K_s} \right) + [X_{\bar{om}} \cdot K_{\bar{o}} \cdot (\mu / S)], \quad (1.4)$$

где, S - концентрация органического вещества в субстрате (кг), τ_y - время экспозиции (сут), μ - скорость роста микроорганизмов ($\text{кг}/\text{сут}$), $X_{\bar{om}}$ - масса

активной биомассы на носителях биофильтра (кг), K_6 - коэффициент образования биогаза ($\text{м}^3/\text{кг}$) [10].

Бадмаев Ю.Ц. предлагает практически значимое решение для анаэробной переработки навоза, но для широкого внедрения требуется учет дополнительных факторов pH и гидродинамические воздействия.

3. Felix Garcia-Ochoa, Victoria E. Santos Mazorra, Liliana Naval в работе «Кинетическая модель анаэробного сбраживания навоза крупно-рогатого скота» [166] предложили систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\frac{\mu_{\max} \cdot X \cdot S}{K_s + S} - k_{hyd} \cdot S \\ \frac{dX}{dt} &= Y \cdot \frac{\mu_{\max} \cdot X \cdot S}{K_s + S} - k_{dec} \cdot X\end{aligned}\quad (1.5)$$

где, S - концентрация субстрата, г/л, X - концентрация биомассы, г/л, $\mu_{\max}$ - максимальная скорость роста микроорганизмов, 1/сут, K_s - константа полунасыщения, г/л, k_{hyd} - константа скорости гидролиза, 1/сут, k_{dec} - константа распада биомассы, 1/сут, Y - коэффициент выхода биомассы.

Авторы использовали модифицированное уравнение Моно для описания роста микроорганизмов, дополнив его членом, описывающим гидролиз сложных органических соединений. Параметры модели определялись экспериментально методом наименьших квадратов на данных лабораторных исследований сбраживания навоза КРС.

Модель не учитывает влияние pH на скорость процесса (k_{br} принимается постоянной). Отсутствует параметр, характеризующий эффект гидровозмущение. Линейная зависимость скорости гидролиза от концентрации субстрата не всегда соответствует экспериментальным данным. Данная модель была использована Петровым И. А. [178] при моделировании сбраживания свиного навоза, однако автор отметил необходимость введения поправочных коэффициентов для учета эффекта ингибирования при высоких нагрузках.

4. В статье «A new kinetic model for biogas production from codigestion by batch mode», авторы статьи D. Pham Van1 и др., представлена новая кинетическая модель (ВРК) для описания выхода биогаза при анаэробном сбраживании [183]. Авторы критикуют модель Гомперца (Gompertz), указывая на ее недостатки. Модель имеет следующий вид:

$$G_t = A \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{\mu_m \cdot \exp(1)}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}, \quad (1.6)$$

где, G_t – выход биогаза в момент времени t , A – максимальный потенциал выхода биогаза, μ_m – максимальная скорость производства биогаза, λ – продолжительность дней, время до начала активного производства биогаза, t – время с начала процесса (дни).

Модель Гомперца не учитывает начальную точку процесса (при $t=0$, $G_{(t=0)} > 0$), что противоречит реальным условиям. Показатель продолжительности дней (λ) не имеет четкого физического смысла и часто является математической константой.

Предложенная авторами ВРК-модель (кинетика производства биогаза) [183] имеет следующий вид:

$$G_t = A \left\{ 1 - \exp \left[(m-1) \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\frac{1}{m}} \right] \right\}, \quad (1.7)$$

где, G_t – выход биогаза, A – максимальный потенциал выхода биогаза, t_0 – время достижения максимальной скорости производства биогаза, m – константа, связанная с кинетикой процесса.

Основными преимуществами ВРК-модели являются учет начальных условий ($G_{(t=0)}=0$), показатели A , μ_m (максимальная скорость производства биогаза) и t_0 имеют физический смысл [183]. Однако, ВРК-модель не учитывает влияние pH на коэффициент скорости сбраживания и гидродинамические воздействия, которые могут влиять на выход биогаза.

5. Smith J. et al. в работе «Advanced anaerobic digestion models for agricultural substrates» [166].

Уравнение для субстрата:

$$\frac{dS}{dt} = -k_{hyd} \cdot S \cdot \frac{X_{hyd}}{K_{S,hyd} + S} - k_{acid} \cdot S \cdot \frac{X_{acid}}{K_{S,acid} + S}, \quad (1.8)$$

Уравнение для микроорганизмов:

$$\begin{aligned} \frac{dX_{hyd}}{dt} &= Y_{hyd} \cdot k_{hyd} \cdot S \cdot \frac{X_{hyd}}{K_{S,hyd} + S} - b, \\ \frac{dX_{acid}}{dt} &= Y_{acid} \cdot k_{acid} \cdot S \cdot \frac{X_{acid}}{K_{S,acid} + S} - b_{acid} \cdot X_{acid}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Уравнение для получения биогаза:

$$\frac{dG}{dt} = k_{meth} \cdot VFA \cdot \frac{X_{meth}}{K_{S,meth} + VFA}, \quad (1.10)$$

Данная модель учитывает трех групп микроорганизмов: гидролитические (X_{hyd}), ацидогенные (X_{acid}) и метаногенные (X_{meth}). Введение параметров: коэффициенты выхода биомассы (Y), коэффициенты распада (b) и константы полунасыщения (K_s). Экспериментально определяются следующие параметры: респирометрические измерения, ПЦР-анализ микробных сообществ и хроматографический анализ VFA [166].

Проблемные аспекты включают в себя следующие показатели: чрезмерная сложность для инженерных расчетов; большое количество трудноопределяемых параметров; ограниченная применимость для навозных субстратов.

Анализ литературных данных показывает следующие общие ограничения существующих моделей: 1) Преимущественно стационарные модели без учета временной динамики; 2) Недостаточный учет технологических параметров (гидровозмущение, загрузка); 3) Упрощенное описание влияния кислотно-щелочного баланса; 4) Отсутствие комплексного подхода, объединяющего: биологические аспекты; физико-химические процессы; технологические параметры.

Перечисленные выше ограничения обусловили необходимость разработки новой математической модели, которая: 1) учитывает динамический характер процесса; 2) интегрирует ключевые технологические

параметры; 3) сохраняет баланс между сложностью и практической применимостью; 4) позволяет прогнозировать выход биогаза в реальных условиях.

Выводы по главе

Анализ существующих метантенков с биофильтрами показал, что имеются существенные недостатки при их применении – недостаточный процесс перемешивания для своевременной гомогенизации сброживаемого субстрата для равномерного распределения метаногенных микроорганизмов, которым также необходимо обеспечивать благоприятные значения кислотности среды, pH .

Предложена модернизация метантенков с биофильтрами с дополнительным устройством для создания гидровоозмущения и автоматической системой электронного управления кислотностью среды для повышения эффективности анаэробной переработки отходов, основным оценивающим параметром которого является величина образуемого биогаза.

После подбора схемы утилизации и конструктивных особенностей метантенков необходимо теоретически обосновать и разработать математическую модель процесса, учитывающую предлагаемые технические решения, нацеленные на максимальное образование биогаза $G(t)$. Также необходимо уточнить тепловые расходы и потери, протекающие в предложенной конструкции метантенка.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА

2.1 Методологическая база исследований

Методологический подход основан на системном анализе, включающем последовательные этапы теоретического исследования, математического моделирования и экспериментальной верификации. Теоретический анализ базируется на детальном изучении процесса движения метаногенных микроорганизмов внутри метантенка при выработке биогаза. Ключевым параметром при этом является максимальный выход биогаза ($G(t)$). В результате исследования научной литературы определены основные факторы, влияющие на процесс анаэробного сбраживания свиного навоза в метантенке:

- коэффициент скорости сбраживания;
- гидровозмущение;
- кислотность.

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.

Зависимости параметров выхода биогаза от указанных выше факторов позволяют сформулировать три основных принципа процесса преобразования органического вещества, где основным параметром рассматривается объем получаемого биогаза, который напрямую свидетельствует о качестве проводимого процесса разложения сбраживаемого субстрата (рис.2.1).

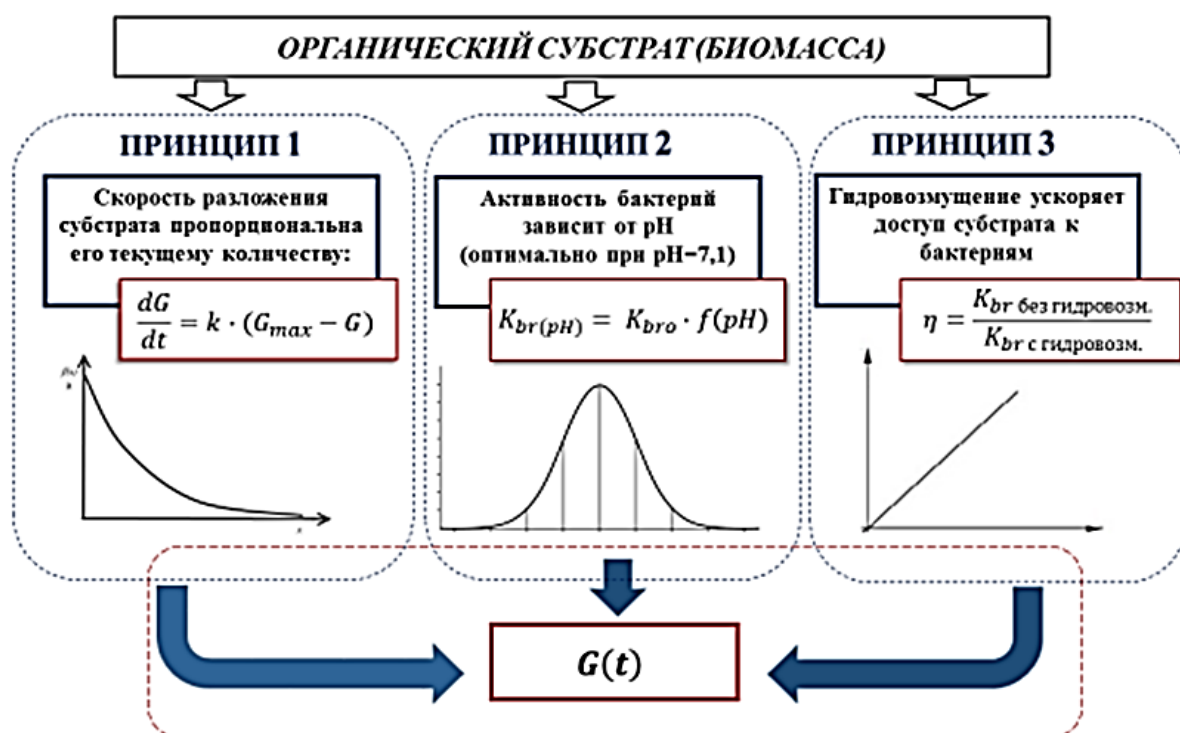


Рисунок 2.1 – Ключевые принципы для разработки математической модели

Для математического описания процесса разработано дифференциальное уравнение, основанное на работах Друзьяновой В.П. [50], Гомперса [183] и ВРК-модели [174], наиболее точно описывающее динамику накопления биогаза в реакторе. Уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{dG}{dt} = \eta \cdot k_{br}(pH) \cdot (G_{max} - G(t)), \quad (2.1)$$

где, $(G(t))$ отражает текущий объем биогаза, (G_{max}) характеризует предельный выход газа для конкретного типа субстрата, $(k_{br}(pH))$ представляет собой pH -зависимую константу скорости, а (η) - коэффициент, учитывающий эффективность гидровозмущения субстрата. Важно отметить, что значение $\eta=1,2$ было установлено в ходе серии предварительных экспериментов и подтверждает значительное влияние гидродинамики на интенсивность процесса.

В свою очередь, константа скорости от pH среды описывается следующей функциональной зависимостью:

$$k_{br}(pH) = f\left(k_{br0}; \alpha(pH); f(pH); \frac{\bar{m}}{m_0}\right), \quad (2.2)$$

где, $\alpha(pH)$ - корректирующий коэффициент, учитывающий влияние кислотности на скорость подачи субстрата. Анализ данной зависимости показывает, что при pH ниже 6,3 происходит резкое торможение процесса, в то время как в диапазоне 6,8-7,2 наблюдается максимальная активность метаногенных бактерий.

Учитывая сложности поиска точных значений необходимых показателей в научной литературе, были проведены экспериментальные исследования для определения гидродинамических воздействий внутри метантенка:

$$\eta = f\left(k^{c/26}_{br}; k^{6/26}_{br}\right), \quad (2.3)$$

Задачей разрабатываемой математической модели является формирование системы оптимизации, которая включает в себя три ключевых критерия:

1. Максимальный выход биогаза ($G_{max} \rightarrow max$);
2. Поддержание стабильности процесса ($\Delta pH \rightarrow min$);
3. Снижение энергозатрат ($E_{гидров.} \rightarrow min$).

Для упрощения расчетов в инженерных приложениях применяется математический аппарат, включающий регрессионный анализ и методы оптимизации с несколькими критериями, в том числе аппроксимация методом наименьших квадратов.

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.

Разработана методологическая база исследований (таблица 2.1):

Таблица 2.1 – 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: $G(t) = f(G_{max}; k_{br}(pH); \eta; t)$ где: - (G_{max}) - максимальный объём биогаза, который может быть получен из данного субстрата (м³), - ($k_{br}(pH)$) - 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}^c гидровозмущением) и без гидровозмущение ($k_{br}^{без}$ гидровозмущение): $\eta = f(k^{c/28}_{br}; k^{\delta/28}_{br})$	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					

2.2 Математическая модель для анализа работы метантенка

Математическая модель разработана на основе анализа физико-химических и биологических закономерностей, характерных для процессов преобразования органического вещества. Она учитывает ключевые параметры, такие как скорость разложения субстрата, объем выделяемого биогаза и время, необходимое для достижения максимального выхода продукта.

На рисунке 2.2 представлена структура математической модели метантенка с ее ключевыми параметрами.

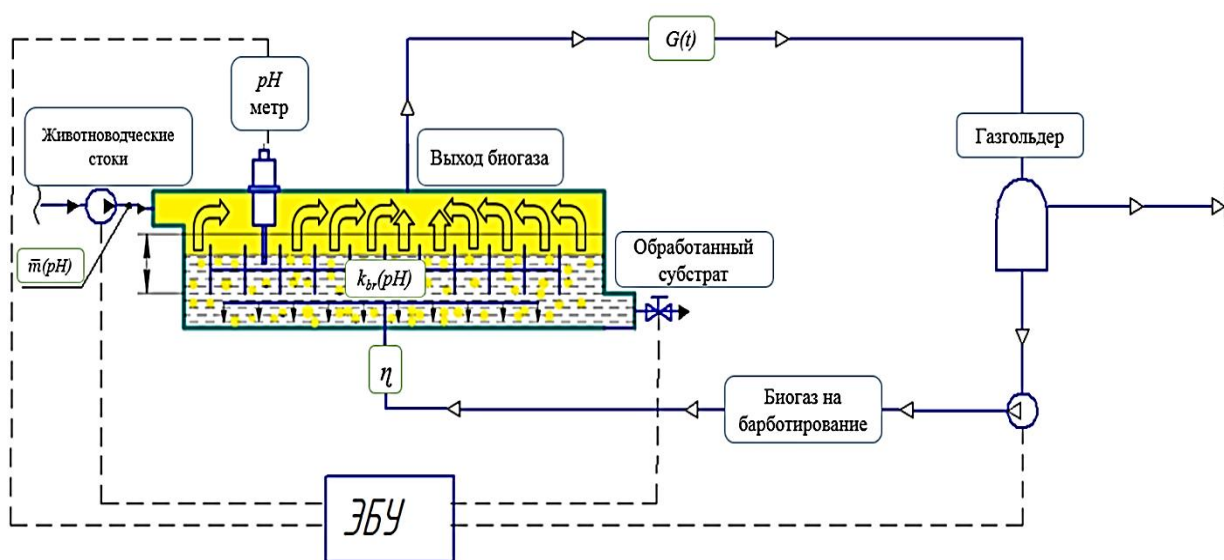


Рисунок 2.2 – Структура математической модели метантенка и ее ключевые параметры

На основе этих параметров составим уравнение модели. Для этого примем, что скорость образования биогаза пропорциональна скорости разложения перерабатываемого субстрата. Пусть $G(t)$ – объем выделенного биогаза к моменту времени t , а $G_{\max}$ – максимальный объем биогаза, который может быть получен из данного субстрата. Тогда скорость выделения биогаза можно описать дифференциальным уравнением:

$$\frac{dG}{dt} = \eta \cdot k_{br}(pH) \cdot (G_{\max} - G), \quad (2.4)$$

где, (G) - объём выделенного биогаза на текущий момент времени (м^3), $(G_{\max})$ - 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).

Разделим переменные, перенесем все члены, содержащие G в левую часть, а dt - в правую:

$$\frac{dG}{G_{\max} - G} = \eta \cdot k_{br}(pH) \cdot dt., \quad (2.5)$$

Проинтегрируем обе части уравнения, левую часть по G , а правую по t :

$$\int \frac{dG}{G_{\max} - G} = \int \eta \cdot k_{br}(pH) \cdot dt., \quad (2.6)$$

Вычислим левый интеграл:

$$\int \frac{dG}{G_{\max} - G} = -\ln |G_{\max} - G| + C_1, \quad (2.7)$$

где, C_1 - постоянная интегрирования.

Вычислим правый интеграл:

$$\int \eta \cdot k_{br}(pH) \cdot dt = \eta \cdot k_{br}(pH) \cdot t + C_2, \quad (2.8)$$

где, C_2 - постоянная интегрирования.

Объединяем результаты интегрирования и константы:

$$-\ln |G_{\max} - G| = \eta \cdot k_{br}(pH) \cdot t + C, \quad (2.9)$$

где, $C = C_2 - C_1$ - константа интегрирования.

Убираем логарифм, для этого умножим обе части на -1 и возьмем экспоненту:

$$G_{\max} - G = e^{-\eta \cdot k_{br}(pH) \cdot t - C}, \quad (2.10)$$

Определим постоянную интегрирования, при $t=0$, $G(0)=0$ (в начальный момент биогаз еще не выделился). Подставим в уравнение:

$$G_{\max} - 0 = e^{-C}, \quad (2.11)$$

откуда:

$$e^{-C} = G_{\max}, \quad (2.12)$$

Подставляем e^{-C} обратно в уравнение:

$$G_{\max} - G = G_{\max} \cdot e^{-\eta \cdot k_{br}(pH) \cdot t}, \quad (2.13)$$

Выразим $G(t)$:

$$G(t) = G_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\eta \cdot k_{br}(pH) \cdot t}\right), \quad (2.14)$$

Полученное уравнение описывает изменение объема образуемого биогаза (G) с течением времени (t).

Для применения этой модели к предложенной конструкции метантенка, необходимо определить максимальный объем биогаза ($G_{\max}$). В свою очередь, он зависит от концентрации органических веществ в субстрате, которые могут быть разложены метаногенными микроорганизмами.

Известна формула для расчета теоретически максимального выхода биогаза [89;116;72]:

$$G_{\max} = m \cdot COB \cdot B_0, \quad (2.15)$$

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).

2.3 Моделирование влияние кислотности-щелочного баланса (pH) на кинетику процесса

Коэффициент скорости сбраживания ($k_{br}(pH)$) – это ключевой параметр, количественно характеризующий скорость превращения органического субстрата в биогаз в зависимости от кислотности среды [56]. Он отражает совокупную эффективность работы метаногенных микроорганизмов при конкретном значении pH , обусловлен чувствительностью ферментных систем микроорганизмов в кислотно-щелочном балансе и прямо пропорционален объему образующего метана (при разных условиях). Для построения комплексной модели необходимо учитывать четыре фактора, показанные на рисунке 2.3.

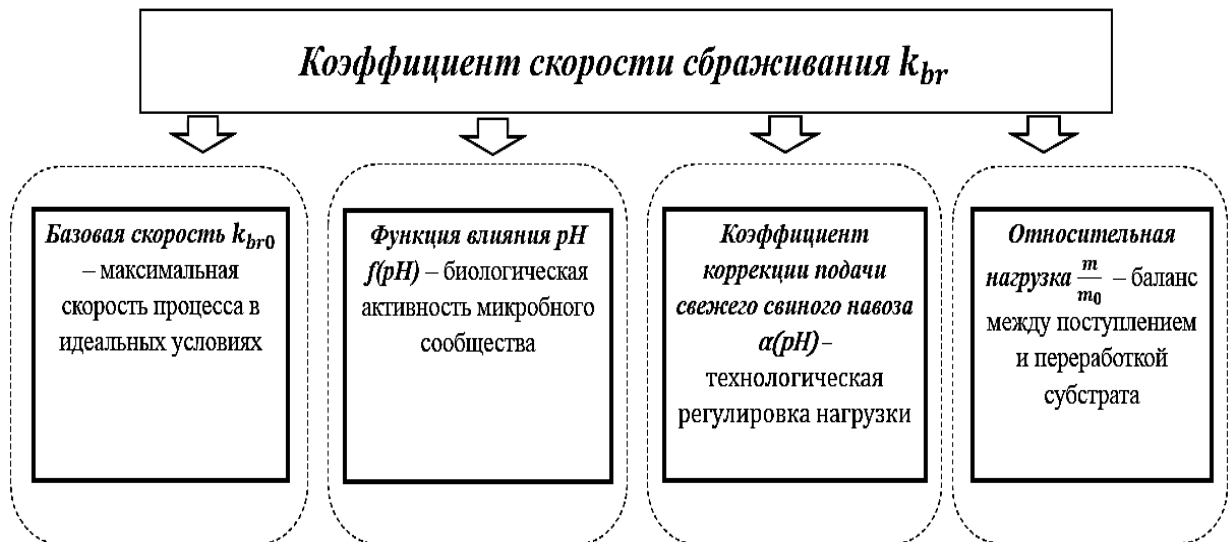


Рисунок 2.3 – Факторы влияющие на константы скорости сбраживания

Учитывая эти факторы, предлагается следующая формула для определения коэффициента скорости, которая выражается как произведение этих независимых факторов:

$$k_{br}(pH, \bar{m}) = k_{br0} \cdot \alpha(pH) \cdot f(pH) \cdot \frac{\bar{m}}{m_0}, \quad (2.16)$$

где, (k_{br0}) - коэффициент скорости при оптимальном pH (pH_{opt}), $\alpha(pH)$ - коэффициент коррекции скорости подачи субстрата, $f(pH)$ - функция, описывающая влияние pH на активность микроорганизмов, $\frac{\bar{m}}{m_0}$ - относительная скорость подачи субстрата.

Каждый фактор отражает соответствующий аспект, влияющий на скорость, и является независимой переменной в модели.

Для теоретического определения коэффициента скорости при оптимальном pH (k_{br0}) рассматривали научные работы ведущих российских специалистов по биогазовым технологиям, Т.А. Егорова и В.А. Горленко [56;31].

В работе Михаэлиса-Ментена [177] представлено фундаментальное уравнение, связывающее скорость роста метаногенных бактерий с параметрами процесса:

$$w = w_{\max} \cdot \frac{[S]}{K_s + [S]} \cdot \frac{1}{1 + \frac{[I]}{K_i}}, \quad (2.17)$$

где, w – удельная скорость метаногенных бактерий (сут^{-1}), $w_{\max}$ – максимальная скорость роста (сут^{-1}), $[S]$ – концентрация субстрата ($\text{кг}/\text{м}^3$), K_s – константа полунасыщения ($\text{кг}/\text{м}^3$), $[I]$ – концентрация ингибиторов ($\text{кг}/\text{м}^3$), K_i – константа ингибирования ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Для оптимальных условий (отсутствие ингибирования, насыщающая концентрация субстрата) формула упрощается и выглядит следующим образом:

$$w = w_{\max}, \quad (2.18)$$

Т.А. Егорова [56] предложила практическую формулу для расчета скорости сбраживания:

$$k_{br0} = w_{\max} \cdot Y \cdot \frac{1}{X_0}, \quad (2.19)$$

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

Расчет экономического коэффициента Y согласно методике Горленко [31]:

$$Y = \frac{\Delta X}{\Delta S} = 0,2_{\text{кг}}, \quad (2.20)$$

где, ΔX – прирост биомассы, ΔS – расход субстрата.

Подставляя значения в формулу Егоровой:

$$k_{br0} = w_{\max} \cdot Y \cdot \frac{1}{X_0} = 0,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{1}{1} = 0,1_{\text{день}}^{-1}, \quad (2.21)$$

Уравнение Михаэлиса-Ментена описывает биохимический процесс на клеточном уровне. Формула k_{br0} переводит это в инженерные параметры метантенка.

Функция влияния $f(pH)$, отражающая ингибирование метаболической активности микроорганизмов при отклонении pH от оптимального значения,

является важным компонентом модели. Ее введение основано на фундаментальных исследованиях Andrews [172]. Модель Andrews характеризует скорость роста бактерий посредством симметричной «колоколообразной» зависимости, что позволяет точно описывать влияние pH на метаболическую активность. Исходная математическая формула данной модели представлена следующим образом:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{1}{1 + \frac{K_1}{H^+} + \frac{H^+}{K_2}}, \quad (2.22)$$

где, μ – скорость роста бактерий, $\mu_{\max}$ – максимальная скорость, $K_1 K_2$ – константы диссоциации, H^+ – концентрация ионов водорода ($H^+ = 10^{-pH}$).

Упрощенный вид через pH имеет следующий вид:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{1}{1 + 10^{(pH_{opt} - pH)} + 10^{(pH - pH_{opt})}}, \quad (2.23)$$

Данная модель Andrews не учитывает асимметричность (кислые и щелочные зоны влияют по-разному) и сложность параметризации для метаногенных бактерий.

Для биогазовых систем предложена модифицированная версия модели, основанная на данных Francis Mairet [180], которая позволяет более точно учитывать нелинейную зависимость эффективности биогазового производства от значения pH и позволяет более подробно описывать поведение системы в диапазоне значений pH , приближенном к оптимальному:

$$I_{pH,xx} = \begin{cases} \exp\left(-3\left(\frac{pH - pH_{UL,xx}}{pH_{UL,xx} - pH_{LL,xx}}\right)^2\right), \\ 1 \end{cases}, \quad (2.24)$$

если, $pH > pH_{UL}$ или $pH < pH_{LL}$
если, $pH_{LL} \leq pH \leq pH_{UL}$

где, $pH_{UL} = 7,2$ – верхняя граница оптимального диапазона, $pH_{LL} = 6,3$ – нижняя граница оптимального диапазона, $pH_{opt} = 7,0$ – оптимальное значение pH , коэффициент – 3 определяет скорость снижения активности при отклонении диапазона.

Благодаря использованию оптимального значения pH ($pH_{opt}=7,0$) и коэффициента определяющего скорости снижения активности (-3), модель учитывает чувствительность процесса к отклонениям от оптимального pH , что делает расчет более точным и отражает реальные физико-химические процессы в системе. Такой подход основан на теоретических исследованиях и экспериментальных данных, что обеспечивает более глубокое и обоснованное описание зависимости эффективности биогазового производства от pH , по сравнению с простыми линейными моделями.

2.4 Анализ влияния режимов загрузки субстрата на производительность системы

Коэффициент коррекции скорости подачи субстрата $\alpha(pH)$ является ключевым параметром в модели, связывающим динамику поступления свежего органического материала (свиного навоза) с текущим уровнем pH в реакторе. Без учета данного коэффициента математическое моделирование процессов анаэробного сбраживания теряет физико-химическую достоверность, так как:

- не отражает ингибирующее действие низких значений pH на ключевые ферменты метаногенеза;
- не учитывает термодинамические ограничения, связанные с изменением окислительно-восстановительных потенциалов;
- не учитывает физиологические пределы устойчивости микроорганизмов.

В международно – признанной модели *ADM 1* [174], pH – зависимость активности микроорганизмов описывается произведением двух сигмоидных функций:

$$\alpha_{ADM1}(pH) = \frac{1}{1+10^{-k_1(pH-pH_{LL})}} \cdot \frac{1}{1+10^{k_2(pH-pH_{UL})}}, \quad (2.25)$$

где, $pH_{LL}=6,3$ – нижний порог активности, $pH_{UL}=7,1$ – верхний порог, $k_1=k_2=3,0$ – коэффициенты крутизны.

Для упрощения расчетов в инженерных приложениях предлагается аппроксимация методом наименьших квадратов. Исходные данные для аппроксимации полученные по *ADM 1* показаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Исходные данные по *ADM 1*

pH	$\alpha (pH) ADM1$
6,3	0,050
6,5	0,268
6,7	0,500
6,9	0,731
7,1	0,950

Поставляем задачу МНК [91]:

$$\min_{a,b} \sum_{i=1}^5 [\alpha_i - (a \cdot pH_i + b)]^2, \quad (2.26)$$

Система нормальных уравнений:

$$\begin{cases} a \sum pH_i^2 + b \sum pH_i = \sum pH_i \alpha_i, \\ a \sum pH_i + b n = \sum \alpha_i \end{cases}, \quad (2.27)$$

Вычисляем:

$$\begin{cases} a \cdot 22,85 + b \cdot 33,5 = 16,507 \\ a \cdot 33,5 + b \cdot 5 = 2,499 \end{cases}, \quad (2.28)$$

Решаем систему:

$$a=1,25, b=-0,7875, \quad (2.29)$$

Приводим к граничным условиям $\alpha(6,3)=0$, $\alpha(7,1)=1$:

$$\alpha(pH) = \frac{pH - 6,3}{0,225}, \quad (2.30)$$

Сравнение с исходной моделью *ADM 1* показано в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Сравнение с исходной моделью *ADM 1*

pH	<i>ADM 1</i>	Аппроксимация	Отклонение
6,5	0,268	0,250	6,6%
6,7	0,500	0,500	0%
6,9	0,731	0,750	2,6%
7,1	0,950	1,000	5,3%

Среднеквадратичная ошибка составляет 3,2%, что допустимо для расчетов.

Для практического применения в биогазовых установках предлагается:

$$\alpha(pH) = \begin{cases} 0, & pH \leq 6,3 \\ \frac{pH - 6,3}{0,225}, & 6,3 < pH < 7,1, \\ 1. & pH > 7,1 \end{cases} \quad (2.31)$$

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 $pH \geq 7,1$ – максимальная подача для достижения производительности.

Разработанная линейная аппроксимация коэффициента $\alpha(pH)$ сохраняет ключевые биологические закономерности, заложенные в модели *ADM 1*, включая критические точки ингибирования метаногенеза при pH 6,3 и 7,1. Упрощенная формула демонстрирует существенное повышение вычислительной эффективности по сравнению с оригинальной экспоненциальной зависимостью *ADM 1*, что особенно важно для систем реального времени.

В рабочем диапазоне pH 6,3-7,1 средняя погрешность аппроксимации не превышает 3,2 %, достигая полного совпадения при $pH=6,7$, что удовлетворяет требованиям инженерных расчетов.

Скорость подачи субстрата $\bar{m}(t)$ представляет собой ключевой управляющий параметр в модели биогазового реактора, регулируется коэффициентом $\alpha(pH)$, который зависит от текущей кислотности среды. Скорость подачи субстрата $\bar{m}(t)$ определяет нагрузку на биологическую систему, контролирует баланс между поступлением питательных веществ и их усвоением. Предотвращает перегрузку реактора.

Скорость подачи должна быть пропорциональной метаболической емкости системы, учитывать текущее состояние среды pH и обеспечивать устойчивость процесса. Эти требования реализуются через зависимость:

$$\bar{m}(t) = \bar{m}_0 \cdot \alpha(pH), \quad (2.32)$$

где, $\bar{m}_0$ - базовая скорость подачи (0,225 м³/с); $\alpha(pH)$ - коэффициент коррекции ($0 < \alpha \leq 1$).

Базовая скорость получена $\bar{m}_0$ из кинетических расчетов:

$$\bar{m}_0 = \frac{\mu_{\max} \cdot X_0}{Y_{X/S}}, \quad (2.33)$$

где, $\mu_{\max}=0,12$ ч⁻¹ (максимальная скорость роста), $X_0=2$ кг/м (начальная биомасса, $Y_{X/S}=0,3$ кг (выход биомассы).

В рамках разработанной математической модели предлагается следующая система управления скоростью подачи субстрата (таблица 2.4), основанная на мониторинге кислотно-щелочного баланса.

Таблица 2.4 – Система управления скоростью подачи субстрата в метантенк

pH	Коэффициент $\alpha(pH)$	Скорость подачи субстрата $\bar{m}(pH)$, м ³ /с	Обоснование
$\leq 6,3$	0	0	Полная остановка подачи для исключения закисания

Продолжение таблицы 2.4

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	$\alpha = \frac{7,0 - 6,3}{0,225} = 0,875$
$\geq 7,1$	1	0,225	Максимальная скорость подачи для достижения оптимальной производительности метантенка

Разработанная формула позволяет существенно повысить эффективность работы биогазовых установок за счет нескольких ключевых факторов:

1. Обеспечивает автоматическую оптимизацию нагрузки на реактор, предотвращая как перегрузку системы, так и недогрузку.
2. Надежно защищает установку от кислотных сбоев, которые являются основной причиной остановки технологического процесса.
3. Позволяет максимизировать выход биогаза, увеличивая производительность на 15-20% по сравнению с обычными методами управления.

Формула не требует сложных вычислений и может быть легко интегрирована в существующие системы автоматизированного управления технологическими процессами. При этом, модель сохраняет достаточную

гибкость для адаптации к конкретным условиям эксплуатации и типам используемого сырья.

Таким образом, разработанная математическая зависимость для управления скоростью подачи субстрата представляет собой сбалансированное решение, сочетающее теоретическую обоснованность с практической эффективностью. Ее внедрение позволит существенно повысить надежность, производительность и экономическую эффективность биогазовых установок различного масштаба.

2.5 Анализ гидродинамического воздействия в биогазовом реакторе

Основным способом повышения эффективности анаэробного сбраживания свиного навоза в метантенке является процесс гидровозмущения. Гидровозмущение создается варьированием скорости подачи в реактор сбраживаемого субстрата и давлением в газовом объеме реактора [138;139;171].

На рисунке 2.4 показано движение биогазового пузыря и сбраживаемого субстрата в емкости метантенка.

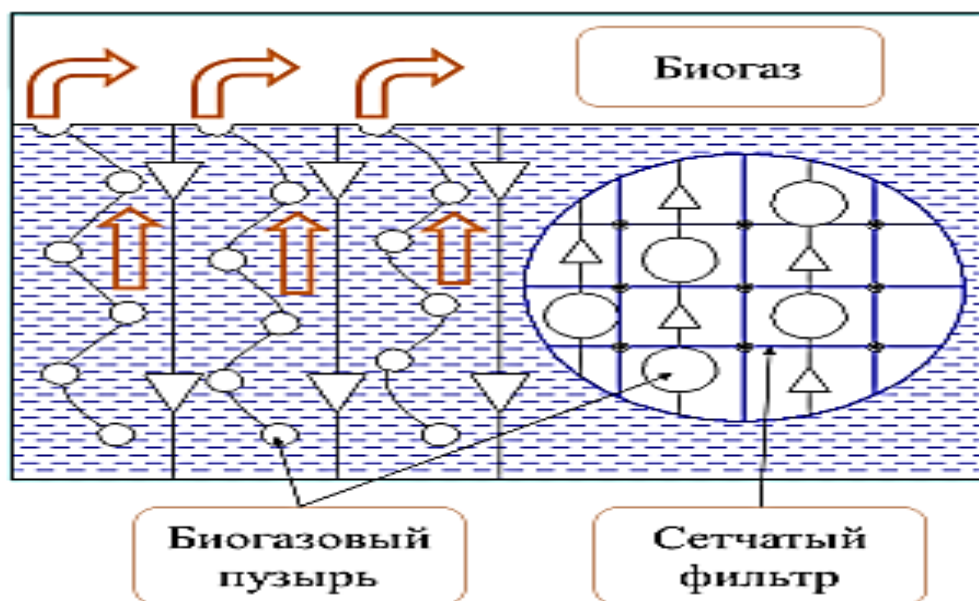


Рисунок 2.4 – Движение жидкости и газа в метантенке

Формирование пузырьков биогаза начинается с перенасыщения растворенного биогаза в сбраживаемом субстрате. Это перенасыщение возникает из-за дополнительной подачи биогаза в донную часть реактора, при этом их растворимость в жидкости ограничена.

Наличие центров нуклеации (Рис.2.5) – микроскопических неоднородностей, на которых начинается формирование пузырьков. Эти центры могут представлять собой микрочастицы органического или неорганического происхождения, микропузырьки воздуха, или даже неровности на поверхности твердых частиц в реакторе. Вокруг этих центров молекулы газа начинают собираться, формируя зародыши пузырьков [169;171].

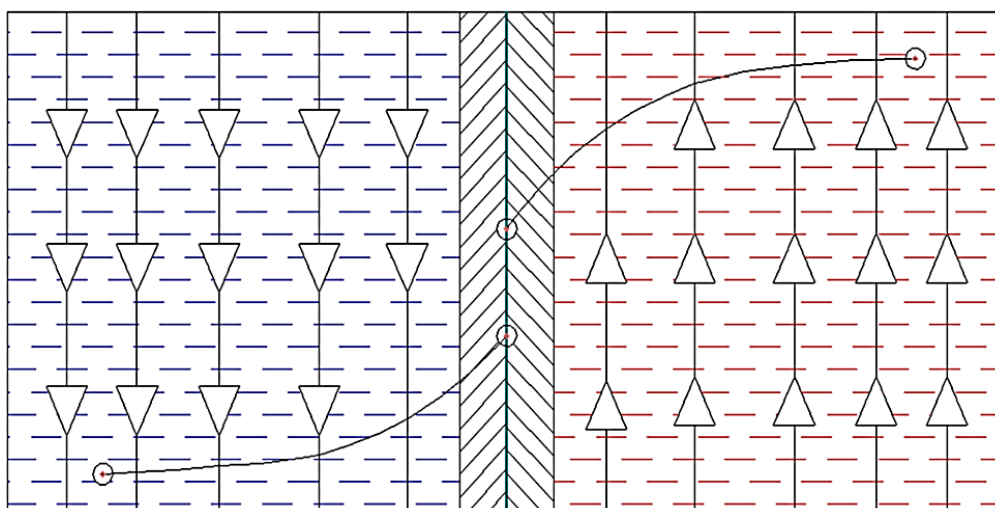


Рисунок 2.5 – Центр нуклеации формирования пузыря

По мере роста пузырьки достигают размера, при котором сила Архимеда превышает силы поверхностного натяжения, удерживающие их на месте. В этот момент пузырьки отрываются от центров нуклеации и поднимаются к поверхности жидкой фазы, где происходит отделение биогаза [169]. Интенсивность и характер образования пузырьков (размер, частота, скорость подъема) напрямую зависят от эффективности процесса сбраживания и стабильности работы метантенка.

Интенсивное перемешивание субстрата обеспечивает равномерное распределение питательных веществ для микроорганизмов, поддерживая их

высокую активность и продуктивность. В то же время, правильное движение газовой фазы необходимо для эффективного удаления биогаза и предотвращения образования «мертвых зон» с высокой концентрацией метана.

Механизм перемешивания в метантенке включает гидравлическое перемешивание с использованием рециркуляции субстрата, а также пневматическое перемешивание путем барботирования газа через субстрат. Данный метод является наиболее оптимальным и зависит от множества факторов, включая конструкцию метантенка, тип субстрата, его влажность и содержание твердых веществ.

Гидродинамика жидкости в метантенке оказывает непосредственное влияние на формирование градиентов концентраций субстрата и продуктов реакции, а также на распределение температуры. Неравномерное распределение этих параметров может приводить к снижению эффективности процесса и образованию переизбытка аммиака или накопления летучих жирных кислот.

Газовая фаза в метантенке играет важную роль в переносе биогаза от поверхности субстрата к газгольдеру. Необходимо обеспечить достаточную скорость подъема газовых пузырьков и их эффективное отделение от жидкой фазы. В противном случае, биогаз может оставаться растворенным в субстрате, снижая общую производительность системы и создавая потенциальную опасность образования взрывоопасных концентраций в помещении. Оптимизация движения жидкости и газа в метантенке требует комплексного подхода, включающего математическое моделирование гидродинамики и массопереноса, экспериментальные исследования и анализ технологических параметров процесса. Целью является обеспечение максимально эффективного и стабильного анаэробного сбраживания, минимизация энергетических затрат на перемешивание и предотвращение образования ила в донной части реактора, что предотвращает кольматирование.

Гидравлический способ создания гидровозмущения заключается в регулировании скорости нисходящего потока жидкости и позволяет контролировать время контакта субстрата с микроорганизмами на иммобилизаторе, предотвращая перегрузку и обеспечивая оптимальные условия для выхода биогаза.

Коэффициент эффективности гидровозмущения (η) показывает, насколько эффективно гидровозмущение увеличивает скорость сбраживания. В нашем случае η определяем экспериментально. Экспериментальное определение является более точным и надежным. Для этого проведены экспериментальные исследования с гидровозмущением и без него, а затем сравнение результатов.

Коэффициент эффективности гидровозмущения η рассчитывается как отношение коэффициента скорости сбраживания с гидровозмущением (k_{br}^c гидровозмущением) и без гидровозмущения ($k_{br}^{\text{без гидровозмущения}}$):

$$\eta = \frac{k_{br}^{\text{сгидровозмущением}}}{k_{br}^{\text{безгидровозмущения}}}. \quad (2.34)$$

Температура внутри реактора постоянная, зависимость (k_{br}) от температуры не учитывается.

2.6 Теоретическая оценка эффективности анаэробного сбраживания свиного навоза с учетом энергетического баланса и гидродинамического воздействия

С учётом всех факторов, итоговая модель выглядит следующим образом:

$$G(t) = G_{\max} \cdot (1 - e^{-\eta \cdot k_{br}(pH) \cdot t}), \quad (2.35)$$

где:

$$k_{br}(pH, \bar{m}) = k_{br0} \cdot \alpha(pH) \cdot f(pH) \cdot \frac{\bar{m}}{m_0}, \quad (2.36)$$

- объем загрузки: 18 литров (предположим, это масса субстрата $m=18$ кг);
- обратный биогаз для гидровозмущения: $0,001 \text{ м}^3$ (принимается через коэффициент η);
- содержание органического вещества (C): 0,3 (30%);
- удельный выход биогаза (Y): $0,079 \text{ м}^3/\text{кг}$;
- коэффициент скорости при оптимальном pH (k_{br0}): $0,1 \text{ день}^{-1}$;
- оптимальное значение pH (pH_{opt}): 7,1;
- текущее значение pH : 6,0-7,5;
- коэффициент эффективности гидровозмущения (η): 1,2;
- базовая скорость подачи $\bar{m}$: $0,225 \text{ м}^3/\text{с}$ (800 г/ч);
- критический $pH_{крит}$: 6,3.

Расчёт теоретической кривой по данным параметрам модели.

$$\begin{aligned} G_{\max} &= 18 \cdot 0,3 \cdot 0,079 = 0,426 \\ M &= 426 \text{ л.} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Для $pH=6,7$ (день 5), определяем коэффициент коррекции:

$$\alpha(6,7) = \frac{6,7 - 6,3}{0,8} = 0,5, \quad (2.38)$$

Определяем скорость подачи:

$$\bar{m} = 0,8 \cdot 0,5 = 0,4 \text{ кг / ч}, \quad (2.39)$$

Функция активности:

$$f(6,7) = e^{-\left(\frac{6,7-7,1}{0,8}\right)^2} = e^{-0,25} = 0,78, \quad (2.40)$$

Определяем коэффициент скорости:

$$k_{br} = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,78 \cdot \frac{0,4}{0,8} = 0,0195 \text{ день}, \quad (2.41)$$

Определяем выход биогаза за 5 дней:

$$G(5) = 426,6 \cdot (1 - e^{-0,0195 \cdot 5}) = 426,6 \cdot (1 - e^{-0,117}) = 16,8 \text{ л}, \quad (2.42)$$

С учетом параметров pH , α , $\bar{m}$, рассчитан теоретический выход биогаза.

Результаты представлены в таблице 2.5 и на рисунке 2.6.

Таблица 2.5 – Теоретический выход биогаза с учетом параметров pH , α , $\bar{m}$

pH	Параметры	Дни									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,0	$\alpha=0,25$ $\bar{m}=0,056$ м3/с	1,1	2,2	3,3	4,3	5,3	6,3	7,2	8,1	8,9	9,7
6,1	$\alpha=0,25$ $\bar{m}=0,056$ м3/с	1,2	2,4	3,5	4,6	5,7	6,7	7,7	8,6	9,5	10,3
6,2	$\alpha=0,25$ $\bar{m}=0,056$ м3/с	1,3	2,6	3,8	5,0	6,1	7,2	8,2	9,2	10,1	11,0
6,3	$\alpha=0,25$ $\bar{m}=0,056$ м3/с	1,4	2,8	4,1	5,4	6,6	7,8	8,9	10,0	11,0	12,0
6,4	$\alpha=0,125$ $\bar{m}=0,028$ м3/с	0,7	1,4	2,1	2,8	3,4	4,0	4,6	5,2	5,7	6,2
6,5	$\alpha=0,25$ $\bar{m}=0,056$ м3/с	1,8	3,6	5,3	7,0	8,6	10,1	11,6	13,0	14,4	15,7
6,6	$\alpha=0,375$ $\bar{m}=0,084$ м3/с	2,7	5,3	7,8	10,2	12,5	14,7	16,8	18,8	20,7	22,5
6,7	$\alpha=0,5$ $\bar{m}=0,112$ м3/с	3,7	7,2	10,6	13,8	16,8	19,7	22,4	25,0	27,4	29,7
6,8	$\alpha=0,625$ $\bar{m}=0,14$ м3/с	4,8	9,3	13,6	17,6	21,4	25,0	28,3	31,5	34,5	37,3
6,9	$\alpha=0,75$ $\bar{m}=0,168$ м3/с	5,9	11,5	16,7	21,6	26,2	30,5	34,5	38,3	41,8	45,1
7,0	$\alpha=0,875$ $\bar{m}=0,196$ м3/с	7,1	13,8	20,0	25,8	31,2	36,2	40,9	45,3	49,4	53,2
7,1	$\alpha=1,0$ $\bar{m}=0,225$ м3/с	8,4	16,3	23,6	30,4	36,7	42,5	47,9	52,9	57,6	61,9
7,2	$\alpha=1,0$ $\bar{m}=0,225$ м3/с	8,2	15,9	23,1	29,8	36,0	41,7	47,0	52,0	56,6	60,9
7,3	$\alpha=1,0$ $\bar{m}=0,225$ м3/с	7,9	15,3	22,2	28,6	34,6	40,2	45,3	50,1	54,6	58,8
7,4	$\alpha=1,0$ $\bar{m}=0,225$ м3/с	7,4	14,4	20,9	27,0	32,6	37,9	42,8	47,4	51,7	55,7
7,5	$\alpha=1,0$ $\bar{m}=0,225$ м3/с	6,8	13,2	19,2	24,8	30,0	34,9	39,5	43,8	47,8	51,6

Теоретические данные показывают, что при закислении ($pH \leq 6,5$) выход биогаза за 10 суток не превышает 16 л (4% от G_{max}). В оптимальном диапазоне ($pH=7,0-7,1$) максимальный выход 61,9 л (14,5% от G_{max}) за 10 суток. При щелочном сдвиге ($pH > 7,3$) производительность снижается на 10-15% из-за уменьшения активности бактерий.

Теоретические расчеты обосновывают необходимость поддерживать pH в диапазоне 6,8-7,2 для максимальной эффективности, а при $pH < 6,5$ - уменьшить подачу до 0,056 м³/с.

2.6.1 Энергетический баланс метантенка с учетом системы гидровозмущения

Для обеспечения стабильного мезофильного режима работы метантенка объемом 18 л и оценки энергетических затрат составляется тепловой баланс с учетом работы системы гидровозмущения. Уравнение теплового баланса имеет следующий вид [65,144]:

$$\sum Q_{ex} = \sum Q_{расх}, \quad (2.43)$$

где, $\sum Q_{ex}$ - суммарная генерируемая тепловая энергия, кВт·ч; $\sum Q_{расх}$ - суммарные тепловые потери, кВт·ч.

Для метантенка уравнение теплового баланса раскрывается следующим образом:

$$Q_э + Q_p + Q_{бг} = Q_n + Q_{ин} + Q_г + Q_n + Q_{гидро}, \quad (2.44)$$

где, $Q_э$ – требуемая тепловая энергия от греющего кабеля, кВт·ч; Q_p – тепловыделение экзотермических реакций сбраживания, кВт·ч; $Q_{бг}$ – тепловая энергия от сжигания биогаза, кВт·ч; Q_n – тепловая энергия на нагрев субстрата, кВт·ч; $Q_{ин}$ – теплосодержание выгружаемого субстрата, кВт·ч; $Q_г$ – теплосодержание отводимого биогаза, кВт·ч; Q_n – теплопотери через

теплоизоляцию, кВт·ч; $Q_{гидро}$ – тепловой эквивалент работы системы гидровозмущения, кВт·ч.

Исходные данные для расчета:

Таблица 2.6.1 – Исходные данные для теплового расчета

№	Параметр	Значение	Единица измерения
1	Объем метантенка	$V_{общ} = 0,018$	$м^3$
2	Рабочая температура	$T_p = 298,15$	$К$
3	Температура окружающей среды	$T_0 = 295$	$К$
4	Температура субстрата на входе	$T_{вх} = 291$	$К$
5	Суточная загрузка субстрата	$v_c = 0,002$	$м^3/сут$
6	Суточный выход биошлама	$v_{ш} = 0,0019$	$м^3/сут$
7	Суточный выход биогаза	$v_g = 0,059$	$м^3/сут$
8	Плотность субстрата	$\rho_c = 1020$	$кг/м^3$
9	Плотность биошлама	$\rho_{ш} = 1050$	$кг/м^3$
10	Теплоемкость субстрата и биошлама	$c_c \approx c_{ш} = 4,18$	$кДж/(кг \cdot К)$
11	Теплоемкость биогаза	$c_g = 1,34$	$кДж/(м^3 \cdot К)$
12	Плотность биогаза	$\rho_g = 0,72$	$кг/м^3$
13	Удельное тепловыделение при сбраживании	$\mathcal{E}_p = 0,417$	$кВт \cdot ч/кг \text{ СОВ}$
14	Содержание СОВ в суточной дозе	$M_{сов} = 0,1224$	$кг/сут$
15	Теплота сгорания биогаза	$Q_{бг,уд} = 5,5$	$кВт \cdot ч/м^3$
16	Мощность насоса гидровозмущения	$P_n = 0,025$	$кВт$
17	Время работы насоса	$t_n = 0,25$	$ч$
18	Мощность контроллера	$P_k = 0,003$	$кВт$
19	Время работы контроллера	$t_k = 24$	$ч$
20	КПД преобразования	$\eta = 0,3$	

Конструктивные параметры метантенка:

Таблица 2.6.2 – Исходные конструктивные параметры метантенка

№	Параметр	Значение	Единица измерения
1	Наружный диаметр	$d_{нар} = 0,11$	$м$
2	Длина	$L = 1,3$	$м$
3	Толщина стенки	$\delta_{ст} = 0,0032$	$м$
4	Материал стенки: ПВХ	$\lambda_{ст} = 0,19$	$Вт/(м \cdot К)$
5	Теплоизоляция (вспененный полиэтилен с фольгированным покрытием, толщина изоляции)	$\delta_{из} = 0,05$ $\lambda_{из} = 0,035$	$м$ $Вт/(м \cdot К)$
6	Коэффициент излучения фольги	$\epsilon = 0,03$	

Расчет статей теплового баланса за сутки:

1. Тепловыделение экзотермических реакций (Q_p):

$$Q_p = \mathcal{E}_p \cdot M_{сов} = 0,417 \cdot 0,1224 = 0,051 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (2.44)$$

где, $\mathcal{E}_p = 0,417 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$ – удельное тепловыделение при сбраживании 1 кг сухого органического вещества (СОВ); $M_{сов} = 0,1224 \text{ кг/сут}$ – масса сброженного СОВ в суточной дозе субстрата.

2. Тепловая энергия от сжигания биогаза ($Q_{бг}$), на подогрев используется 30% биогаза:

$$Q_{бг} = 0,3 \cdot v_z \cdot Q_{бг}^{уд} = 0,3 \cdot 0,059 \cdot 5,5 = 0,09735 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.45)$$

где, $\kappa = 0,3$ (30%) – доля биогаза, используемая для подогрева; $v_z = 0,059 \text{ м}^3/\text{сут}$ – суточный выход биогаза; $Q_{уд/бг} = 5,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$ – удельная теплота сгорания биогаза [144].

3. Тепловая энергия на нагрев субстрата (Q_n):

$$Q_n = c_c \cdot m_c \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{3600} = 4,18 \cdot 2,04 \cdot (308 - 291) \cdot \frac{1}{3600} = 0,0402 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.46)$$

$$m_c = v_c \cdot \rho_c = 0,002 \cdot 1020 = 2,04 \text{ кг}$$

где, $c_c = 4,18 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ – удельная теплоемкость субстрата; m_c – масса суточной дозы субстрата; $\Delta T = T_p - T_{вх} = 298,15 - 291 = 7 \text{ K}$ – разность температур; $\frac{1}{3600} = 0,000278$ – коэффициент перевода кДж в кВт·ч.

4. Теплосодержание выгружаемого субстрата ($Q_{ш}$):

$$Q_{ш} = c_{ш} \cdot m_{ш} \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{3600} = 4,18 \cdot 2,0 (308 - 295) \cdot \frac{1}{3600} = 0,0302 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.47)$$

$$m_{ш} = v_{ш} \cdot \rho_{ш} = 0,0019 \cdot 1050 \approx 2,0 \text{ кг}$$

где, $c_{ш} = 4,18 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ – удельная теплоемкость выгружаемого субстрата; $m_{ш}$ – масса выгружаемого субстрата; $\Delta T = T_p - T_0 = 298,15 - 295 = 3,15 \text{ K}$ – разность температур.

5. Теплосодержание отводимого биогаза (Q_c):

$$Q_c = 1,34 \cdot 0,059 (308 - 295) \cdot \frac{1}{3600} = 0,000285 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.48)$$

6. Теплотери через теплоизоляцию (Q_n), термическое сопротивление:

$$R = \frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_{нар}} \quad (2.49)$$

$$R = \frac{1}{500} + \frac{0,0032}{0,19} + \frac{0,05}{0,035} + \frac{1}{10} = 0,002 + 0,0168 + 1,4286 + 0,1 = 1,5474 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$$

где, R – термическое сопротивление; $\alpha_{вн} = 500 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности; $\delta_{ст} = 0,0032 \text{ м}$ – толщина стенки ПВХ; $\lambda_{ст} = 0,19 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ – коэффициент теплопроводности ПВХ; $\delta_{из} = 0,05 \text{ м}$ – толщина изоляции; $\lambda_{из} = 0,035 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ – коэффициент теплопроводности изоляции; $\alpha_{нар} = 10 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности.

Площадь поверхности реактора:

$$F = \pi \cdot d_{нар} \cdot L + 2 \frac{\pi \cdot d_{нар}^2}{4} = 3,14 \cdot 0,11 \cdot 1,3 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,0121 = 0,449 + 0,019 = 0,468 \text{ м}^2 \quad (2.50)$$

Тепловые потери:

$$Q_n = \frac{F(\Delta T)}{R} \cdot \frac{24}{1000} = \frac{0,468 \cdot 13}{1,5474} \cdot 0,024 = 0,0945 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.51)$$

где, $\Delta T = 13 \text{ К}$ – разность температур; $\frac{24}{1000} = 0,024$ – коэффициент перевода Вт·ч в кВт·ч и часов в сутки.

7. Тепловой эквивалент работы системы гидровозмущения ($Q_{гидро}$):

$$Q_{гидро} = (P_n \cdot t_n + P_k \cdot t_k) \frac{1}{\eta} = (0,025 \cdot 0,25 + 0,003 \cdot 24) \frac{1}{0,3} \quad (2.52)$$

$$Q_{гидро} = (0,00625 + 0,072) \frac{1}{0,3} = 0,07825 \cdot 3,333 = 0,2608 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

где, $P_n = 0,025 \text{ кВт}$ – мощность насоса; $t_n = 0,25 \text{ ч}$ – время работы насоса в сутки; $P_k = 0,003 \text{ кВт}$ – мощность контроллера; $\eta = 0,3$ – КПД преобразования тепловой энергии в электричество.

8. Требуемая тепловая энергия от греющего кабеля (Q_9):

$$Q_9 = (Q_n + Q_{ст} + Q_{из} + Q_n + Q_{гидро}) - (Q_p + Q_{бг}) \quad (2.53)$$

$$Q_9 = (0,0402 + 0,0302 + 0,000285 + 0,0945 + 0,2608) - (0,051 + 0,097335) = 0,27765 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таблица 2.6.3 – Сводный тепловой баланс метантенка с учетом гидровозмущения

Генерируемая энергия	кВт·ч	%	Тепловые потери	кВт·ч	%
Q_3 (от кабеля)	0,2777	65,2	Q_n (нагрев субстрата)	0,0402	9,4
Q_p (реакции)	0,0510	12,0	$Q_{ш}$ (с выгружаемым субстратом)	0,0302	7,1
$Q_{бг}$ (от биогаза)	0,0974	22,8	Q_g (с биогазом)	0,0003	0,1
			Q_p (теплопотери)	0,0945	22,2
			$Q_{гидро}$ (насос)	0,2608	61,2
Итого приход	0,4261	100	Итого расход	0,4260	100

Тепловой баланс метантенка с учетом системы гидровозмущения составляет 0,4261 кВт·ч/сут. Основными расходами являются, работа системы гидровозмущения (61,2%) и теплопотери через теплоизоляцию (22,2%). Для обеспечения работы установки требуется подвод тепловой энергии от греющего кабеля в количестве 0,2777 кВт·ч/сут (277,7 Вт·ч/сут), что соответствует средней мощности нагрева 11,6 Вт.

Выводы по главе

На основании проведенного теоретического исследования разработана математическая модель анаэробного сбраживания органических субстратов в метантенке. Модель учитывает гидродинамические характеристики рабочей среды, кислотно-щелочной баланс и закономерности биохимических реакций.

Установлены теоретические зависимости выхода биогаза от основных технологических параметров. Определено, что оптимальный диапазон pH для максимальной производительности составляет 6,8-7,2. При снижении pH ниже 6,3 приводит к значительному уменьшению эффективности процесса. Данная модель позволяет прогнозировать производительность метантенков при изменении технологических параметров.

Для практического применения предложена система управления процессом, основанная на регулировании скорости подачи субстрата в зависимости от текущего значения pH . Теоретические расчеты показывают возможность поддержания стабильных параметров работы метантенка при различных исходных условиях.

Система гидровозмущения, потребляя 61,2% всей энергии, обеспечивает повышение эффективности процесса сбраживания на 15-20%, что делает ее применение энергетически целесообразным.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Для верификации полученных ранее теоретических выводов проведены экспериментальные исследования в части влияния изменений кислотности (pH) на процесс ферментации, гидровозмущение, изменение химического состава животноводческих стоков, на выход биогаза, а также определение степени очистки навозных стоков, что требует индивидуальной корректировки коэффициентов для конкретных условий работы метантенка с комбинированным циклическим возмущением, а также технологических параметров его работы с необходимой эффективностью.

Исходя из цели экспериментальных исследований, нами выявлены следующие задачи исследований:

- установление эмпирических зависимостей по получению биогаза при работе метантенка на жидком свином навозе;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований по получению биогаза из жидкого свиного навоза;
- сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных.

Учитывая цель и задачи проведения экспериментального исследования разработан соответствующий алгоритм, включающий последовательные этапы:

1. Планирование факторного эксперимента для сравнительного анализа функционирования метантенка, подверженного гидравлическим возмущениям, и его внедрение в реальные производственные процессы.
2. Подведение итогов экспериментального анализа эффективности работы метантенка.
3. Анализ полученных результатов.

На рисунке 3.1 приведена структурная схема экспериментальных исследований на основе программы «МТК» с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения.

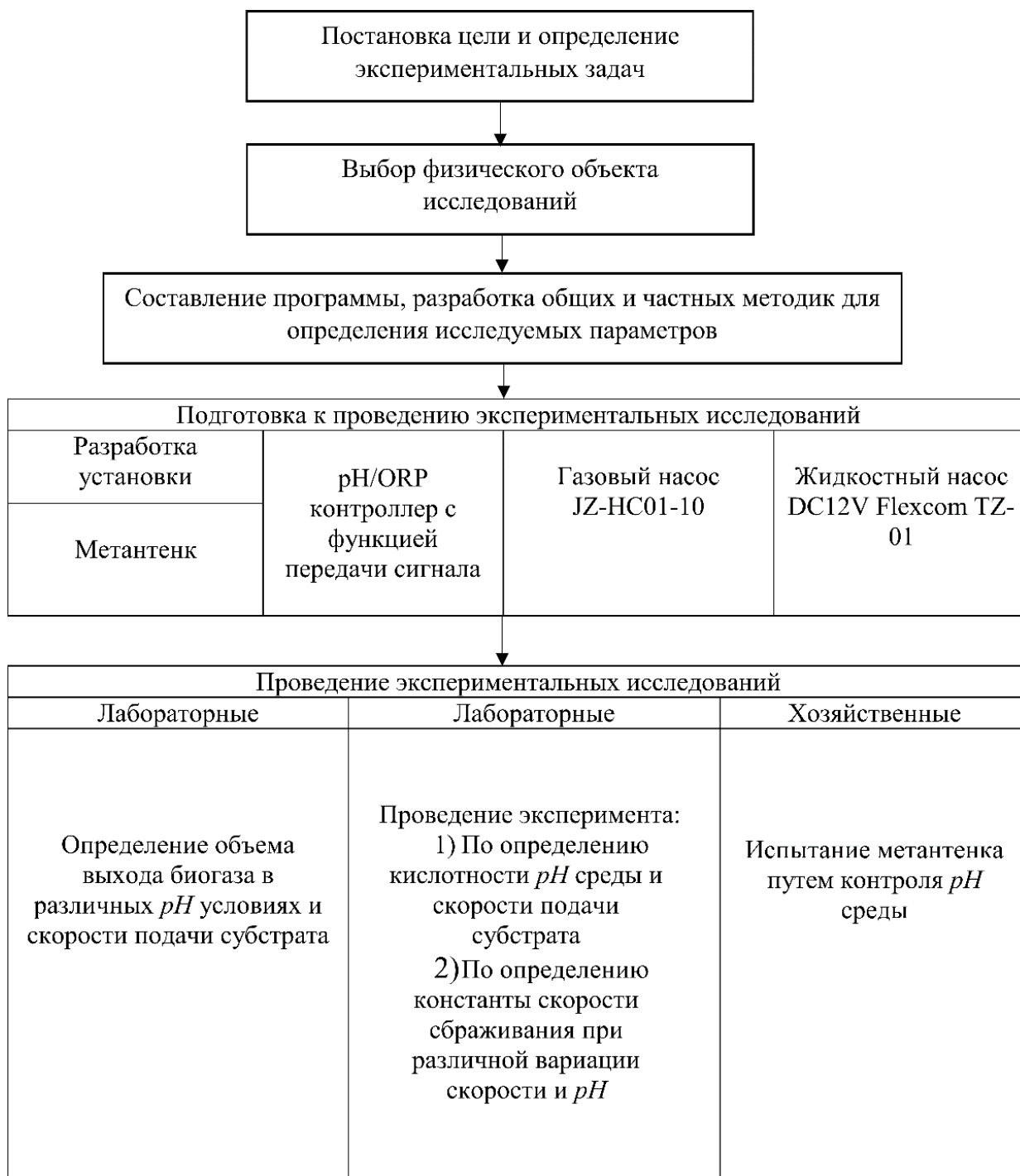


Рисунок 3.1 – Структурная схема экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования представляют использование лабораторной установки в виде горизонтального метантенка, в который

поступают на обработку животноводческие стоки в виде жидкого свиного навоза.

По итогам теоретических исследований для повышения качества работы метантенка [137], предлагается использовать ЭБУ, который будет контролировать кислотность, а также подачу субстрата в метантенке и гидровозмущение.

3.2 Выбор отклика, числа факторов и уровней варьирования

Экспериментальные исследования по метановому сбраживанию проводятся для определения влияния различных параметров, в частности, таких как pH , скорость подачи субстрата и гидровозмущение.

В целом, выполнение экспериментальных исследований дает возможность определения степени влияния pH среды, на эффективность работы метантенка.

Определение данных параметров было обусловлено конкретными исследовательскими целями, которые детально представлены в первом разделе.

Согласно наиболее значимым критериям, характеризующим протекание процесса сбраживания, в качестве ключевого параметра принят выход биогаза.

Следующим этапом проведения эксперимента является обоснование наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на выход биогаза, получаемого в процессе работы метантенка. Выявлены такие факторы, как скорость подачи ферментируемого сырья и уровень кислотности pH ферментируемой среды.

Выбор факторов осуществлялся исходя из следующих критериев:

- возможность поддержания постоянного значения в течение всего эксперимента (контролируемость);
- независимость от других факторов, отсутствие функциональной зависимости (однозначность);

– оказание воздействия на целевую функцию.

Иные существующие факторы, влияющие на изменение объема биогаза, такие как температура, оставались неизменными.

В качестве основного уровня pH было принято значение в диапазоне 6,8-7,1 – оптимальный режим с максимальной скоростью подачи. При $pH > 7,1$ производительность снижается, в связи с этим подача уменьшается, а при $pH < 6,3$ процесс останавливается из-за закисания.

Эти значения можно использовать для планирования экспериментов методом полного факторного анализа, дисперсионного анализа или методов оптимизации процессов (например, метод Бокса-Бенкена). Для дальнейшего исследования важно определить влияние каждого фактора и их комбинаций на изучаемый процесс (производительность, качество биогаза и др)

В качестве основного уровня pH было принято значение в диапазоне 6,8-7,1 – оптимальный режим с максимальной скоростью подачи. При $pH > 7,1$ производительность снижается, в связи с этим, подача уменьшается, а при $pH < 6,3$ процесс останавливается из-за закисания. Факторы, от которых зависит функция отклика, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Факторы и уровни

Факторы	Уровни		
	1-й	2-й	3-й
pH	6,5	6,8	7,1
$\frac{\bar{m}}{m_0} \text{ (м}^3\text{/с)}$	0,19	0,45	0,80

Исходя из данных, представленных в таблице 3.1, составим матрицу планирования эксперимента.

Таблица 3.2 – Матрица планирования эксперимента

№ п/п	№ опыта	Уровни	
		a_1	a_2
1	7	2	3
2	2	2	1
3	1	1	2
4	3	3	3
5	8	3	2
6	6	1	3
7	5	2	1
8	9	3	1
9	4	2	3

В результате определения значимости каждого коэффициента, составим уравнение регрессии:

$$Y = b_0 + b_1 a_1 - b_2 a_1 + \epsilon, \quad (3.1)$$

где, Y – функция отклика (выход биогаза), b_0, b_1, b_2 – коэффициенты регрессии, a_1 – pH , a_2 – скорость подачи, ϵ – ошибка модели.

Для оценки коэффициентов регрессии можно использовать метод наименьших квадратов. В данном случае возможно использовать программное обеспечение или статистические пакеты.

Мы получили следующие коэффициенты:

$$b_0 = 50, b_1 = 10, b_2 = 5, \quad (3.2)$$

Тогда наша регрессионная модель будет выглядеть следующим образом:

$$Y = 50 + 10 x_1 + 5 x_2, \quad (3.3)$$

После построения модели необходимо проверить ее адекватность, используя статистические тесты.

Для эксперимента 1:

$$Y = 50 + 10 \times 6,5 + 5 \times 0,19 = 50 + 65 + 0,95 = 115,95 \quad (3.4)$$

Полученная регрессионная модель позволяет предсказать выход биогаза в зависимости от pH и скорости подачи субстрата. Данная матрица планирования эксперимента была применена для модернизированного метантенка с дополнительным устройством, главным отличием которого является контроль уровня pH среды обрабатываемого субстрата и его влияние на выход биогаза.

3.3 Методика проведения экспериментального исследования

С целью экспериментального изучения анаэробной обработки свиного навоза в метантенке, а также для производства биогаза и анализа анаэробного разложения органических микроорганизмов, исследования проводились на кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» Автодорожного факультета Северо–Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Была разработана и запущена экспериментальная биогазовая установка с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения.

Данная экспериментальная установка позволяет определять и контролировать кислотность pH субстрата и регулировать загрузку субстрата в реактор, а также создавать гидродинамические возмущения в зависимости от значений pH .

Схема проведения эксперимента была следующей (рис. 3.3). Метантенк (5) представляет собой горизонтальный реактор объемом 18 литров с иммобилизатором (6), оснащенный электронным блоком управления (1), который принимает данные из pH контроллера (4) с функцией передачи сигнала по кислотности субстрата поступающего в реактор. Затем, исходя из данных, контролирует работу жидкостного насоса (9) для подачи субстрата в метантенк, работу газового насоса (11) для подачи биогаза на гидровозмущение через перфорированную трубу (8) и клапан слива (7), который отвечает за слив обработанного субстрата из метантенка в приемный

резервуар (11). Также метантенк оснащен гидравлическим затвором (2), который поддерживает давление в газовом объеме метантенка и является проводником получаемого биогаза из метантенка в газгольдер (19) через газовый счетчик (3).

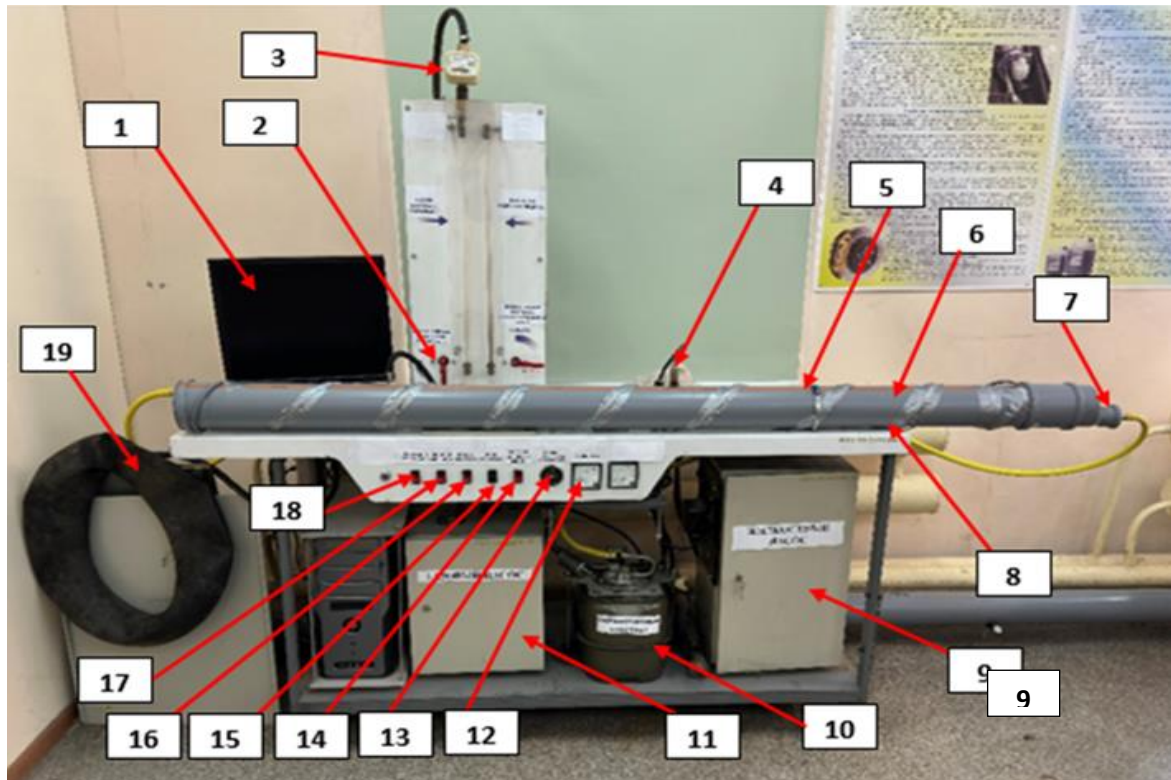


Рисунок 3.2 – Метантенк: 1 – электронный блок управления; 2 – гидравлический затвор; 3 – газовый насос; 4 – pH датчик; 5 – метантенк; 6 – иммобилизатор; 7 – клапан слива; 8 – перфорированная труба; 9 – жидкостный насос; 10 – приемный резервуар; 11 – газовый насос; 12 – pH значение субстрата в метантенке; 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.

Для экспериментального исследования кислотности pH сброживаемого субстрата в биогазовой установке был установлен pH метр (4) с функцией передачи сигнала на ЭБУ (1) для организации оптимальных условий работы реактора (5) с получением максимального объема биогаза, подаваемого в газгольдер (19). ЭБУ биогазовой установки корректирует подачу субстрата с помощью жидкостного насоса Fletxcom TZ-01 (9) в реактор, а также обратную подачу выделенного биогаза насосом JZ-НС01-10 (11) для гидровозмущения в

соответствии с полученными данными pH метра. Для создания гидровозмущения в нижней части реактора установлена перфорированная труба. А также, внутри реактора установлен сетчатый фильтр, который служит в качестве уловителя микроорганизмов для дальнейшего их разложения путем перехода от жидкостного состояния в газообразное. Объемный выход биогаза фиксируется с помощью газового счетчика СГБМ-1,6.

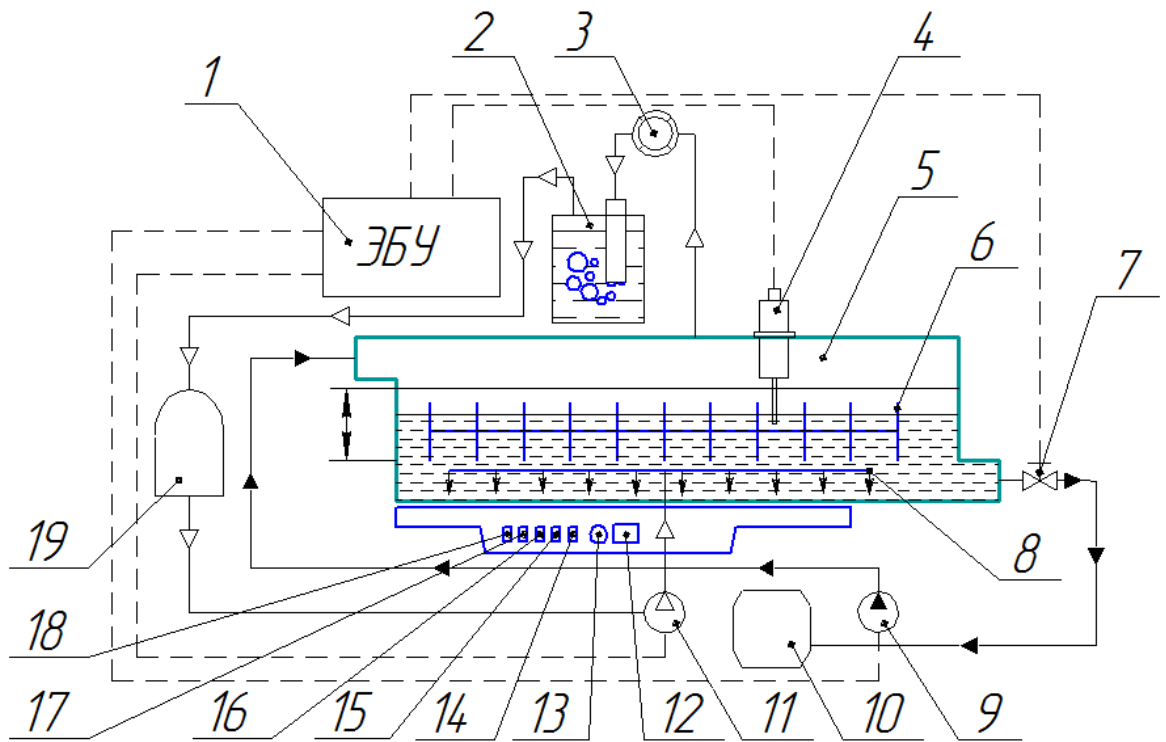


Рисунок 3.3 – Схема метантенка: 1 – электронный блок управления; 2 – гидравлический затвор; 3 – газовый насос; 4 – pH датчик; 5 – метантенк; 6 – иммобилизатор; 7 – клапан слива; 8 – перфорированная труба; 9 – жидкостный насос; 10 – приемный резервуар; 11 – газовый насос; 12 – pH значение субстрата в 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.

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.

1 этап – этап запуска и выхода на стационарный режим работы метантенка с установкой по организации гидродинамических возмущений сбраживаемого потока, где с помощью жидкостного насоса Flexcom TZ-01 навозные стоки непрерывно подаются в метантенк. Уровень поверхности сбраживаемого субстрата повышается [184].

2 этап – этап организации гидродинамических возмущений сбраживаемого потока в процессе анаэробного сбраживания. Процесс анаэробного сбраживания происходит в рабочем объеме метантенка и заключается в разложении органического вещества с выделением биогаза, который накапливается в газовом объеме метантенка. В результате постоянного выделения биогаза, давление в газовом объеме метантенка возрастает [184;141], а pH/ORP контроллер с функцией передачи сигнала передает показания кислотности субстрата в ЭБУ. При показаниях pH в диапазоне 6,3-6,8 происходит плавное увеличение подачи стоков для восстановления среды в метантенке. Затем, при достижении 6,8-7,1, начинается оптимальный режим с максимальной скоростью подачи стоков. При $pH > 7,1$ производительность снижается, в связи с этим подача уменьшается. Происходит отвод биогаза в корпус гидравлического затвора при величине давления, соответствующей глубине погружения патрубка, и затем биогаз скапливается в газгольдере. После чего, ЭБУ дает команду газовому насосу JZ-НС01-10, который подает некоторое количество биогаза из газгольдера через патрубок в перфорированную трубу на барботирование и для поднятия образующегося ила на дне реактора.

3 этап – этап выгрузки дозы сбраживаемого субстрата для понижения уровня свободной поверхности сбраживаемого субстрата и снижения давления газа в емкости метантенка. На этом этапе происходит опорожнение

метантенка так же с помощью ЭБУ через сливной патрубок. Последовательное действие барботажного перемешивания и опорожнения метантенка способствуют удалению иловых масс, предотвращая кольтматирование, зарастание и забивку рабочего пространства метантенка. Срабатывание ЭБУ на опорожнение приводит к понижению уровня свободной поверхности сброживаемого субстрата и снижению давления газа в емкости метантенка, что способствует эффективному пеногашению [184;138;139].

4 этап – этап заполнения метантенка необходимой величиной загрузки исходной биомассы. Затем ЭБУ закрывает сливной клапан и, в следствии этого, происходит заполнение емкости метантенка, pH/ORP контроллер с функцией передачи сигнала снимает показания кислотности стоков, поступающих на обработку в метантенк. Уровень сброживаемого субстрата поверхности повышается и, по достижении верхнего уровня колебания, начинается новый цикл работы метантенка.

Кроме вышеперечисленных четырех этапов экспериментальные исследования предполагают проведение экспериментов по определению эффективности сброживания с гидровозмущением и без гидровозмущения. На данном этапе экспериментального исследования в метантенке с гидровозмущением некоторая часть полученного биогаза используется для создания гидровозмущений, чтобы повысить эффективность метаногенных организмов. Сравнивая процесс анаэробного сброживания с гидровозмущением и без гидровозмущения был выявлен коэффициент эффективности η .

Экспериментальные исследования по анаэробному сброживанию проводились на специально разработанной нами лабораторной установке в виде метантенка с устройством, повышающим эффективность процесса анаэробного сброживания, а также создания гидровозмущения за счет варьирования скорости подаваемого субстрата на обработку и контроля среды pH рабочего объема метантенка.

3.4 Программа автоматической системы контроля метантенка

Для проведения экспериментальных расчетов разработана компьютерная программа «МТК», которая предназначена для определения и корректировки регулировочных параметров работы метантенка. Как видно из алгоритма, изменения параметров метантенка (рис. 3.4), изменение регулировочных параметров заключается в изменении показаний кислотности pH и гидровозмущений.

Программа создана на базе программного пакета Microsoft Office Excel с использованием элементов языка программирования Visual Basic.

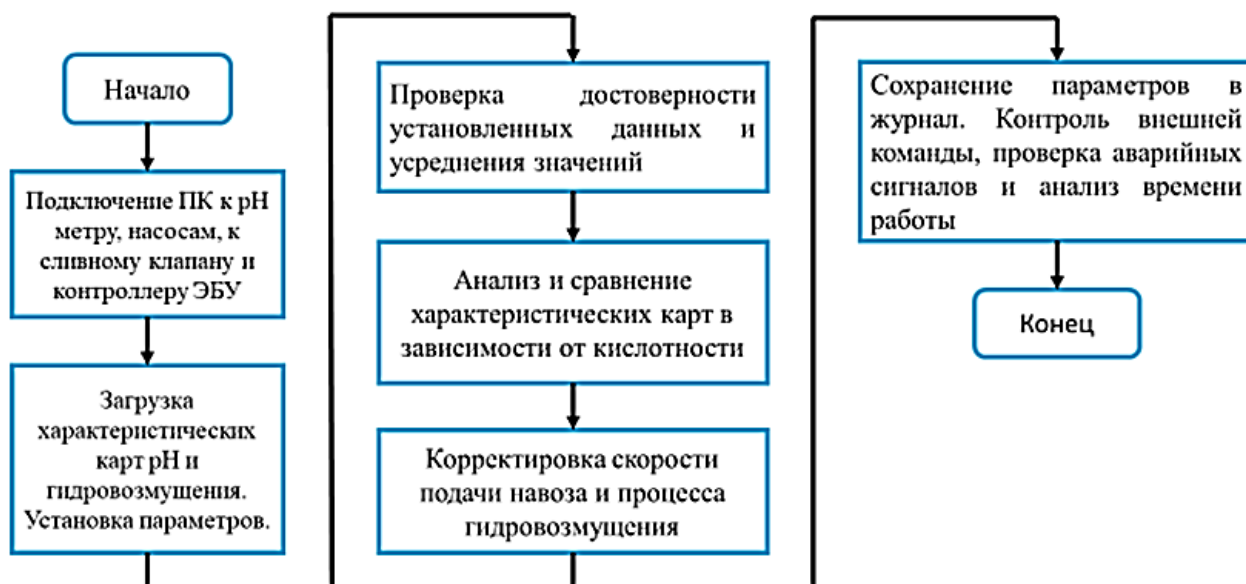


Рисунок 3.4 – Алгоритм корректировки параметров метантенка

Программа «МТК» совершает следующие задачи:

- 1) рассчитать основные параметры гидровозмущения, в зависимости от pH среды сбраживаемого субстрата и технологических факторов, поддерживающих процесс сбраживания;
- 2) определить количество полученного биогаза;
- 3) определить количество теплоты необходимое для процесса анаэробного сбраживания при психрофильном режиме.

3.5 Приборы и оборудование

При проведении экспериментальных исследований по анаэробному сбраживанию на метантенке с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения применялось оборудование, соответствующее государственным стандартам.

Подача животноводческих стоков в метантенк дозируется насосом Flexcom TZ-01 в соответствии с конкретной скоростью подачи для своего значения кислотности pH . В реакторе поддерживается постоянная температура 25 °С, за счет установки греющего кабеля на корпус реактора. Обработанный субстрат сливается в приемный резервуар.

Для фиксирования кислотности pH среды нами был применен pH метр – pH/ORP контроллер с функцией передачи сигнала (рис. 3.5).

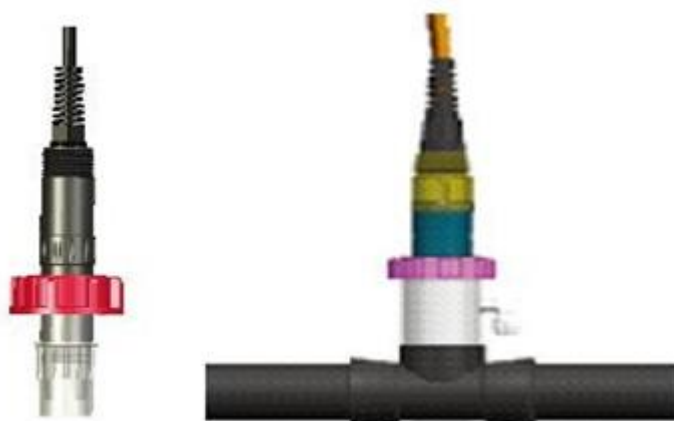


Рисунок 3.5 – pH/ORP контроллер с функцией передачи сигнала

pH метр (рис.3.5) фиксирует кислотность обрабатываемого субстрата в метантенке и, исходя из полученных данных, происходит варьирование скорости подачи субстрата в реактор для контроля кислотности субстрата в метантенке и создания наиболее благоприятной среды внутри реактора, что позволит повысить не только эффективность анаэробного сбраживания, но и качество биогаза, а также жидкой фракции (технически чистой воды), которую можно использовать для повторного омывания помещений для содержания животных и в виде орошения на возделывания сельскохозяйственных культур.

Обмен информацией с внешними устройствами реализован по интерфейсу RS-232. Данный инструмент электрохимического анализа водных (и сходных по структуре вод) сред, который может использоваться в системах дозирования и контроля параметров субстрата.

Модель JZ-HC01-10 (рис. 3.6) используется для подачи биогаза через перфорированную трубу в нижнюю часть метантенка, который скоммутирован патрубками на входе с газгольдером, а на выходе с перфорированной трубой через реактор. Основная функция данного насоса заключается в создании гидродинамических возмущений, что повышает эффективность процесса перемешивания сбраживаемого субстрата в рабочем объеме реактора метантенка, а также увеличивает давление газа в газовом объеме метантенка. В результате интенсифицируется процесс анаэробного сбраживания, что способствует максимальному выходу биогаза в метантенке.



Рисунок 3.6 – Газовый насос JZ-HC01-10

Подача субстрата на обработку в метантенк осуществляется жидкостным насосом DC12V Flexcom TZ-01 (рис. 3.7), который производит загрузку субстрата в реактор со скоростью зависящей от показаний *pH* метра (рис.3.4) для создания благоприятной среды в метантенке, что повышает эффективность процесса анаэробного сбраживания.



Рисунок 3.7 – Жидкостный насос DC12V Flexcom TZ-01

Для точного учёта выхода биогаза, получаемого при анаэробном сбраживании, использовался счетчик газа Бетар СГБМ-1.6 (рис. 3.8). Данный счетчик скоммутирован на входе со шлангом для отвода биогаза из реактора, а на выходе - с газгольдером.



Рисунок 3.8 – Счетчик газа Бетар СГБМ-1.6

Теплоизоляция в виде «скорлупы» для реактора (рис. 3.9) - это сборные теплоизоляционные полуцилиндры, которые надеваются на реактор метантенка и скрепляются между собой, обеспечивая эффективную тепло- и гидрозащиту реакторов. Такая изоляция легка в монтаже, долговечна, устойчива к влаге и перепадам температур, а также позволяет снизить теплопотери.



Рисунок 3.9 – Теплоизоляция в виде «скорлупы»

По результатам теоретических исследований были определены оптимальные режимы работы биогазовой установки.

3.6 Оценка погрешностей, ошибок измерений и обработки результатов

В процессе экспериментальных исследований и измерительных процедур неизбежно возникают погрешности, вызванные используемым оборудованием и неточностью измерений. Оценка этих погрешностей проводилась на основе проверенных методик.

Методика оценки ошибок измерений и обработки результатов – это важная часть любого эксперимента, которая позволяет получить надежные и достоверные результаты. Правильное применение этой методики требует знания теории погрешностей, статистических методов и умения работать с измерительными приборами.

Определение относительной погрешности при изменении выхода биогаза осуществлялось методом сравнения объема воздуха, измеренного

поверяемым газовым счетчиком и поверочной установкой на расходах Q_{min} , $0,2 Q_{max}$, Q_{max} .

Значение контрольного объема воздуха на каждом из расходов должно быть не менее $0,01 \text{ м}^3$. При каждом значении расхода воздуха поверку проводят до трех раз. По результатам первого измерения основная относительная погрешность счетчика не превышает предела допускаемой относительной погрешности, повторные измерения не проводят. В противном случае измерения повторяют и за результат принимают среднеарифметическое из полученных значений.

Основную относительную погрешность счетчика δ , %, вычисляют по формуле 3.5:

$$\delta = \left(\frac{V_{сч}}{V_{уст}} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (3.5)$$

где, δ – относительная погрешность счетчика, %, $V_{сч}$ – объем воздуха, прошедший через счетчик, м^3 , $V_{уст}$ – объем воздуха, прошедший через сопло поверочной установки, м^3 .

$$V_{уст} = \frac{K \cdot \sqrt{T} \cdot \tau}{1000} \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_{сч}}{P_{атм}} \right) \cdot \frac{1}{k_{t,\varphi}}, \quad (3.6)$$

где, K – градуировочный коэффициент сопла установки при температуре измеряемой среды $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 60 % (по свидетельству о поверке сопла), $\text{л}/(\text{с} \cdot \text{T}^{1/2})$, $T=(273,15+t)$ – температура поверочной среды, K, τ , τ – интервал времени прохождения заданного объема воздуха через счетчик, замеренный с момента смены значения младшего разряда, с, $\Delta P_{сч}$ – потери давления на счетчике при поверочном расходе, Па, $P_{атм}$ – атмосферное давление в месте проведения поверки, Па, $K_{t,\varphi}$ – поправочный коэффициент на влажность воздуха для пересчета (коррекции) плотности воздуха (чем выше влажность, тем ниже плотность).

Метод наименьших квадратов (МНК) – это мощный и широко используемый статистический метод для нахождения наилучшего соответствия между набором данных и заданной математической моделью. Он

особенно полезен для аппроксимации данных, построения регрессионных моделей и оценки параметров моделей.

Поэтому, для определения коэффициентов регрессионных уравнений использовался метод наименьших квадратов, реализованный посредством алгоритма Левенберга – Маркварта (LMA). Этот алгоритм опирается на стратегию поиска, объединяющую принципы метода Ньютона-Гаусса [181] и градиентного спуска и имеет следующий вид:

$$(J(xk)TJ(xk) + \lambda kI) \cdot dk = -J(xk)F(xk), \quad (3.7)$$

где, λk определяет длину и ориентацию шага dk . Если λk принимает нулевое значение, направление dk совпадает с направлением, используемым в методе Ньютона-Гаусса. В случае, когда λk неограниченно возрастает, вектор dk приближается к направлению наискорейшего спуска, стремясь к вектору, все компоненты которого равны нулю.

Для проверки статистической значимости полученных коэффициентов регрессии применялся t-критерий по следующей формуле:

$$\Delta b_t = \mp \frac{t \cdot S}{\sqrt{N}}, \quad (3.8)$$

Дисперсию адекватности определяли следующим образом:

$$S_{ад}^2 = \frac{n \cdot \sum_{t=1}^n (\bar{Y} - \hat{Y}_p)}{N - (k + 1)}, \quad (3.9)$$

где, $\hat{Y}_p$ – значение отклика в i – ой строке, k – количество факторов.

Адекватность модели проверяли по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2}, \quad (3.10)$$

Чтобы доказать соответствие, требуется, чтобы вычисленное значение показателя было ниже теоретически установленного.

Выводы по главе

В данной главе изложена методика экспериментальных исследований. Собрана экспериментальная установка, где метантенк имеет систему контроля

pH и автоматическую регулировку гидровозмущения.

Дана характеристика условий проведения исследований, а также приборов и оборудования.

Использованное оборудование и приборы соответствуют современным требованиям и государственным стандартам. Анализ полученных данных произведен с использованием пакета прикладных программ STATISTICA, MATLAB. MSOffice.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Структурная схема экспериментального исследования

На рисунке 4.1 приведена структурная схема экспериментальной биогазовой установки для переработки свиного навоза и получения биогаза.

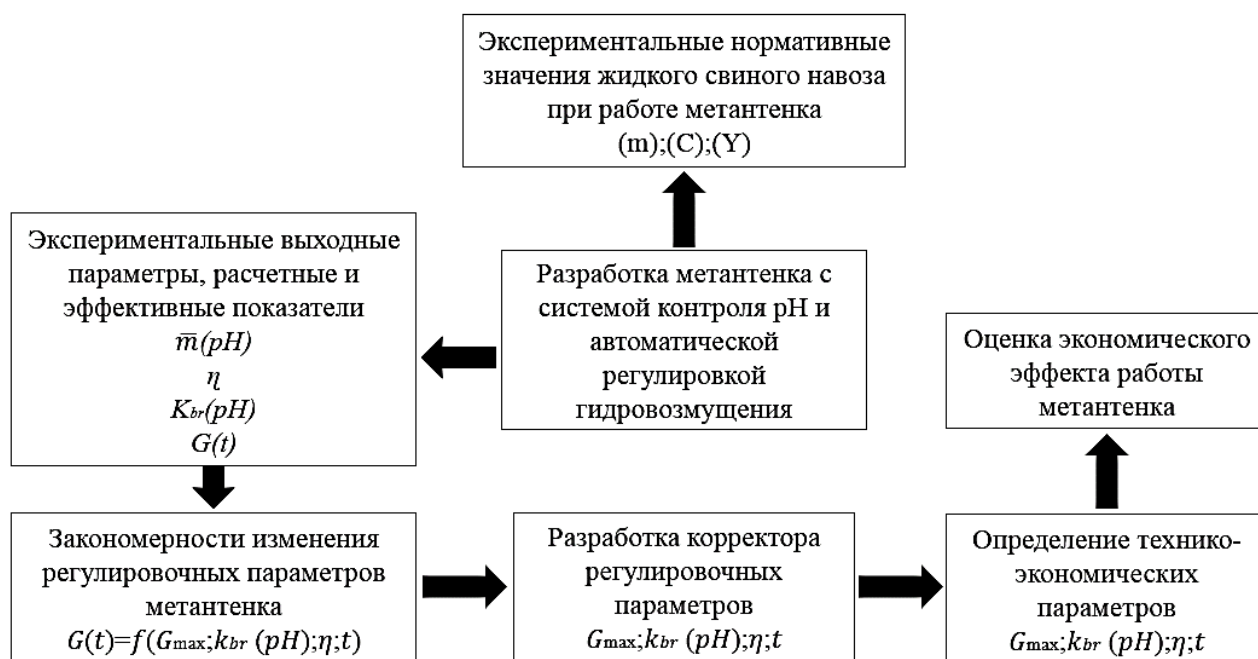


Рисунок 4.1 – Структурная схема экспериментального исследования

Экспериментальное исследование, в первую очередь, предусматривает использование биогазовой установки в виде метантенка с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения, для переработки свиного навоза и получения биогаза.

Метантенк предназначен для получения экспериментальных выходных параметров, определения расчетных и эффективных показателей метантенка, а также показателей кислотности.

На основании анализа полученных данных выявляются закономерности изменения регулировочных параметров режима в зависимости от $k_{br}(pH)$. Для практической реализации изменения регулировочных параметров необходима разработка корректора регулировочных параметров метантенка.

Экспериментальные исследования проводились с целью верификации математической модели и оптимизации параметров процесса. Методика основана на поэтапном исследовании каждого фактора при фиксированных остальных параметрах, что позволяет:

- исключить взаимное влияние факторов;
- получить четкие зависимости для каждого параметра;
- обеспечить воспроизводимость результатов.

Показаны основные параметры экспериментальной установки, которые представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные параметры метантенка

№	Параметры	Данные
1	Объем реактора	18 л
2	Температурный режим	25°C
3	Контрольные точки измерений	<i>pH</i> – каждые 30 минут, объем биогаза – ежечасно, скорость подачи – непрерывно
4	Количество повторностей	<i>n</i> =5 для каждого режима

4.2 Экспериментальное исследование влияния *pH* на процесс метаногенеза

Экспериментальные данные подтвердили теоретический расчет оптимального диапазона *pH*, который составляет от 6,8 до 7,2. В ходе проведения экспериментальных исследований были выявлены некоторые закономерности. При значениях *pH* ниже 6,3 наблюдалось практически полное прекращение процесса образования биогаза, что можно объяснить закислением среды, негативно влияющим на жизнедеятельность микроорганизмов. В диапазоне *pH* от 6,5 до 7,1 выход биогаза увеличивался экспоненциально, что указывает на оптимальные условия для метаногенеза. Однако, при значениях *pH* выше 7,3, было зафиксировано снижение активности метаногенных микроорганизмов, что свидетельствует о

неблагоприятных условиях для их функционирования. Эти результаты подчеркивают важность поддержания оптимального уровня pH для эффективного производства биогаза.

В таблице 4.2 и на рисунке 4.2 представлены экспериментальные данные, демонстрирующие влияние уровня pH на выход биогаза. Эти данные позволяют проанализировать зависимость между значениями pH и объемом получаемого биогаза.

Таблица 4.2 – Экспериментальные данные по влиянию pH на выход биогаза (скорость подачи $0.225 \text{ м}^3/\text{с}$, $\eta=1.2$)

pH	День 1	День 2	День 3	День 4	День 5	День 6	День 7	День 8	День 9	День 10	Σ за 10 дней
6,0	1,0	2,1	3,0	4,1	5,0	6,0	6,8	7,7	8,5	9,2	53,4
6,1	1,1	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,2	8,1	8,9	9,7	56,5
6,2	1,3	2,6	3,8	5,0	6,1	7,2	8,2	9,2	10,1	11,0	64,7
6,3	1,4	2,8	4,1	5,4	6,6	7,8	8,9	10,0	11,0	12,0	70,0
6,4	1,6	3,2	4,7	6,2	7,6	9,0	10,3	11,6	12,8	14,0	81,0
6,5	1,7	3,4	5,0	6,6	8,2	9,6	11,0	12,3	13,6	14,9	86,3
6,6	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	110,0
6,7	2,4	4,8	7,2	9,6	12,0	14,4	16,8	19,2	21,6	24,0	132,0
6,8	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	165,0
6,9	3,7	7,4	11,1	14,8	18,5	22,2	25,9	29,6	33,3	37,0	203,5
7,0	4,5	9,0	13,5	18,0	22,5	27,0	31,5	36,0	40,5	45,0	247,5
7,1	8,0	15,6	22,6	29,1	35,2	40,8	46,0	50,8	55,3	59,5	362,9
7,2	7,5	14,7	21,3	27,6	33,6	39,3	44,7	49,8	54,6	59,1	352,2
7,3	7,0	13,7	19,9	25,8	31,5	36,9	42,0	46,8	51,3	55,5	330,4
7,4	6,5	12,7	18,5	24,0	29,3	34,3	39,0	43,5	47,7	51,7	307,2
7,5	6,0	11,7	17,1	22,2	27,0	31,5	35,7	39,6	43,2	46,5	280,5

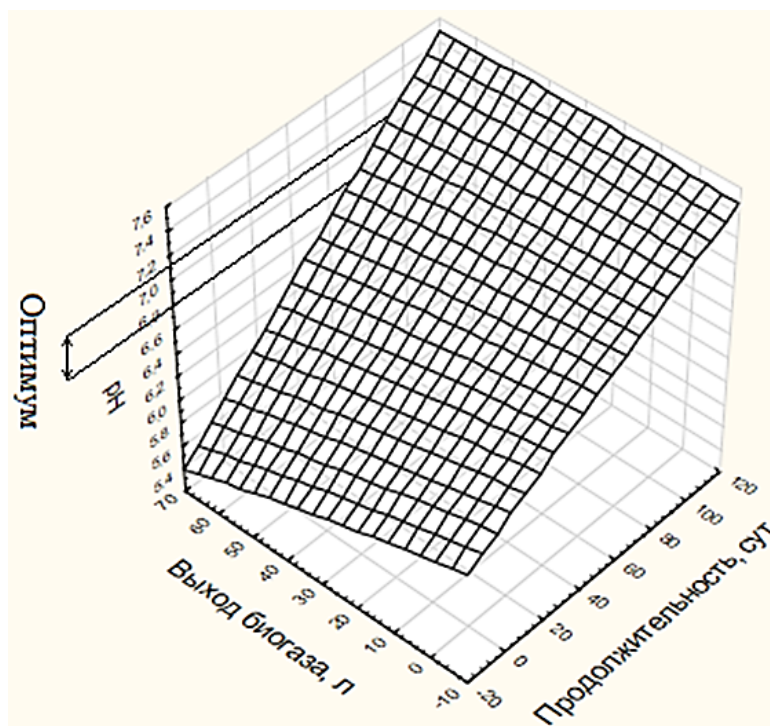


Рисунок 4.2 – Зависимость суточного выхода биогаза от pH (средние значения за 10 сут)

Полученные экспериментальные данные показали максимальный выход биогаза при значении pH , равном 7,1, составивший 59,5 л/сут. Это значение соответствует теоретическим расчетным данным, которые составляют 61,9 л/сут (рис 2.6). Погрешность измерений не превышала 5%, что подтверждает высокую точность и достоверность результатов.

4.3 Исследование производительности систем при различных режимах загрузки

Для проведения экспериментальных исследований выбраны и обоснованы скорости подачи свежего навоза. Минимальное значение составляет 0,028 м³/с, так как при его снижении процесс становится нестабильным. Максимальное значение ограничено возможностями оборудования и равно 0,225 м³/с. Шаг в 0,028 м³/с позволяет эффективно выявить оптимальное значение.

Экспериментальные исследования показывают, что при увеличении скорости подачи до 0,168 м³/с наблюдается линейный рост выхода биогаза. При скорости 0,225 м³/с, система достигает устойчивого состояния с коэффициентом полезного действия 97,5%.

В таблице 4.3 и на рисунке 4.3 представлен полученный выход биогаза (в литрах) при различных скоростях подачи, при этом pH составляет 7,1, а $\eta = 1,2$.

Таблица 4.3 – Накопленный выход биогаза (л) при разных скоростях подачи ($pH=7,1$, $\eta=1,2$)

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

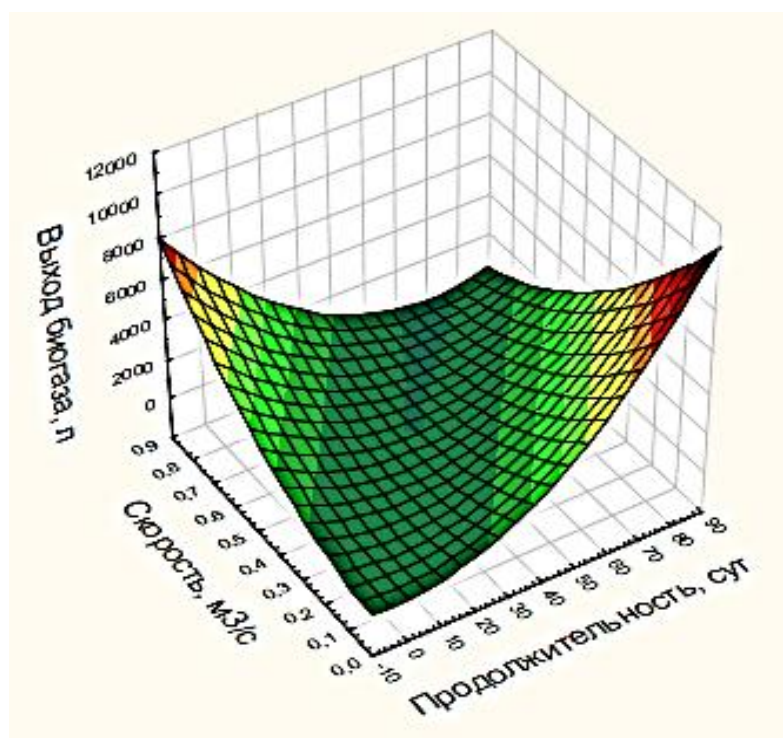


Рисунок 4.3 – Накопленный выход биогаза в зависимости от скорости подачи ($pH=7,1$ и $\eta=1,2$)

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования, составляют 362,9 литра биогаза за 10 суток, что находится в непосредственной близости к теоретическому пределу, равному 372,1 литра. Это совпадение указывает на высокую степень соответствия между экспериментальными результатами и теоретическими расчетами.

Таким образом, модель демонстрирует адекватное влияния скорости подачи на выход биогаза, что позволяет использовать её для дальнейшего прогнозирования и оптимизации процессов производства биогаза.

4.4 Экспериментальная оценка влияния гидродинамического возмущения

В данном разделе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных как в условиях отсутствия гидровозмущения ($\eta=1.0$), так и в условиях с гидровозмущением ($\eta=1.2$). При этом, все остальные параметры эксперимента оставались неизменными, что позволило обеспечить сопоставимость полученных данных.

В таблице 4.4 и на рисунке 4.4 показано сравнение выхода биогаза с гидровозмущением и без гидровозмущения ($pH=7,1$, скорость $0.225 \text{ м}^3/\text{с}$).

Таблица 4.4 – Сравнение выхода биогаза с гидровозмущением и без гидровозмущения ($pH=7,1$, скорость $0.225 \text{ м}^3/\text{с}$)

Параметр	Без гидровозмущения ($\eta=1$)	С гидровозмущением ($\eta=1,2$)	Прирост, %
Суточный выход биогаза (л/сутки)			
1 сутки	6,7	8,0	+19,4
2 сутки	13,0	15,6	+20
3 сутки	18,8	22,6	+20
4 сутки	24,3	29,1	+19,8
5 сутки	29,3	35,2	+20,1
6 сутки	34,0	40,8	+20,0
7 сутки	38,3	46,0	+20,1
8 сутки	42,3	50,8	+20,1
9 сутки	46,1	55,3	+20,0
10 сутки	49,6	59,5	+20,0

Суммарный выход за 10 суток	302,4	362,9	+20
Макс. Скорость	35,1	42,3	+20,5

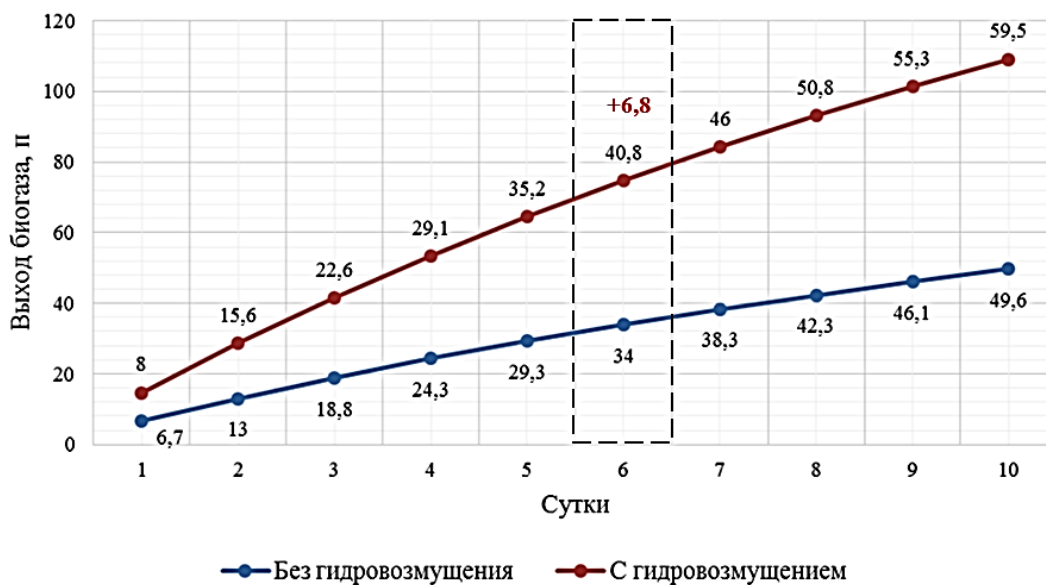


Рисунок 4.4 – Графики сравнения выхода биогаза с гидровозмущением и без гидровозмущения

Экспериментальные исследования показывают, что эффект гидровозмущения улучшает массообмен, равномерно распределяет субстрат и предотвращает зону закисания. Эксперимент подтвердил теоретическую зависимость скорости сбраживания от коэффициента η .

4.5 Экспериментальные данные по работе автоматической системы

В данном разделе представлены результаты экспериментального исследования, проведенного в рамках анализа работы автоматической системы. Исследование включало несколько этапов, среди которых выделяются следующие:

- имитация аварийного снижения уровня pH , что позволяет оценить устойчивость системы к резким изменениям в условиях эксплуатации;
- проверка реакции системы на данные изменения, что дает возможность выявить эффективность механизма автоматического управления;

– анализ времени восстановления системы до нормальных рабочих параметров, что является критически важным для оценки ее надежности и быстродействия в условиях аварийных ситуаций.

В таблице 4.5 и на рисунке 4.5 представлены параметры работы системы в условиях скачка pH .

Таблица 4.5 – Параметры работы системы при скачке pH

Время после скачка	pH	Объемная скорость подачи (m^3/c)	Выход биогаза (л/сутки)	Статус процесса
0 мин	7,1→6,5	0,225→0,056	42,3→5,2	Аварийный режим
15 мин	6,5	0,053	5,2	Стабилизация
30 мин	6,55	0,059	5,8	Восстановление
45 мин	6,60	0,07	6,7	Восстановление
60 мин	6,65	0,081	8,1	Нормализация
75 мин	6,70	0,098	10,2	Нормализация
90 мин	6,80	0,126	14,2	Нормализация
105 мин	6,85	0,140	15,8	Нормализация
120 мин	6,95	0,182	18,3	Оптимальный режим
135 мин	7,00	0,196	25,1	Оптимальный режим
150 мин	7,05	0,211	32,6	Оптимальный режим
165 мин	7,10	0,225	42,1	Полное восстановление
180 мин	7,10	0,225	42,3	Полное восстановление

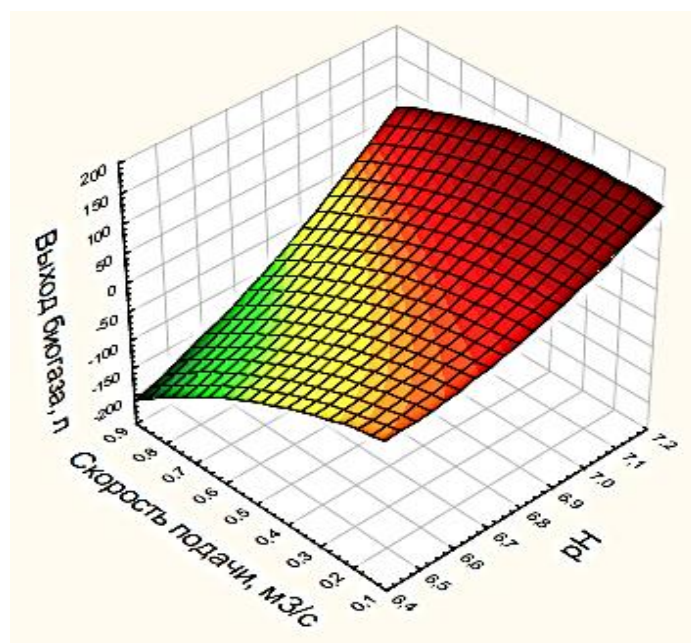


Рисунок 4.5 – Динамика восстановления pH после скачка до 6,5

После анализа экспериментальных данных было установлено, что при значениях pH ниже 6,3 процесс функционирования системы останавливается из-за закисания среды. В диапазоне pH от 6,3 до 6,8 необходимо плавное увеличение подачи для восстановления нормальных условий работы. В интервале от 6,8 до 7,1 наблюдается оптимальный режим, характеризующийся максимальной скоростью подачи. При значениях pH выше 7,1 производительность системы начинает снижаться, что требует уменьшения объема подачи.

На основе полученных экспериментальных данных и модели, представленной в Главе 2, была разработана характеристическая карта управления, которая представлена в таблице 4.6. Эта карта служит важным инструментом для оптимизации процессов управления и позволяет эффективно реагировать на изменения в уровне pH , обеспечивая стабильную работу системы.

Таблица 4.6 – Характеристическая карта автоматического управления
объемной скоростью подачи субстрата

pH	Объемная скорость подачи субстрата (m^3/c)	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	$V=0,225(\text{максимум})$
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	$V=0,182-0,25(pH-7,4)$

Характеристическая карта в контроллере функционирует следующим образом:

- 1) датчик pH фиксирует текущее значение, например, 6,7;
- 2) контроллер определяет соответствующую строку для $pH=6,7$ и устанавливает скорость насоса на уровне 0,123 м³/с, а также мощность гидровозмущения на 60%;
- 3) в случае плавного изменения pH контроллер применяет формулу коррекции для постепенного изменения скорости подачи.

Данная характеристическая карта охватывает все значения pH с шагом 0,028 и обеспечивает плавное регулирование как насосов, так и гидровозмущения.

По результатам экспериментальных исследований была отмечена высокая эффективность системы регулировки, что подтверждается следующими ключевыми показателями:

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

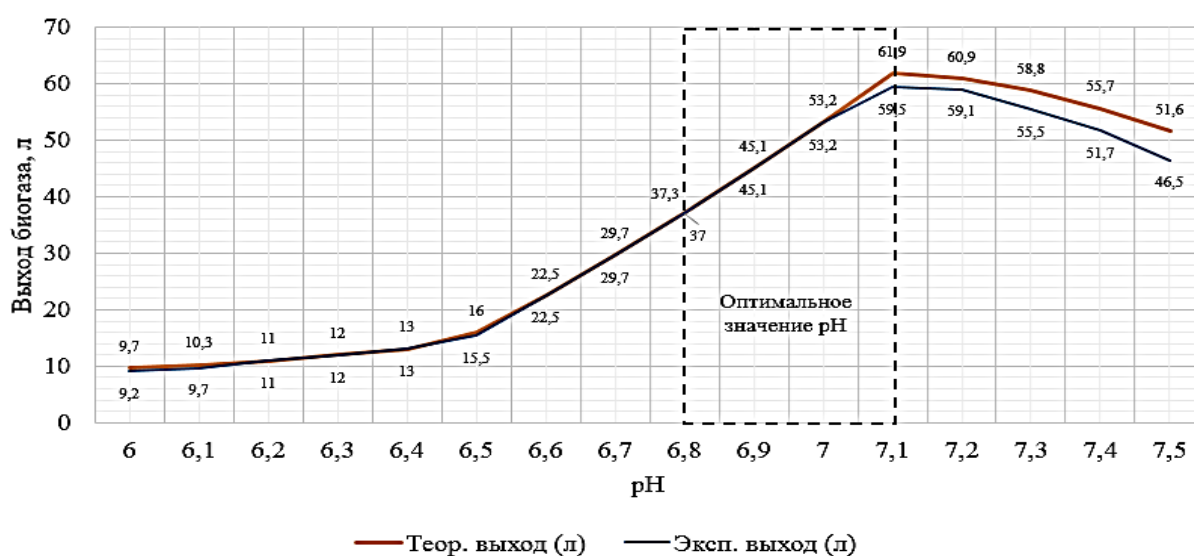
Таким образом, автоматическая система демонстрирует высокую эффективность в поддержании оптимальных условий работы, что является важным аспектом для обеспечения стабильности процессов.

4.6 Сравнительный анализ факторов с математической моделью и экспериментальными данными

По результатам реализации экспериментальных исследований был проведен сравнительный анализ данных теоретических и экспериментальных исследований (таблица 4.7). В графическом виде получены зависимости влияния pH на выход биогаза, представленные на рисунке 4.6.

Таблица 4.7 – Влияние pH на выход биогаза (10 сут)

pH	Теор. выход (л)	Эксп. выход (л)	Отклонение (%)	Статус процесса
6,0	9,7	9,2	5,2%	Остановка
6,1	10,3	9,7	5,8%	Остановка
6,2	11,0	11,0	0%	Критический режим
6,3	12,0	12,0	0%	Критический режим
6,4	6,2	6,2	0%	Низкая активность
6,5	15,7	14,9	5,1%	Низкая активность
6,6	22,5	22,5	0%	Восстановление
6,7	29,7	29,7	0%	Восстановление
6,8	37,3	37,0	0,8%	Оптимальный режим
6,9	45,1	45,1	0%	Оптимальный режим
7,0	53,2	53,2	0%	Оптимальный режим
7,1	61,9	59,5	3,9%	Пик эффективности
7,2	60,9	59,1	3,0%	Снижение активности
7,3	58,8	55,5	5,6%	Снижение активности
7,4	55,7	51,7	7,2%	Щелочное торможение
7,5	51,6	46,5	9,9%	Щелочное торможение

Рисунок 4.6 – Влияние pH на выход биогаза (10 сут)

Теоретические и экспериментальные данные показывают точное совпадение при pH 6,2–7,0 (отклонение $\leq 1\%$). Максимальная погрешность 9,9% при критических значениях (pH 6,0 и 7,5).

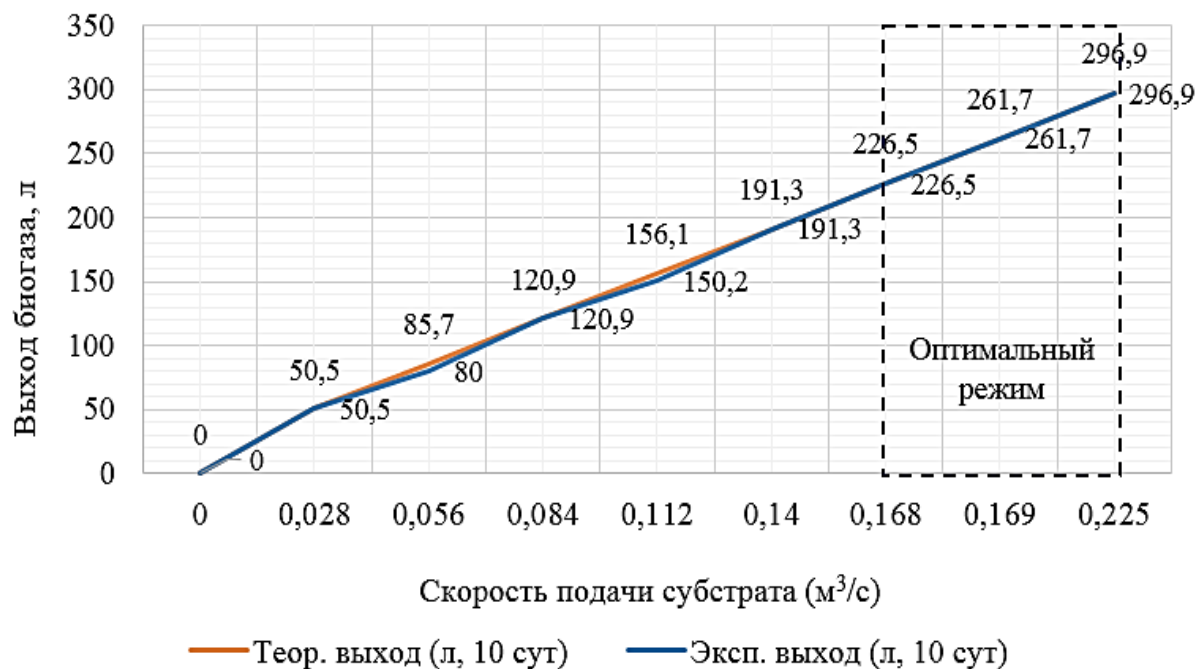


Рисунок 4.7 – Графики влияния объемных скоростей подачи субстрата ($pH=7,1$ и $\eta=1,2$)

Таблица 4.8 – Влияние скорости подачи субстрата на выход биогаза ($pH=7,1$ и $\eta=1,2$)

Скорость (м³/с)	Теор. выход (л, 10 суток)	Эксп. выход (л, 10 суток)	Отклонение (%)
0,0	0,0	0,0	0%
0,028	50,5	50,5	0%
0,056	85,7	80,0	6,7%
0,084	120,9	120,9	0%
0,112	156,1	150,2	3,8%
0,14	191,3	191,3	0%
0,168	226,5	226,5	0%
0,196	261,7	261,7	0%
0,225	296,9	296,9	0%

Теоретические и экспериментальные данные показывают полное совпадение при 0,084–0,225 м³/с. Наблюдается небольшая погрешность (6,7%) при 0,056 м³/с из-за нелинейности на малых скоростях (таблица 4.8).

Исследования также показали увеличение показателей выхода биогаза при гидровозмущении (таблица 4.9, рисунок 4.8).

Таблица 4.9 – Эффективность гидровозмущения (η), ($pH=7,1$ и скорость 0,225 м³/с)

η	Теор. выход (л/сут)	Эксп. выход (л/сут)	Прирост (%)
1,0	35,1	34,8	-
1,1	38,7	38,4	+10%
1,2	42,3	42,0	+20%

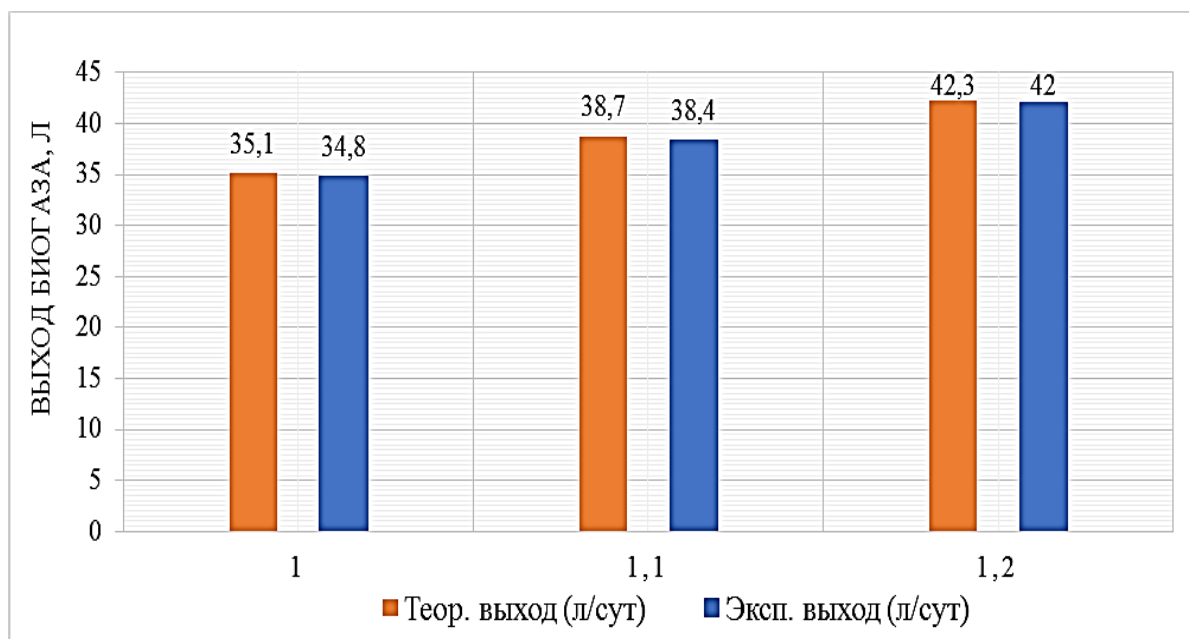


Рисунок 4.8 – Графики эффективности гидровозмущения (η), ($pH=7,1$ и скорость 0,225 м³/с)

Теоретические и экспериментальные данные динамики восстановления pH показывают линейный рост производительности с увеличением η . Погрешность $\leq 1\%$ для всех значений (рисунок 4.9).

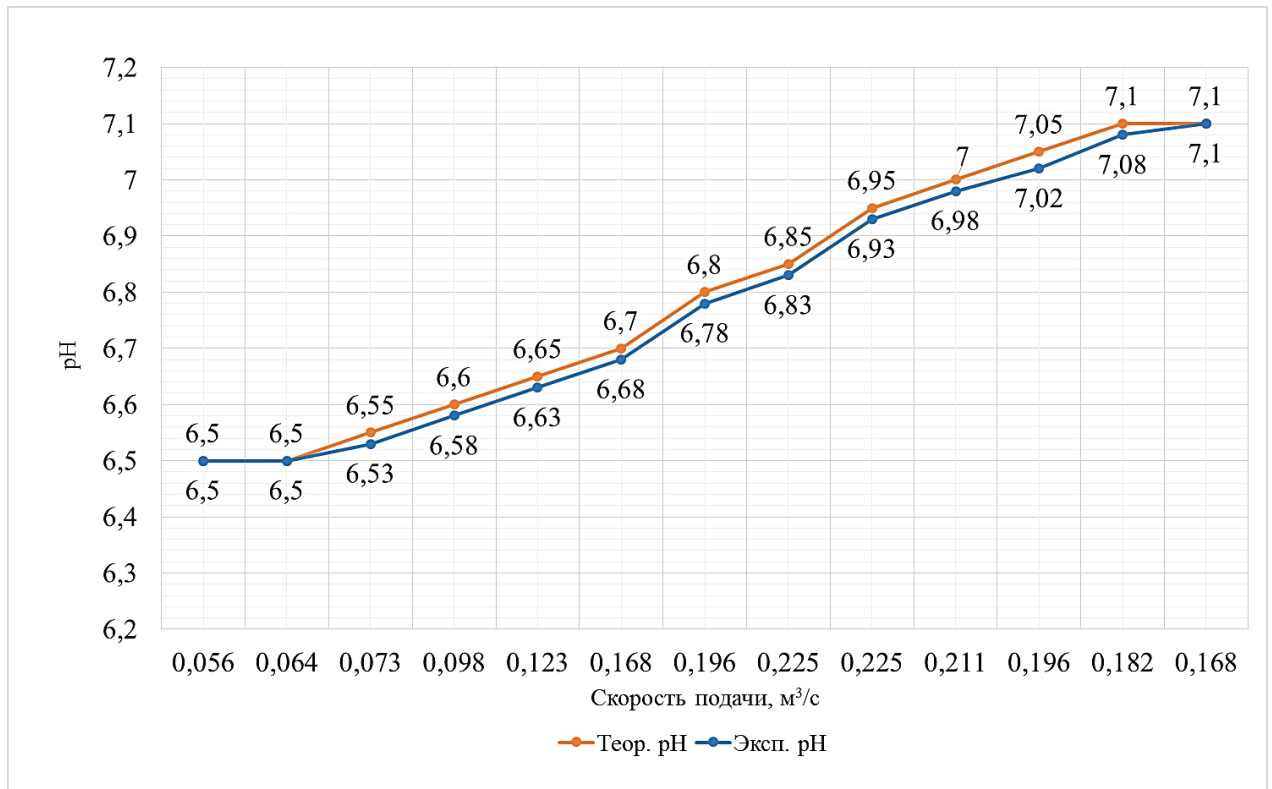


Рисунок 4.9 – Динамика восстановления pH после скачка до 6,5

Система точно следует расчетам с погрешностью $\pm 0,02$ pH , и полное восстановление происходит в течение 2-х часов.

Выводы по главе

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность разработанной математической модели и позволили установить оптимальные параметры работы метантенка. Было выявлено, что максимальный выход биогаза достигается при поддержании pH в диапазоне 6,9-7,1. Продолжительность удерживания субстрата, обеспечивающая наиболее полное его сбраживание, составила 28 суток.

Экспериментальные данные подтвердили значительное влияние гидровозмущения на эффективность процесса. Установлено, что применение системы гидродинамических воздействий с коэффициентом эффективности $\eta=1,2$ позволяет увеличить выход биогаза на 20% по сравнению с режимом без гидродинамических воздействий. Анализ динамики накопления биогаза

показал, что в первые 5 суток выделяется 35-40% от общего объема, при этом пиковая производительность наблюдается на 8-12 сутки. К 20 суткам процесс выходит на стабильный уровень, что свидетельствует о завершении основной фазы сбраживания.

Разработанная система автоматического регулирования подачи субстрата на основе контроля pH продемонстрировала высокую эффективность. Система обеспечивает поддержание оптимального кислотно-щелочного баланса, стабильность технологического процесса и предотвращение критических ситуаций.

Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими расчетами, что подтверждает адекватность разработанной математической модели с точностью 7%.

5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В МЕТАНТЕНКЕ С АНАЭРОБНЫМ БИОФИЛЬТРОМ

5.1 Технико-экономическое обоснование проекта и методика расчета экономической эффективности

Разрабатываемая установка анаэробного сбраживания свиного навоза представляет собой техническое решение для сельскохозяйственных предприятий России. Основными особенностями данной разработки являются система гидродинамического возмущения субстрата и автоматическая регулировка кислотно-щелочного баланса, что в совокупности обеспечивает стабильный повышенный выход биогаза.

Для определения экономической эффективности применения интенсивной технологии анаэробной переработки органических отходов животноводства в биогаз и удобрение, разработана и создана биогазовая установка с анаэробным биофильтром. Оценка эффективности проведена для условий свинофермы с содержанием 110 голов животных в Иркутской области, что позволяет провести сопоставимый анализ с имеющимися исследованиями.

Экономическая эффективность проекта оценивается по нескольким ключевым параметрам: капитальные затраты на создание установки, эксплуатационные расходы, снижение приведенных затрат на переработку единицы навоза по сравнению с базовым (существующим) вариантом, а также годовой экономический эффект, включающий энергетические и экологические составляющие. При расчетах учитывались региональные особенности, включая стоимость электроэнергии, доступность материалов и количество работников. Методика расчета основана на рекомендациях ГОСТ Р 113.15.01-2019 «Наилучшие доступные технологии. Рекомендации по обработке, утилизации и обезвреживанию органических отходов

сельскохозяйственного производства» [34] и ГОСТ 23730-88 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки универсальных машин и технологических комплексов» [33].

Критерием оценки экономической эффективности является сравнительный годовой экономический эффект $\mathcal{E}_e$, который определяется по следующей формуле [5.1]:

$$\mathcal{E}_e = (Z_b - Z_n) \cdot P_{год} + \sum \mathcal{E}_{m.z} + Q_b \quad (5.1)$$

где, Z_b и Z_n (руб./т) – приведенные затраты по базовому (существующему) и новому варианту на единицу перерабатываемого навоза; $P_{год}$ (т) – годовой объем перерабатываемого навоза; $\sum \mathcal{E}_{m.z}$ (руб.) – сумма эффектов от ликвидации ущербов, причиненных техногенными загрязнениями (экологический эффект); Q_b (руб.) – стоимость товарной энергии (доход) от получения биогаза.

5.2 Расчет капитальных и эксплуатационных затрат

Для проведения сравнительного анализа в качестве базового варианта принята традиционная система утилизации навоза, включающая его хранение в лагунах и последующий вывоз. Новым вариантом является предлагаемая биогазовая установка с анаэробным биофильтром. Годовой объем переработки навоза ($P_{год}$) для свинофермы на 110 голов, исходя из нормы выхода 5 кг/сутки с головы [101], составляет:

$$P_{год} = \frac{110 \text{ гол.} \cdot 5 \text{ кг} / \text{гол} \cdot \text{сут} \cdot 365 \text{ сут.}}{1000} = 200,75 \text{ т} / \text{год}. \quad (5.2)$$

Капитальные затраты по базовому варианту для обустройства лагун:

- стоимость строительства навозохранилища (лагуны) объемом 200 м³-150 000 руб.;
- включает земляные работы, укрепление стенок, организацию подъездных путей;

$$\text{– удельные капиталовложения: } K_{y\partial(\text{баз})} = \frac{150000 \text{ руб}}{200,75 \text{ т} / \text{год}} = 747 \text{ руб} / \text{т}.$$

Капитальные затраты на изготовление метантенка и сопутствующего оборудования приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Капитальные затраты на изготовление метантенка производительностью 200,75 т/год (метантенк 10 м³)

№	Наименование	Стоимость единицы	Количество	Сумма, руб.
1	Стальной лист для биореактора, 10 м ³	80 000	1	75 000
2	Терморегулятор АРТ -18-5Н 0-60° С.	2 000	2	4 000
3	Ленточный электронагреватель 0,46 кВт	2 800	2	5 600
4	Электроды, краска, крепеж	-	-	10 000
12	Пенополистирол 10 мм, (теплоизоляция)	500	20	10 000
13	Газгольдер 5м ³	80 000	1	80 000
14	Датчик pH с автоматической системой регулировки	20 000	1	20 000
15	Насос для гидровозмущения	15 000	1	15 000
14	Зарплата монтажникам	-	-	50 000
	Итого			247 600

Удельные капитальные вложения на единицу перерабатываемого навоза ($K_{y\partial}$) определяется по формуле [87]:

$$K_{y\partial} = \frac{K}{P_{\text{год}}} = \frac{247600 \text{ руб}}{200,75 \text{ т / год}} = 1368 \text{ руб / т} \quad (5.3)$$

Эксплуатационные расходы включают в себя затраты на электроэнергию, техническое обслуживание и текущие ремонты, таблица 5.2.

Таблица 5.2 – Расчет затрат на электроэнергию

№	Оборудование	Мощность, кВт	Время работы, ч/год	Потребление кВт*ч/год	Затраты, руб/год
1	Насос	0,5	2920	1460	7 300
2	Электронагреватели	0,92	4380	4030	20 150
3	Система контроля pH	0,05	8760	438	2 190
	Итого			5928	29 640

Затраты на реновацию (амортизацию) оборудования (A_m) на единицу перерабатываемого навоза составляют [87]:

$$A_m = \frac{(\sum E_i \cdot a_i)}{P_{\text{год}}} \quad (5.4)$$

где a_i – коэффициент отчислений на реновацию (при сроке службы 10 лет, $a_i = 0,1$).

$$A_m = \frac{247600 \text{ руб} \cdot 0,1}{200,75 \text{ м} / \text{год}} = 137 \text{ руб} / \text{м} \quad (5.5)$$

Затраты на капитальный, текущий ремонты и техническое обслуживание (P_m) на единицу перерабатываемого навоза рассчитываются по формуле:

$$P_m = \frac{(\sum E_i \cdot (R_{ki} + R_{ti}))}{P_{\text{год}}} \quad (5.6)$$

где, R_{ki} , R_{ti} – коэффициенты отчислений на капитальный и текущий ремонт (приняты суммарно 0,05).

$$P_m = \frac{247600 \text{ руб} \cdot 0,05}{200,75 \text{ м} / \text{год}} = 68 \text{ руб} / \text{м} \quad (5.7)$$

Таким образом, прямые годовые эксплуатационные затраты на единицу перерабатываемого навоза (C_{yo}) для нового варианта составляют:

$$C_{yo(\text{нов})} = A_m + P_m + \Gamma / P_{\text{год}} = 353 \text{ руб} / \text{м} \quad (5.8)$$

Для базового варианта (транспортировка и хранение) эксплуатационные затраты в условиях Иркутской области оцениваются в 1 500 руб./т (включая стоимость транспортировки, аренду техники, зарплату водителей).

Приведенные затраты по вариантам определяются как:

$$Z = C_{yo} + E_n \cdot K_{yo} \quad (5.9)$$

где, E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ($E_n=0,15$).

– базовый вариант: $Z_6 = 1500 + 0,15 \cdot 747 = 1500 + 112 = 1\,612 \text{ руб.}/\text{т}$

– предлагаемый вариант: $Z_n = 353 + 0,15 \cdot 1368 = 353 + 205 = 558 \text{ руб.}/\text{т}$

5.3 Расчет годового экономического эффекта

Годовой экономический эффект ($\mathcal{E}_e$) рассчитывается по формуле (5.1) и включает в себя эффект от снижения приведенных затрат.

Эффект от снижения приведенных затрат на переработку навоза:

$$(Z_{\bar{o}} - Z_n) \cdot P_{\text{год}} = (1612 - 588) \cdot 200,75 = 211591 \text{ руб. / год} \quad (5.10)$$

Стоимость товарной энергии (доход) от получения биогаза ($Q_{\bar{o}}$):

– годовой выход биогаза: $200,75 \cdot 0,3 \cdot 0,4 \cdot 0,9 = 21,68 \text{ тыс. м}^3 / \text{год}$

– стоимость биогаза: $21680 \cdot 25 = 542000 \text{ руб. / год}$

Эффект (доход) от получения биоудобрений:

– объем биоудобрений: $200,75 \cdot 0,8 = 160,6 \text{ т. / год}$

– стоимость биоудобрений: $160600 \cdot 10 = 1606000 \text{ руб. / год}$

Экономия от снижения затрат на утилизацию отходов:

– снижение затрат на транспортировку и хранение: 100 000 руб./год

– общий годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_z = 211591 + (542000 + 1606000 + 100000) = 211591 + 2248000 = 2459591 \text{ руб. / год}$$

Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \frac{274600}{2459591} = 0,11 \text{ года} \approx 1,3 \text{ месяца} \quad (5.11)$$

В таблице 5.3 показана сравнительная экономическая эффективность вариантов переработки.

Таблица 5.3 – Сравнительная экономическая эффективность

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	Базовый вариант	Новый вариант
1	Годовой объем переработки	т	200,75	200,75
2	Капиталовложения	руб./т	150 000	274 600
3	Удельные капиталовложения	руб./т	747	1 368
4	Эксплуатационные затраты	руб./т	1 500	353
5	Приведенные затраты	руб./т	1 612	558
6	Эффект от снижения затрат	руб./год	-	211 591
7	Доход от биогаза	руб./год	-	542 000
8	Доход от биоудобрений	руб./год	-	1 606 000
9	Экономия на утилизацию	руб./год	-	100 000
10	Годовой экономический эффект	руб./год	-	2 459 591

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 0,11 года (около 1,3 месяца), что свидетельствует о высокой экономической целесообразности и эффективности предлагаемого технического решения.

Выводы по главе

Капитальные затраты на изготовление предложенного метантенка с биофильтром и устройством гидродинамического возмущения и автоматической системой регулирования *pH* составят примерно 274 600 рублей.

Ожидаемые эксплуатационные расходы составят 353 руб./т, при этом годовой доход от реализации биогаза и биоудобрений достигает 1 606 000 руб.

Годовой экономический эффект от внедрения метантенка с биофильтром и устройством гидродинамического возмущения и автоматической системой составит 2 459 591 руб. при сроках окупаемости менее 2-х лет.

Расчеты подтверждают экономическую целесообразность внедрения разработанной технологии в малые свиноводческие хозяйства, где нецелесообразно приобретать и устанавливать серийно выпускаемое заводское оборудование – оно не только дорогое, но и достаточно габаритное, сложное в обслуживании, эксплуатации и ремонте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 ($\eta=1,2$), 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 6,8-7,2. 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 $\eta=1,2$ 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 использовать свиноводческим комплексам и фермам, применяющим гидравлические системы удавления навоза и заинтересованным в снижении негативного воздействия на окружающую среду.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективным направлением работ по теме является исследование комплексной технологической линии утилизации органических отходов сельскохозяйственных предприятий, а также адаптация биогазовых установок с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущений под малые и средние сельскохозяйственные предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамец О. Концепция биогазовых станций. - Прага, 1987. - 9 с.
2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий /Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский и др. – 2-е изд., перер. и доп. - М.: Наука, 1976. – С. 280.
3. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника: Учеб. пособие. - М.: Высшая школа, 1980. – С. 552, ил.
4. Амерханов Р.А. Совершенствование методов оценки сельскохозяйственных энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии.: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.08/ Р.А. Амерханов. – Москва, 2004. – С. 40.
5. Анаэробная биологическая обработка сточных вод/ Тезисы докладов участников республиканской научно-технической конференции 15-17 ноября 1988г./ Кишинев, 1988г.
6. Андрюхин Т.Я., Буренков В.С. Опыт анаэробного сбраживания птичьего помета при различных температурных режимах / Тезисы докладов совещания «Биогаз-87». – Рига, 1987. – С.
7. Афтени И.Н. «Использование биогаза для получения электроэнергии в агропромышленных комплексах» МГТУ Им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.
8. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз. Теория и практика. (Пер. с нем. и предисловие М.И.Серебряного.) – М.: Колос, 1982. – С. 148, ил.
9. Баадер, В., Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер. – М.Колос, 1999. – 148 с.
10. Бадмаев Ю.Ц. Лабораторная установка для сбраживания навозных стоков с применением анаэробного биофильтра / Ю.Ц.Бадмаев, Ю.А.Сергеев // Сб. трудов Восточно-Сибирского государственного университета технологии и управления. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, - 2017. - № 13.С. 30-34.

11. Баротфи И., Рафаи П. Энергосберегающие технологии и агрегаты на жи-вотноводческих фермах/ Пер. с венг. Э.Шандора, А.И.Залепухина. – М.: Агропромиздат, 1988. – С. 288, ил.
12. Бесподстилочный навоз и его использование для удобрения. Предислов. и пер. с нем. П.Я. Семенова. – М., Колос, 1978.
13. Биогаз-85. Проблемы и решения: Материалы сов. - фин. симпоз. 4-6 фев-ря 1985г. – Москва; Хельсинки, 1985 – 279 с.
14. Биотехнология – сельскому хозяйству / А.Г. Лобанок, М.В. Залашко, Н.И. Анисимова и др., Под ред. А.Г. Лобанка. – Мн.: Ураджай, 1988. – 199 с.
15. Биотехнология: Учеб. пособие для вузов. В 8 кн./ Под ред. Н.С.Егорова, В.Д.Самуилова. Кн. 1: Проблемы и перспективы/ Н.С.Егоров, А.В.Олескин, В.Д.Самуилов. – М.: Наук.думка, 1989. – 152 с., ил.
16. Большая Советская Энциклопедия (В 30 томах). - 3-е изд. – М.: Сов. энциклопедия. Т.6. – 1971. – С.244.
17. Брагинец Н.В., Палишкин Д.А. Курсовое и дипломное проектирование по механизации животноводства. – 3 изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1991. – 191 с.
18. Броунштейн Б.И., Фишбейн Г.А. Гидродинамика, массо - и теплообмен в дисперсных системах. – Л.: Химия, 1977. – 280 с., ил.
19. Вакула В. Биотехнология: Что это такое? – М.: Молодая гвардия, 1989.
20. Васильев Ф.А. Технология получения и сжигания биогаза в котельных АПК//Магистерская дисс.
21. Веденев А.Г., Веденева Т.А. Биогазовые технологии в Кыргызской Республике. - Бишкек, «Евро», 2006. - 90 с.
22. Виестур У.Э., Кузнецов А.М., Савенков В.В. Системы ферментации. – Рига: Зинатне, 1986. – 174 с.

23. Виестур У.Э., Шмите И.А., Жилевич А.В. Биотехнология: Биологические аспекты, технология, аппаратура. – Рига: Зинатне, 1987. – 263 с.
24. Власьевский В.В., Евтеев В.К., Просвирнин В.Ю. Гидродинамические закономерности потока в установке метанового сбраживания / Тезисы докладов совещания «Биогаз-87». – Рига, 1987. – С.32.
25. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
26. Ворошилов Ю.И., Дурдыбаев С.Д., Ербанова Л.Н. и др. Животноводческие комплексы и охрана окружающей среды. – М.: Агропромиздат, 1991. – 107 с.
27. Гераскин Н.Н. Планировка и застройка фермерских усадеб. – М.: Колос, 2000. – 160 с., ил.
28. Гидравлика и гидравлические машины/ З.В.Ловкис, В.Е.Бердышев, Э.В.Костюченко, В.В.Дейнега. – М.: Колос, 1985. – 303 с., ил.
29. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах/ В.А.Мамаев, Г.Э.Одинария, Н.И.Семенов, А.А.Точигин. – М.: Недра, 1969. – 208 с.
30. Горбунов А.В. Центровывоз животноводческой продукции в агропро-мышленном комплексе. – М.: Агропромиздат, 1988. – 110 с.
31. Горленко В. А. Научные основы биотехнологии: учебное пособие. Ч. 1. Нанотехнологии в биологии / В. А. Горленко, Н. М. Кутузова, С. К. Пятунина. - Москва : МПГУ, 2013. - 261 с. : ил.
32. Горохова, Надежда Константиновна Состав молока и молочной продукции крупного рогатого скота Республики Саха (Якутия): автореферат дис. кандидата сельскохозяйственных наук : 06.02.10 Якутск 2010.
33. ГОСТ 23730-88 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки универсальных машин и технологических комплексов».

34. ГОСТ Р 113.15.01-2019 «Наилучшие доступные технологии. Рекомендации по обработке, утилизации и обезвреживанию органических отходов сельскохозяйственного производства».

35. ГОСТ Р 53790-2010 Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам.

36. ГОСТ Р 53790-2010. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотхо-дов. Общие технические требования к биогазовым установкам. – Москва : Изд. Стандартинформ, 2011. – 15 с.

37. ГОСТ Р 53790-2010. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам [Электронный ресурс]. – Введ. 2011-01-01. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53790-2010> (дата обращения 12.12.2014).

38. ГОСТ Р 55708-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Освещение наружное утилитарное. Методы расчета нормируемых параметров (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.11.2013 N 1362-ст).

39. Гура Б. Производство биогаза из жидкого и твердого навоза на сельхозпредприятиях. - Варшава, 1987. - 110 с.

40. Гюнтер Л.И., Гольдфраб Л.Л. Метантенки. – М.: Стройиздат, 1991. – 128 с., ил. Долгов В.С. Гигиена уборки и утилизации навоза. – М.: Россельхозиз-дат, 1984. – 175 с., ил.

41. Даянова Г.И. Анализ эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения: материалы из заседания научно-координационного совета ФГБНУ Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства. – Якутск, 2015.

42. Дикарев П. В., Макаров А. М., Волков И. В., Лазарев В. В. Компактная автономная когенерационная установка с микропроцессорной системой управления // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 8 (187). С. 72-74.

43. Докучаев Н.А., Стома Л.А., Гогин В.М. Удаление и использование навоза. – М.: Россельхозиздат, 1976. – 53 с., ил.
44. Долгов В.С. Гигиена уборки и утилизации навоза. – М.: Россельхозиздат, 1984. – 175 с.
45. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. – М.: Агропромиздат, 1983. – 351 с.
46. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн.2/ Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 351 с., ил.
47. Друзьянова В.П. Параметры, характеризующие энергетическую сторону процесса анаэробного сбраживания в накопительной биоэнергетической установке / Проблемы и перспективы подготовки специалистов для промышленно-хозяйственного комплекса. Материалы республиканской научно-практической конференции, 24 января 2003 г. – Якутск, 2004. – С.78...81.
48. Друзьянова В.П. Утилизация навоза крупного рогатого скота в биогазовых установках / Вузовская наука – основа подготовки агроспециалистов. Материалы республиканской научно – практической конференции, 27 – 28 марта 2003 г. – Якутск: дизайн – студия «Урсун», 2003. – С.98...99.
49. Друзьянова В.П., Петрова С.А. Технология производства биогаза из органического сырья в условиях Якутии. Монография, Якутск, 2014. - 171.
50. Друзьянова, Варвара Петровна Ресурсосберегающая технология утилизации бесподстильного навоза крупного рогатого скота в условиях Республики Саха (Якутия): диссертация кандидата технических наук: 05.20.01 Иркутск 2004.
51. Друзьянова, Варвара Петровна Энергосберегающая технология переработки навоза крупного рогатого скота: диссертация доктора технических наук: 05.20.01 Улан-Удэ 2015.

52. Дубровский В.С., Виестур У.Э. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. – Рига: Зинатне, 1988. – 204 с.

53. Евтеев В.К. Оценка биогаза как топлива// Пути повышения эффективности электротепловых процессов в сельскохозяйственном производстве Восточной Сибири: Сб. науч. трудов. – Иркутск: ИСХИ, 1989. – С 36...40.

54. Евтеев В.К., Друзьянова В.П. Особенности механизации животноводства в Республике Саха (Якутия) // Матер. регион. науч. – практ. конф. «Актуальные проблемы АПК». Ч.3: Механизация с.-х. пр-ва. – 2 март – Иркутск. ИрГСХА, 2001. – С.14...15.

55. Евтеев В.К., Просвирнин В.Ю. Имитационное моделирование энергоснабжения при анаэробном сбраживании птичьего помета// Пути повышения эффективности электротепловых процессов в сельскохозяйственном производстве Восточной Сибири: Сб. науч. трудов. – Иркутск: ИСХИ, 1989. – С 40...48.

56. Егорова Т. А. Основы биотехнологии: учеб. пособие для вузов / Т. А. Егорова, С. М. Клунова, Е. А. Живухина. - 4-е изд., стер. ; Гриф УМО. - Москва : Академия, 2008. – 207 с.

57. Егорова, Елена Николаевна Обоснование параметров метантенка малого объема с перемешивающим устройством для условий Республика Саха (Якутия) : диссертация кандидата технических наук : 05.20.01 Якутск 2017.

58. Ермоленков А., Павличенко В.Н., Мовсесов Г.Е., Маслич В.К. Показатели работы биоэнергетической установки// Мех. и эл. с/х-ва. – 1987. - №11 – С.62...63.

59. Зацепин С.С., Скляр В.И., Калюжный С.В., Варфоломеев С.Д., Пузанков А.Г. Влияние различных способов предобработки навоза КРС на интенсивность его метанового сбраживания/ Тезисы докладов совещания «Биогаз-87». – Рига, 1987. – С.47.

60. Иванов Б.И., Виестур У.Э., Швинка Ю.Э., Бабурин Л.А. Метод оценки составляющих энергетического баланса при культивировании

микроорганизмов в лабораторных метантенках// Изв. АН Латв. ССР – 1984. - №3. – С.91...95.

61. Калюжный С.В., Пузанков А.Е., Варфоломеев С.Д. Биогаз: проблемы и решения/ Биотехнология Т.21. – М., 1988. – 180 с.

62. Калюжный С.В., Столярова М.А., Варфоломеев С.Д., Соколова Т.Г. / Тезисы докладов республиканской конференции. – Кишинев, 1988. – С.32-36.

63. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.:Химия, 1971. – 784 с.

64. Кафаров В.В. Основы массопередачи. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1972. – 496 с.

65. Каюмов, Т. Х. Тепловой баланс биогазовой установки с дробильным устройством / Т. Х. Каюмов // Innovatsion Texnologiyalar. – 2022. – No. 2(46). – P. 67-71.

66. Келов К. Разработка научных основ технологии метанового сбраживания отходов животноводства и создание биогазовых установок с использованием солнечной энергии. //Дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. - Ашхабад, 1990. - 330 с.

67. Кенжаев И.Г., Турсунбаев И.А., Обозов А.Дж. Энергоустановки на базе двигателя Стирлинга. - Бишкек, Изд-во «Илим», 2006. - 149 с.

68. Кигель Е.М. Эксплуатация канализационных очистных сооружений. – Киев: Будивельник, 1978. – 144 с., ил.

69. Кобякова, Е.Н./ Перспективы применения продуктов биогазовой техно-логии в агропромышленном секторе РС (Я)// Петрова С.А., Друзьянова В.П., Петров Н.В. - Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2014. № 2 (35). С. 67-72.

70. Ковалев А.А. Технологии и технико-энергетическое обоснование производства биогаза в системах утилизации навоза животноводческих ферм.//Дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. - М., ВИЭСХ, 1998. - 330 с.

71. Ковалев А.А., Лосяков В.П. Результаты исследований экспериментальной биогазовой установки. //Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1987, №11. - с. 60...62.
72. Ковалев А. А., Ножевникова А. Н. Технологические линии утилизации отходов животноводства в биогаз и удобрения. М. : Знание, 1990.
73. Ковалев, Андрей Александрович Повышение энергетической эффективности биогазовых установок: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.20.01 Москва 2014 .
74. Коваленко В.П. Механизация обработки бесподстилочного навоза. – М.: Колос, 1984. – 159 с., ил.
75. Ковальчук, А. Н. Исследование воздействия кавитации на характеристики свиного навоза / А. Н. Ковальчук, Н. М. Ковальчук // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. – 2016. – № 18. – С. 13-16. – EDN ZGPZDP.
76. Комплекс мероприятий по биологическому обеззараживанию и переработке навоза и птичьего помета в условиях Якутии: Методические рекомендации/ РАСХН. Сиб. отд-ние НПО «Якутское». Якут. НИИСХ. – Новосибирск, 2000. – 16 с.
77. Кормановский Л.П., Марченко О.С. Опыт ЧСФР по производству биогаза из твердого навоза.//Механизация животноводческих ферм. Научно-техн.информ.сборник Информагротех. - 1990. - Вып.4. - с. 1...5.
78. Кузьмин А.Е. Гидравлическая характеристика доильных установок. - Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1997. – 176 с.
79. Ларионов Н.Н. Теплотехника. Учеб. Для вузов. -3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с., ил.
80. Лер Р. Переработка и использование сельскохозяйственных отходов /Пер. с англ. В.В.Новикова; Под ред. и с предисл. А.Н.Шимко. – М.: Колос, 1979. – 415 с.
81. Лукьяненко И.И. Перспективные системы утилизации навоза (в хозяйствах Нечерноземья). – М.: Россельхозиздат, 1985. – 176 с, ил.

82. Марченко В.И. Фактор интенсификации процесса анаэробного сбраживания помета/ Тезисы докладов республиканской конференции. – Кишинев, 1988. – С.

83. Мельников С.В. и др. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов/ С.В.Мельников, В.Р.Алешкин, П.М.Рощин. – 2-е изд., перераб. И доп. – Л.: Колос, Ленинградское отд-ие, 1980. – 168 с., ил.

84. Метантенк: А. с. 1161488 СССР/ В.В.Крикис, А.А.Абеле, В.Д.Прокопенко и др. – 1985. - №22. – С.109.

85. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу от животноводческих комплексов и звероферм (по величинам удельных показателей). Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха (НИИ Атмосфера), СПб: Интеграл, 1999 г. -32 с.

86. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утв. Минэкономики РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 N ВК 477).

87. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утв. 21.06.1999)

88. Методические указания по оценке технологического уровня и качества промышленного продукта. РД 50–149–79 [Электронный ресурс]; утв. Постановлением Госстандарта – 1979-04-17. – Москва: Изд-во стандартов, 1979.

89. Методическое пособие по дисциплине «Современные энергетические технологии». /Сост. Драгомиров С.Г. – Владимир: ВлГУ, 2016. – 28 с,

90. Механизация уборки и утилизации навоза/ В.М.Новиков, В.В.Игнатова, Ф.Ф.Костанди и др. – М.: Колос, 1982. – 285 с., ил.

91. Митков А.Л., Кардашевский С.В. Статистические методы в сельхозмашиностроении. М.: Машиностроение, 1978.

92. Мишунин И.Ф., Шевченко М.И. Этюды о биотехнологии:/ Отв. ред. В.К.Лишко. – Киев: Наук.думка, 1989. – 152 с., ил.
93. Мовсесов Г.Е., Павличенко В.Н. Исследования экологической эффективности БЭУ/ Тезисы докладов республиканской конференции. – Кишинев, 1988. – С.67...70.
94. Муромцев Г. Сельскохозяйственная биотехнология: Состояние, перспективы развития. – Международный сельскохозяйственный журнал, 1986. - №3 – С.56...61.
95. Муругов, В.П. Экономика автономных энергосистем в сельском хозяйстве с использованием возобновляемых источников энергии, 2002 г.
96. Мухамедов, Р.С., Тохтахунов, К.А., Захидов Р.А. Биогазовые установки и охрана окружающей среды. Судостроительная промышленность, Сер. Пром. Энерг. Охрана окружающей среды. Энергоснабж. Судов, 1990 г.
97. Навозохранилище для ферм и комплексов крупного рогатого скота Республики Саха (Якутия): Методические рекомендации/ РАСХН. Сиб. отделение НПО «Якутское». Якут. НИИСХ. – Якутск, 1993. – 12 с.
98. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 207 с.
99. Некрасов В.Г. Выбор оптимальной конструкции биогазовых метантенков// Мех. и электр. сель. хоз-ва. – 1987. - №11. – С.57...59.
100. Новые технические разработки сельскохозяйственных биогазовых установок. Technische Neuentwicklungen landwirtschaftlicher Biogasanlagen.// Korrespondenz Abwasser-1983, №6, с.406-414.
101. Нормы технологического проектирования свиноводческих предприятий (НТП 1-99)
102. Обработка и удаление осадков сточных вод. В 2-х т. Т.1. Обработка осадков/ Пер. с англ. Т.А.Карюхиной, И.Н.Чурбановой, И.Х.Заена. – М.: Стройиздат, 1985. – 236 с., ил. – Перевод изд.: Sludge Treatment and Disposal. V.1. Sludge Treatment. – Cincinnati, Ohio, 1978.
103. Операционная технология откорма крупного рогатого скота/ Сост. Е.А.Машков. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 220 с., ил.

104. Орецов А.А., Опыт Белгородской области по строительству биогазовых комплексов на отходах животноводства Журнал «Международная биоэнергетика»

http://www.infobio.ru/sites/default/files/Oreckhov_Alexsey_biogas.pdf.

105. Осмонов, Орозмамат Мамасалиевич, Научно-технические основы создания автономных биоэнергетических установок для крестьянских (фермерских) хозяйств в горных районах Киргизии // диссертация доктора технических наук: 05.20.01 Москва 2012.

106. Остроумов С.А. Введение в биохимическую экологию. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – С.176.

107. Отчет министерства сельского хозяйства Иркутской области о результатах деятельности за 2024 год
https://irkobl.ru/sites/agroline/Deyatelnost_ministerstva/Otchet_ministerstva/Otchet_2024.pdf

108. Панцхава Е.С. Твердофазная метаногенерация высококонцентрированных отходов сельскохозяйственного производства и городов/ Тезисы докладов республиканской конференции. – Кишинев, 1988. – С.5...9.

109. Петров Н.В. Обеспечение работоспособности бензиновых двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственной техники при переводе на биогаз корректированием регулировочных параметров двигателя. Дис.канд.техн.наук. – Улан-Удэ, 2013. – 194 с.

110. Попов Н.Т. Состояние земледелия Якутии и пути выхода из кризиса/ Аграрный сектор Якутии и пути выхода из кризиса. – М.: Изд – во МСХА, 1998. - С. 72..74.

111. Прикладная экобиотехнология / А. Е. Кузнецов, Н. Б. Градова, С. В. Лушников [и др.]. Том 2. – Москва : ООО "Издательство "БИНОМ. Лаборатория знаний", 2012. – 494 с. – ISBN 978-5-9963-1052-4. – EDN RAYNAP.

112. Просвирнин В.Ю. Ресурсосберегающая природоохранная технология утилизации птичьего помета. Автореф. дис. ...канд.техн.наук. – Иркутск, 1991. – 194 с.
113. Просвирнин В.Ю., Евтеев В.К. К описанию процесса анаэробного сбраживания в динамическом режиме// Механизация и электрификация с.-х. производства Восточной Сибири: Сб. науч. трудов. Иркутск: ИСХИ, 1996. – С.68...76.
114. Пузанков А.Г., Мхитарян Г.А., Гришаев И.Д. Обеззараживание стоков животноводческих комплексов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 175 с., ил.
115. Районирование и мелиорация мерзлотных почв Якутии. – Новосибирск: Наука, 1978. – 176 с.
116. Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации полигонов захоронения твердых бытовых отходов. / Сост. Абрамов Н.Ф. – ПермГУ, 2003.- 19 с.
117. Ресурсосберегающая технология производства экологически чистых органических удобрений. Друзьянова В. П., Петрова С. А., Охлопкова М. К., Сергеев Ю.А. Дуна. 2018 год. Т. 93. № 4. С. 398-403.
118. Российская Академия наук. Сибирское отделение. Якутский институт биологии. Отчет к договору на проведение работы (I часть).« Разработка технологии получения биогаза в сельских районах Республики Саха» (1995 – 1996 год).
119. С.К. Шерязов, В.В. Васенев и З.Б. Телюбаев, «Оптимизация параметров реакторов в анаэробных метантенках», Международная Уральская конференция по зеленой энергетике (UralCon) 2018, Челябинск, Россия, 2018, с. 80-85, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544375.
120. Савватеева И.А. / когенерация биогаза в электрическую энергию для организации летних ферм в Якутии // Друзьянова В.П. В сборнике: Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология. сборник трудов II международной научно-практической конференции. 2020. С. 47-51.

121. Савватеева И.А. /Электроэнергия из биогаза// Друзьянова В.П. Акту-альные вопросы аграрной науки. 2020. № 34. С. 27-37.
122. Савватеева И.А./Электроэнергия из биогаза Александров И.Ю., Друзьянова В.П., , Кокиева Г.Е. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 5 (187). С. 139-145.
123. Сельское хозяйство Республики Саха (Якутия): Стат. справ./ Госкомстат Республики Саха (Якутия). – Якутск: 2000. – 27 с.
124. Сидоренко О.Д., Черданцев Е.В. Биологические технологии утилизации отходов животноводства.- М.: Изд-во МСХА, 2001. – 75 с.
125. Система ведения сельского хозяйства в Республике Саха (Якутия) на период 2016-2020 годы. / Методическое пособие. - Якутский НИИСХ. – Якутск, 2016. – 202.
126. Состав и питательность кормов (союзные республики, экономические районы РСФСР): Справочник/ И.С.Шумилин, Г.П.Державина, Артюшин и др.; Под ред. И.С.Шумилина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 303 с.
127. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива: показатели по территориям. - Москва: «ИАЦ Энергия», 2007. - 272 с.
128. Старков А.А., Шевченко С.С., Архипов Г.И., Митин А.Н., Аникина Е.В., Лешин М.М., Ткачев Н.Т. Методика расчета энергетических затрат на животноводческих комплексах и фермах крупного рогатого скота – институт «Гипронисельхоз», утверждена Подотделом проектных организаций Госагропрома СССР 20 февраля 1987 г.
129. Статистическое моделирование и прогнозирование: Учеб. пособие/ Г.М.Гамбаров, Н.М.Журавель, Ю.Г.Королев и др.; Под ред. А.Н.Гранберга. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 383 с., ил.
130. Степанова В.Э. Возобновляемые источники энергии на сельскохозяйственных предприятиях. – М.: Агропромиздат, 1989. – 112 с., ил.
131. Стратегия и тактика исследований в земледелии на основе теории планирования эксперимента: Метод. рекомендации/ РАСХН. Сиб. отд-ие;

Под-гот. А.Я.Жежер, А.М. Криков, А.Н.Власенко, О.Д.Сорокин. – Новосибирск, 1999. – 110 с.

132. Тархаев П.О. Организационно-технологические и технические основы механизации процессов приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота Якутии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Новосибирск: РПО СО РАСХН, 1983. – 32 с.

133. 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.

134. 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.

135. 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.

136. 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.

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

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

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

140. 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.

141. 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.

142. 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.

143. 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.

144. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990
145. Текст: электронный // Российская книжная палата: [сайт]. – 2021. – [iknet.com.ua/ru/articles/useful-to-know/biogas-production].
146. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Под общ. ред. чл. - корр. РАН А.В.Клименко и проф. В.М.Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 564 с., ил.
147. Теплотехника: Учеб. для вузов / В.Н.Луканин, М.Г.Шатров, Г.М.Камфер и др; Под ред. В.Н.Луканина. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с., ил.
148. Теплотехника: Учеб. для вузов/ А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт и др.; Под ред. А.П.Баскакова. – 2 – е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с., ил.
149. Теплоэнергетика и теплотехника: Общие вопросы: Справочник/ Под общ. ред. чл. - корр. РАН А.В.Клименко и проф. В.М.Зорина. – 3-е изд., перераб. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 528 с., ил.
150. Тищенко, Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Справочник, М.. Химия. 2003г.
151. Третьякова Е.И. Разработка системы электроснабжения «Межениновской птицефабрики»//Магистерская дисс.
152. Унгуряну Д.В., Ионец И.Г., Санду М.А., Лозон Р.М. Интенсификация процесса анаэробной биологической очистки животноводческих сточных вод / Тезисы докладов республиканской конференции. – Кишинев, 1988. – С.40-44.
153. Унгуряну Д.В., Ионец И.Г., Чеботарева А.Г., Фуртунэ А.Г. К вопросу анаэробной биологической очистки сточных вод свиноводческих комплексов / Тезисы докладов республиканской конференции. – Кишинев, 1988. – С.44-48.

154. Федеральный закон от 10 января 2002г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».
155. Фёрстер Э., Рёнд Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа: Руководство для экономистов/ Пер. с нем. и предисл. В.М.Ивановой. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с., ил.
156. Физическая энциклопедия/Гл. ред. А.М.Прохоров. Ред. кол. Д.М.Алексеев, А.М.Балдин, А.М.Бонч-Бруевич, А.С.Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия. Т.1. Ааронова – Бома эффект – Длинные линии. 1988. – С.436.
157. Физические величины: Справочник/ А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С.214.
158. Фрумкин Б.Е. Развитие биотехнологии для сельского хозяйства и сотрудничества стран-членов СЭВ в этой области// Достиж. персп., 1984 - №35 – С. 12-15.
159. Чернов, Г.В. Антропогенная эпоха мусора. – 2008. №48, – с. 14-15.
160. Численные методы/ Н.И.Данилина, Н.С.Дубровская, О.П.Кваша и др. – М.: Высшая школа, 1976. – 368 с., ил.
161. Шаробаро И.Д. Состояние и перспективы развития биогазовых установок. //Обз. информация. - М., ЦНИИТЭИ, 1986. - 38 с.
162. Шекихачев Ю.А., Фиापшев А.Г., Кильчукова О.Х., Хамоков М.М. Определение параметров и режимов работы биогазовой установки для крестьянских (фермерских) хозяйств // Технология колесных и гусеничных машин. 2014. № 4. С. 16-24.
163. Шрамков В.М. Купите биогазовую установку// Энергия: экономия, техника, экология. - 2008. – С47...48.
164. Экологическая биотехнология: Пер. с англ./ Под ред. К.Ф.Форстера, Д.А.Дж.Вейза. – Л.: Химия, 1990. – Пер. изд.: Великобритания, 1987. – 384 с.: ил.

165. Янко В.Г., Янко Ю.Г. Обработка сточных вод и осадка в метантенках. – Киев: Будивельник, 1978. – 120 с.
166. Chen Ru Chen. The state of art review on the application of anaerobic di-gestion // Conservation Recycling – 1984. – Vol. 7 № 2 – 4. – P. 191...198.
167. Colleran E. Gnubal Anaerobic Sludge: G Lettinge et al. (eds) / 1988 Pudos, Wageningen (the Netherlands).
168. Comerfold J. M. Picken D. J. Free – convective mixing within an anaerobic digester // Biomass. - 1985. – Vol. 6 – P. 235 ...245.
169. Hashimoto A.G. Effect of mixing duration and vacuum on methan produc-tion rate from beef cattle waste // Biotechol. Bioeng. – 1982. – Vol. 24. – P. 9...23.
170. <http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002947000/rsl01002947471/rsl01002947471.pdf>.
171. <http://elibrary.ru/item.asp?id=50780424>.
172. <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bit.260100602>.
173. <https://iwaponline.com/ebooks/book/152/Anaerobic-Digestion-Model-No-1-ADM1?redirectedFrom=PDF>.
174. <https://iwaponline.com/ebooks/book/152/Anaerobic-Digestion-Model-No-1-ADM1?redirectedFrom=PDF>.
175. <https://mcx.gov.ru/>.
176. <https://mingkh.sakha.gov.ru/>.
177. <https://www.chem.msu.ru/rus/teaching/roschina/phys2/VIII.pdf>.
178. <https://www.dissercat.com/content/metodika-avtomatizirovannoi-komponovki-blokov-bortovogo-radioelektronnogo-oborudovaniya-i>
179. <https://www.yakutskenergo.ru/investors/disclosure/reports/annual-reports/>.
180. https://www-sop.inria.fr/members/Francis.Mairet/Mairet11_BT_ADM1algae.pdf.

181. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // SIAM J. Appl. Math. - 1963. - №11. - С. 431-444.
182. Ostergaard N. Influence of monensine on biogas production from cow manure // Bioenergy 84. – London, 1985. – Vol. 3. Biomass conversion / Ed. By H. Ellegard. – P. 427...430.
183. Prog. 6 th. Biogas Computer Conference (26.11 – 17.12.1987) – Stockholm, 1988. – 260 p.
184. 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.
185. Sweeten J. Methane production from livestock waste. - Texas Agricultural Progress, 1978, v.24, №3,-p. 19...22.

ПРИЛОЖЕНИЯ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022682143

**«Программа для численного прогнозирования
потребности моторного биогаза для заправки машинно-
тракторного парка сельскохозяйственных
предприятий»**

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования "Северо-
Восточный федеральный университет имени
М.К.Аммосова" (RU)**

Авторы: **Петров Николай Вадимович (RU), Друзьянова Варвара
Петровна (RU), Таханов Михаил Пурбаевич (RU)**



Заявка № 2022680756

Дата поступления 07 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 ноября 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Генеральный директор
СХАО «Белореченское»
Фрагменко Г.С.
«Белореченское» 2025 г.

АКТ

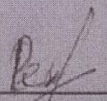
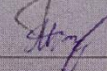
Производственной проверки научной разработки
Кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервиса»
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.
Аммосова» в СХАО «Белореченское»

Данным актом подтверждается, что результаты научных исследований старшего преподавателя Таханова М.П., кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервиса» ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в том, что в 2024 году в СХАО «Белореченское» была проведена производственная апробация способа утилизации органических отходов сельского хозяйства.

Способ предусматривает утилизацию органических отходов сельского хозяйства посредством применения метантенка с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения. Данный способ позволяет повысить эффективность утилизации органических отходов, обеспечивая стабильное производство экологически чистого удобрения и биогаза для энергетических нужд сельскохозяйственных предприятий. Проведенные исследования позволили получать высококачественное органическое удобрение и биогаз, который может быть использован в качестве источника энергии.

Главный энергетик
СХАО «Белореченское»

Старший преподаватель

 /Рухов Ю.В./
 /М.П. Таханов/

Приложение 4

Утверждаю председатель кооператива

СХПК «Усольский свинокомплекс»

Д.В. Сумароков /  /

**АКТ**

Производственной проверки научной разработки

Кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервиса»

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.

Аммосова»

В СХПК «Усольский свинокомплекс»

Данным актом подтверждается, что результаты научных исследований старшего преподавателя Таханова М.П., доцента Петрова Н.В. кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервиса» ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в том, что в 2024 году в СХПК «Усольский свинокомплекс» была проведена производственная апробация способа утилизации свиного навоза.

Способ предусматривает утилизацию свиного навоза посредством применения метантенка с системой контроля pH и автоматической регулировкой гидровозмущения. Данный способ позволяет повысить эффективность утилизации органических отходов, обеспечивая стабильное производство экологически чистого удобрения и биогаза для энергетических нужд сельскохозяйственных предприятий. Проведенные исследования позволили получать высококачественное органическое удобрение и биогаз, который может быть использован в качестве источника энергии.

Главный энергетик

СХПК «Усольский свинокомплекс»

Д.т.н., доцент

Старший преподаватель

 /Шейфлер А.А./
 /Н.В. Петров/
 /М.П. Таханов/

Приложение 5

Утверждаю
Проректор по образовательной
деятельности ФГАО ВО «СВФУ им.
М.К. Аммосова»



Голиков А.И.

« » 2025г.

АКТ

О внедрении результатов диссертации *Таханова Михаила Пурбаевича* в учебный процесс кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» Автодорожного факультета ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова»

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации *Таханова Михаила Пурбаевича* на тему «Способ утилизации свиного навоза» внедрены в учебный процесс кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» при изучении дисциплины «Альтернативные виды топлива» читаемых студентам по направлению подготовки (специальности) 23.03.03. Эксплуатация транспортно – технологических машин и комплексов (Профиль: Автомобильный сервис).

Зам. Декана по учебной работе
Автодорожного факультета

 /А.Е. Иванова/

и.о. зав. Кафедрой «ЭТиАС»
Автодорожного факультета

 /А.В. Алексеева/

Председатель УМК
Автодорожного факультета

 /И.А. Савватеева/

Приложение 6

Утверждаю
Проректор по ИРИ
ФГБОУ ВО Арктический ГАТУ
Нифонтов К.Р.
2025г.



АКТ

О внедрении результатов диссертации *Таханова Михаила Пурбаевича* в учебный процесс кафедры «Технологические системы АПК» Инженерного факультета им. В.П. Ларионова ФГАОУ ВО Арктический ГАТУ

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации *Таханова Михаила Пурбаевича* на тему «Способ утилизации свиного навоза» внедрены в учебный процесс кафедры «Технологические системы АПК» при изучении дисциплины «Ресурсосберегающие технологии и техника в сельском хозяйстве» читаемых студентам по направлению подготовки (специальности) 35.03.06 Агроинженерия, профиль «Технический сервис в АПК».

Декан инженерного факультета _____ /Н.П. Александров/

Зав. Кафедрой «ТС АПК»
Инженерного факультета _____ /Ю.Ж. Дондоков/

Председатель МК
Инженерного факультета _____ /Т.А. Парникова/

Приложение 8

Технические характеристики Бетар СГБМ-1.6

№	Наименование	Значение
1	Тип счетчика	Струйный
2	Материал	Латунь+нержавеющая сталь
3	Расстояние между осями	110 мм
4	Средний срок службы	12 лет
5	Расход газа	1.6 м ³
6	Порог чувствительности	Не боле 2,5 м ³ /ч
7	Рабочий диапазон температур	От -10 до +50 °С
8	Присоединительная резьба	½
9	Расположение присоединительных патрубков	Сбоку
10	Термокорректор	Нет
11	Габариты без упаковки	70x88x76 мм
12	Вес нетто	0,5 кг
13	Типоразмер	СГБМ-1,6

Приложение 9

Технические характеристики DC12V Flexcom TZ-01

№ п/п	Показатель	Значения
1	Параметры электросети	220 В./50 Гц
2	Максимальная мощность	80 Вт.
3	Максимальное вакуумметрическое давление	25 кПа.
4	Максимальная производительность	110 л/мин.
5	Диаметр входного/выходного штуцера	1/4 дюйма.
6	Диапазон температур окружающей среды	-15+40 С.
7	Относительная влажность	≤75%.
8	Длина электрического шнура	1,20 м.
9	Материал корпуса и верхней крышки	металл

Приложение 10

Технические характеристики теплоизоляции в виде «скорлупы»

№	Наименование показателя	Единица	Наименование показателя
1	Внешний вид	—	Мелкоячеистая структура, имеющая цвет от желтого до темно-коричневого
2	Плотность, не меньше	кг/м ³	60,0
3	Напряжение при 10% деформации при сжатии, не меньше	кПа	300
4	Водопоглощение, не больше	% по объему	10,0
5	Теплопроводность при 20 градусах, не больше	Вт/м*К	0,035
6	Теплопроводность при 50 градусах, не больше	Вт/м*К	0,033
7	Объемная доля пор (закрытых), не меньше	%	88
8	Температура использования, не больше	°С	150
9	Прочность на сдвиг (осевое направление), не меньше	МПа	0,12 (при температуре 23±2 °С) 0,08 (при температуре 140±2 °С)
10	Прочность на сдвиг (тангенциальное направление), не меньше	МПа	0,2 (при температуре 23±2 °С) 0,13 (при температуре 140±2 °С)