ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БУРЯТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ ИМЕНИ В.Р. ФИЛИППОВА»

На правах рукописи

Бадмаев Юрий Цырендоржиевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ

Специальность:05.20.01 – Технологии и средствамеханизации
сельского хозяйства

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей
школы РФ **Сергеев Ю.А.**

Улан-Удэ

2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение, цель и задачи исследований 3

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА 10

1.1. Анализ образования органических отходов животноводства в условиях Республики Бурятия, методы и способы их переработки 10

1.2. Состав и свойства навоза и навозных стоков свиноводства 12

1.3. Методы совершенствования процесса переработки органических отходов животноводства в метантенках и их анализ 15

1.4. Переработка навозных стоков в метантенках с биофильтром 21

1.5. Конструктивные особенности метантенков 31

1.6. Анализ математических моделей процесса накопления метанобразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре 34

Выводы 38

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В МЕТАНТЕНКЕ С АНАЭРОБНЫМ БИОФИЛЬТРОМ 39

2.1. Динамическая модель процесса накопления метанобразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре 39

2.2. Анализ основных зависимостей расчета дозы загрузки метантенка 46

2.3. Энергетическая модель биогазовой установки с анаэробным биофильтром 48

Выводы 56

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В МЕТАНТЕНКЕ С АНАЭРОБНЫМ БИОФИЛЬТРОМ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ 58

3.1. Общая методика и программа исследований 58

3.2. Техническое описание лабораторной установки 60

3.3. Методика определения технологических показателей перерабатываемого навоза в метантенке 64

3.4. Планирование и методика экспериментальных исследований процесса

накопления метанообразующих микроорганизмов в биофильтре 68
3.5. Методика проведения производственной проверки биогазовой установки (БГУ) с анаэробным биофильтром (АБ) 74
3.6. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований процесса переработки навозных стоков в биогазовой установке 79
Выводы 83
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВСВИНОВОДСТВА 84
4.1. Результаты лабораторного исследования процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях анаэробного биофильтра 84
4.2. Математическое моделирование процесса переработки навозных стоков в метантенке с биофильтром 89
4.3. Канонический анализ математических моделей по результатам лабораторных исследований 92
4.4. Результаты производственной проверки биогазовой установки (БГУ) с анаэробным биофильтром (АБ) 100
Выводы 106
ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ (БГУ) В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ 107
5.1. Экономическая эффективность анаэробной переработки навозных стоков свиноводства 107
5.2. Методические рекомендации производству при переработке навозных стоков в биогазовой установке (БГУ) с анаэробным биофильтром (АБ) 114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 116
Библиографический список 118
Приложения 135

ВВЕДЕНИЕ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основополагающим принципом устойчивого развития агропромышленного комплекса (АПК) в условиях Республики Бурятия является защита охраны окружающей среды, повышение качества жизни населения на основе решения технологических процессов в сельскохозяйственном производстве в экологическом направлении, внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий. Включение озера Байкал в список участков мирового природного наследия и принятия федерального закона «Об охране озера Байкал» накладывают серьёзные экологические ограничения на хозяйственную деятельность АПК Бурятии, т.к. расположение объектов сельского хозяйства (птицефабрики, свинокомплексы, фермерские хозяйства, подсобные хозяйства различных форм собственности и т.д.) на особо охраняемой территории предъявляют повышенные требования к проблеме переработки органических отходов животноводства, поскольку в природоохранной зоне озер и рек запрещается использование навозных стоков животноводческих ферм и комплексов, складирование навоза и отходов сельского хозяйства без согласования с соответствующими органами охраны природы.

В условиях Республики Бурятия, в агропромышленном комплексе система стойлового содержания крупного рогатого скота на небольших территориях (фермы крупного рогатого скота на 200,400, 600 голов и т.д.), в данное время значительно сократилась. Это, в первую очередь, связано с сокращением самого поголовья КРС и образованием малых частных сельскохозяйственных предприятий. Отсюда следует уменьшение выхода навоза КРС и снижение опасности загрязнения природной среды[21,29,35,122].

По сравнению с навозными стоками КРС, образование свиноводческих навозных стоков в условиях Бурятии и проблемы их переработки обстоят иначе, т.к. в последние годы в республике растет поголовье свиней, где

основное количество животных содержатся в сельскохозяйственных организациях. Так, в 1995 году была создана свиноводческий комплекс «Николаевский» с содержанием 5,0 тысяч голов животных. При существующих технологиях переработки органических отходов в республике свиной навоз трудно поддается обеззараживанию в более короткие сроки и приносит непоправимый ущерб окружающей среде. Отсутствие высокоэффективных технологий по переработке свиного навоза приводит к многолетним накоплениям его вблизи ферм и комплексов, расположенных рядом с естественными водоемами, что влечет за собой их сильное загрязнение. В связи с этим, одним из перспективных направлений утилизации органических отходов свиноводства является применение высокоэффективных технологий анаэробной переработки в биогазовых установках.

Проблемами разработки биогазовых технологий, созданием оборудований биоэнергетических станций занимаются несколько организаций России: Мосводоканал, ВИЭСХ, центр «ЭкоРос», ЦВНИИКОМЖ, АО «Стройиндустрия» (Республика Чувашия), АО Заволжский авторемонтный завод (Нижегородская область), которыми созданы несколько небольших биогазовых установок с объемами реакторов 4… 200 м^3. Такое малое количество действующих установок объясняется, прежде всего, отсутствием у большинства хозяйств и организаций необходимого финансирования на их создание. Но, тем не менее, проблемы охраны окружающей среды и постоянный рост цен на продукцию энергоносителей обусловили в последнее время в Российской Федерации проявлять значительный интерес к переработке органических отходов в метантенках, которая позволяет стабилизировать удобрительный потенциал сырья и одновременно получить метаносодержащий газ и оборотную воду [67,73,80,129].

Анаэробная переработка органических отходов является эффективным средством не только для решения энергетических задач, но и предотвращения загрязнения окружающей среды. В результате такого превращения твердые

органические вещества теряют запах, становятся менее привлекательными для грызунов и насекомых, разрушаются болезнетворные микроорганизмы. Кроме того, в результате конверсии углерода в биогаз, снижается его концентрация и увеличивается концентрация азота. Также, биоэнергетические установки или станции в виду их локального размещения вблизи животноводческих помещений не требуют дорогостоящих трубопроводов [6,59,93].

Далее следует, что в настоящее время агропромышленный комплекс Республики Бурятия переживает огромные экономические и социальные потрясения, которые в большей степени влияют на его эффективность, чем в других отраслях хозяйственной деятельности, т.к. он наиболее трудно перестраиваемый и сохраняет отрицательные последствия на долгие годы. Республика Бурятия является дотационным регионом Российской Федерации, т.е. средний тариф на электроэнергию в сельскохозяйственном производстве в настоящее время составляет 3,0 – 5,0 руб/кВт·ч в зависимости от вида потребителя. И, поэтому биогаз, в целях экономии энергетических ресурсов предприятий АПК, может быть использован для получения тепловой энергии или посредством газогенераторов трансформироваться в электрическую энергию, а также может послужить в качестве энергоносителя в двигателях внутреннего сгорания и в дизелях [21,26,67].

Автор диссертационной работы выражает глубокую благодарность д-ру техн. наук, профессору Ковалеву Александру Андреевичу за проведение консультаций в теоретическом направлении диссертационной работы и д-ру биолог. наук, профессору, член-корр. РАЕН Тайшину Владимиру Алексеевичу за оказанную помощь при выполнении экспериментальных исследований.

Актуальность темы. В настоящее время в условиях Республики Бурятия, расположенной в природоохранной зоне Байкальского региона с суровыми природно-климатическими условиями и большими ограничениями в сельскохозяйственной деятельности, остро стоит проблема переработки

органических отходов животноводства, особенно навозных стоков свиноферм. Эти стоки плохо перерабатываются в более короткие сроки и приносят непоправимый ущерб природной среде, приводят к многолетним накоплениям их вблизи ферм и комплексов, расположенных рядом с естественными водоемами, что влечет их сильное загрязнение. В связи с этим, одним из перспективных направлений выхода из сложившейся ситуации, является анаэробная их переработка в биогазовых установках, т.к. соответствует проблемам и решениям задач экологии и энергетики. Работа выполнялась согласно программе фундаментальных и прикладных исследований по научному обеспечению агропромышленного комплекса в Байкальском регионе на 2016-2020 годы Бурятской ГСХА им. В.Р. Филиппова по проблеме «Повышение эффективности инженерно-технической системы и ресурсосберегающих машинных технологий в агропромышленном комплексе Байкальского региона» (гос. регистрация № АААА-А17-117121270014-5).

Степень разработанности проблемы. Большой вклад в развитие исследований процесса переработки сельскохозяйственных отходов внесли ученые: Н.Г. Ковалев, В.Р. Крюков, Т.Я. Андрюхин, А.М. Бондаренко, Г.А. Заварзин, В.А. Зуев, В.П. Лосяков, Е.С. Панцхава, А.Н. Ножевникова, В.К. Евтеев, В.М. Шрамков и т.д., а также зарубежные ученые В. Баадер, М.Е. Беккер, В.С. Дубровскис, В.П. Павличенко, А.А. Упит и др.

Исследованиям по совершенствованию конструктивных и технологических параметров рабочих органов биогазовых установок посвящены работы: Ковалева А.А., Гриднева П.И., Осмонова О.М., Ковалева Д.А., Друзьяновой В.П. и др.

Научная гипотеза. Повышение интенсивности процесса переработки навозных стоков в метантенке путем разработки и установки в камере сбраживания анаэробного биофильтра с усовершенствованными конструктивными элементами рабочих органов.

Цель работы. Разработка технологии и технических средств для переработки навозных стоков свиноферм в условиях Республики Бурятия.

Объект исследования. Технологические процессы в метантенке с биофильтром при анаэробной переработке навозных стоков свиноферм.

Предмет исследования. Закономерности технологии переработки навозных стоков свиноферм.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель переработки навозных стоков свиноферм и произвести системный анализ.

2. Обосновать сруктурную модель и оптимальные параметры анаэробного биофильтра в биогазовой установке при переработке навозных стоков свиноферм.

3. Разработать технологическую схему и методические рекомендации переработки навозных стоков с получением биогаза и удобрений в производственных условиях.

4. Провести оценку технико-экономической эффективности технологии переработки навозных стоков в условиях Байкальского региона.

Научная новизна работы:

1. Разработаны динамическая и энергетическая модели для определения эффективности работы биофильтра в метантенке при переработке навозных стоков.

2. Разработана биогазовая установка с биофильтром для переработки навозных стоков свиноферм в интенсивном режиме.

3. Обоснована технологическая схема биогазовой установки с модульной 2-х ступенчатой переработкой навозных стоков в интенсивном режиме.

Теоретическая и практическая значимость работы. Обоснована методика расчёта технологии переработки навозных стоков в метантенке с использованием анаэробного биофильтра. Разработаны методические рекомендации для больших объёмов анаэробной переработки навозных стоков в интенсивном режиме.

Методология и методика исследований. При выполнении диссертационной работы использовались стандартные методики с применением классических положений теоретической механики, сопротивления материалов и математического моделирования. Лабораторные, производственные и экономические расчеты осуществлялись в соответствии с действующими ГОСТами и ОСТами. Разработка математических моделей взаимодействия биофильтра с перерабатываемой средой в метантенке и последующие экспериментальные исследования были выполнены на основе планирования многофакторных экспериментов и регрессионного анализа полученных данных с использованием программ MicrosoftOffice, стандартное програмное обеспечение..

Степень достоверности и апробация работы.

Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на научно-практических конференциях преподавателей, сотрудников, аспирантов Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р.Филиппова (Улан-Удэ, 2003-2009; 2015;2016) и Восточно-Сибирского государственного университета технологии и управления (Улан-Удэ, 2003;2017), на Международных научно-практических конференциях «Народы Центральной Азии в XXI веке (Улан-Удэ, Улан-Батор, 2004 и 2014), «Энергообеспечение и энергоснабжение в сельском хозяйстве (Москва, 2003) и на II Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие и природоохранные технологии» (Улан-Удэ, 2003), на научно-практической конференции «Экологическая безопасность, сохранение окружающей среды и устойчивое развитие регионов Сибири и Забайкалья»

(Улан-Удэ, 2002), на IV Международном симпозиуме «Проблемы устойчивого развития в XXI веке (Биробиджан, 2002),

Внедрение. Результаты научной разработки внедрены в ЗАО «Свиноводческий комплекс «Николаевский», Республика Бурятия. Тарбагатайский район, пос. Николаевский (2006 г.); в ООО СПК «Тамча» Республики Бурятия, Селенгинский район, село Цайдам (2015 г.); КФХ «Мункуев М.А.»Республика Бурятия, Селенгинский район, село Баян-Зурхэ (2017 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 18 работах, в том числе 1 монографии, в 6 статьях в журналах из списка ВАК, 1 статье в международных изданиях и 1 авторском свидетельстве на изобретение.

Основные положения, выносимые на защиту:

1.Динамическая и энергетическая модели процесса переработки навозных стоков свиноводства в метантенке с биофильтром.

2.Параметры оптимизации конструктивных элементов биофильтра для интенсификации процесса анаэробной для переработки навозных стоков.

3.Закономерности процесса взаимодейтсвия лопастей биофильтра с перерабатываемой биомассой в метантенке.

4.Технико-экономическая оценка эффективности переработки навозных стоков свиноферм в метантенке с анаэробным биофильтром.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 153 листа машинописного текста, 14 таблиц, 35 рисунков и 9 приложений. Список использованной литературы 144, в том числе 3 источника иностранной литературы.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА

1.1. Анализ образования органических отходов животноводства в условиях Республики Бурятия, методы и способы их переработки

Устойчивое развитие агропромышленного предприятия возможно при условии одновременного решения экологических, экономических, социальных и технологических проблем региона. Реализация стратегии устойчивого развития требует согласования экономического развития всех хозяйствующих объектов с жесткими рамками экологических ограничений видов деятельности, оказывающих негативное воздействие на уникальную экологическую систему озера Байкал и природные ландшафты его водоохраной зоны. На 01 января 2020 года преобладающее количество голов крупного рогатого скота Республики Бурятия содержатся в хозяйствах населения -72,0%(293,1 тыс. голов), однако, в сельскохозяйственных организациях содержатся большое поголовье свиней – 71,0 % (104,3тыс. голов) и птиц – 61,6 % (1553,5 тыс. голов) от общего поголовья, которые сконцентрированы на небольших территориях – свиноводческих и птицеводческих предприятиях. Отсюда следует, что ежегодное образование органических отходов в сельскохозяйственных организациях АПК республики в настоящее время составляет около 900 тыс. тонн, из них птичий помет – 55,2 тыс. тонн и свиноводческие навозные стоки – 342,4 тыс. тонн[36,49].

Республика Бурятия расположена на территории свойственной с резко континентальным двухфазным гидротермическим режимом, т.е. весенний и раннелетний период прохладный, засушливый с поздними весенними заморозками и холодными ветрами. В связи с этим, в республике остро стоит проблема переработки и утилизации органических отходов животноводства. Переработку навоза КРС для получения удобрений в сельскохозяйственных организациях и в хозяйствах населения республики проводят в основном

методом компостирования, т.е. жидкий навоз смешивают с материалами, которые облегчают доступ воздуха – с торфом, землей, известью, соломой или опилками. Основной недостаток этого способа заключается в ограниченности применения из-за суровых природно-климатических условий республики. Однако, в настоящее время, одной из важнейших проблем предотвращения отрицательного воздействия на окружающую среду в Бурятии, является проблема переработки свиного навоза, т.к. в условиях промышленного свиноводства характерно бесподстилочное содержание животных с применением гидравлических систем удаления навоза влажностью 92-95%, где использование большого количества воды значительно увеличивает объёмы навозных стоков и затрудняет их переработку и применение. Наблюдения, проведенные по Республике Бурятия, свидетельствуют о том, что на свиноводческих предприятиях не обеззараживаются и не используются объемы образующихся навозных стоков. Использование отстойников, биологических прудов и лагун, навозохранилищ и накопителей навоза ограничиваются особенностями природно-климатических условий республики. Основная причина неудовлетворительного состояния - это наличие устаревших очистных сооружений, требующих ремонта или замены на новое или просто отсутствие каких-либо средств очистки, а также недостаточность финансирования природоохранных мероприятий в республике.

Отсюда следует, что из наиболее перспективных направлений переработки жидкого свиного навоза является анаэробная переработка в метантенках, в результате которого происходит резкое снижение концентрации органических загрязнений в отходах или в навозных стоках с одновременным образованием биогаза, который можно в дальнейшем использовать как энергоноситель для сельскохозяйственного производства[54, 110].

Активное использование метаногенеза при сбраживании органических отходов является, по современным представлениям, одним из наиболее

перспективных путей совместного решения экологических и энергетических проблем в сельскохозяйственных организациях Бурятии.

1.2. Состав и свойства и существующие технологии переработки навоза и навозных стоков свиноводства

Основной состав свиного навоза – это кал и моча, а из общего объёма экскрементов влажностью 73,4 и 97,1% образующихся на свиноводческих предприятиях приходится на крупных животных – 60%, а на молодняк – 18%. Среднесуточное содержание сухих веществ в навозе составляет 0,62кг и органических веществ 0,53кг в экскрементах 1-го животного. В зависимости от содержания сухого вещества (СВ) в свином навозе, согласно данных НТП-17-99 различают: твёрдый навоз, с содержанием СВ более 27%; полутвёрдый, СВ 17-27%; полужидкий, СВ 8-17%; жидкий навоз, СВ 3-8%; навозные стоки, с содержанием сухого вещества менее 3,0%[8,58,62,104].

Состав свиного навоза включает в себя минеральные, органические, биогенные и биологические вещества. Компонентами минерального происхождения являются коллоидные, глинистые, пылевидные и песчаные частицы, которые поступают животным вместе с кормами, а также образуются в результате разрушения полов, решёток и навозных каналов. Вся масса компонентов минерального происхождения находится в составе частиц размером до 1,0мм. В свином навозе ориентировочно содержатся частицы размером: до 0,5мм – 38%; 0,5 - 1,0мм – 21%; 1,0 – 2,0мм – 18% и более 2,0мм – 2,3мм [104].

Компонентами органического происхождения являются органические вещества, находящихся в растворённом состоянии и в виде частиц разного размера и разной степени разложения (в том числе семена сорных трав), которые поступают с экскрементами, подстилкой и кормами. Белки, жиры, углеводы обладают энергетической ценностью и способны разлагаться анаэробными микроорганизмами с образованием биогаза.

Содержание биогенных веществ в экскрементах зависит главным образом от рациона кормления и возраста животных.

К биологическим компонентам относятся бактерии, микробы, вирусы, яйца гельминтов. Использование неподготовленного навоза может стать источником заражения окружающей среды[117].

Проведённый аналитический обзор состава свиного навоза и стоков позволяет определить его свойства как сырьевую биомассу по производству биогаза и удобрений.

Свиной навоз и навозные стоки также характеризуются своими свойствами: физическими, теплотехническими, механическими, химическими, биологическими, дисперсионными (дисперсными) и микробиологическими (рисунок 1.1).

Рисунок 1.1 – Свойства свиного навоза.

Одним из основных показателей, характеризующий свойства свиного навоза, является его влажность, зависящая от системы его удаления из животноводческих помещений. Например, при механическом удалении навоза и подстилочном содержании животных влажность составляет 75- 90%, при бесподстилочном – 90-95%, а при гидравлическом смыве – 97- 99%, т.е. по мере разбавления водой изменяются физические свойства свиного навоза, а также содержание питательных веществ[60].

Теплотехнические свойства навоза характеризуются температурой удельной теплоёмкостью и теплопроводностью. При влажности навоза более 95% и температуре 32°С теплопроводность равен 0,0712 Н/м. Также, следует отметить, что содержание сухого вещества в навозе характеризует химические свойства свиного навоза. Сухое вещество состоит из органической (75-85%) и неорганической (15-25%) частей [104,108].

По данным литературных источников, при влажности навоза 88,1% в процентах к сухому веществу характеризуется следующими величинами: азот общий – 5%; азот аммиачный – 3,5%; фосфор – 2,1%; калий – 2,1%; магний – 0,8%; кальций – 1,6%; натрий – 0,8%. Значительное содержание биогенных веществ позволяет использовать свиной навоз как ценное органическое удобрение[8,104].

Биологические свойства свиного навоза зависят от содержания бактериальных включений, яиц гельминтов и семян сорных растений. Микробиологическим исследованиями установлено, что микробное число в навозе, взятого сразу после внесения культур в исходную биомассу, было равно 17млн./мл, коли-титр – 10^{-6}, E.coli – (0,41) – 1×10^{6}[30,104,117].

Дисперсионные и дисперсные свойства свиного навоза характеризуются растворимыми и нерастворимыми соединениями.

В настоящее время существующие технологии переработки навозных стоков свиноводства можно представить в следующем виде (рисунок 1.2): биологический, химический и физический.

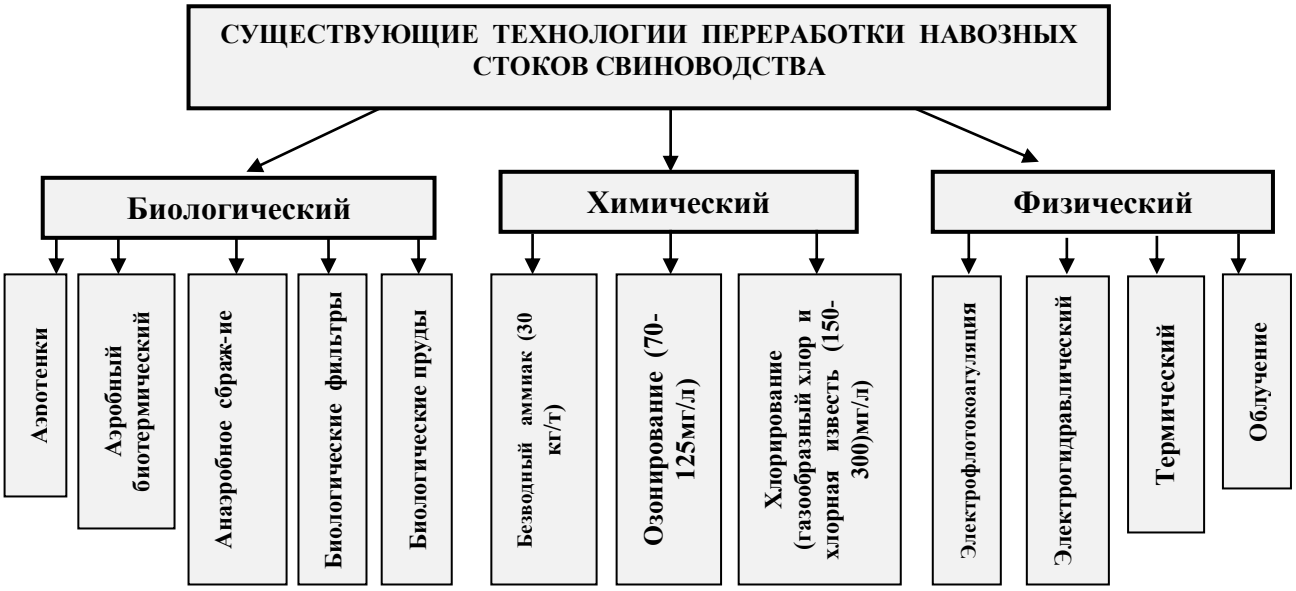


Рисунок 1.2. Существующие технологии переработки навозных стоков свиноводства.

1.3.Методы совершенствования процесса переработки органических отходов животноводства в метантенках и их анализ

Интерес к метановому сбраживанию органических отходов сельскохозяйственного производства в настоящее время значительно возрос почти во всех странах, в связи с дальнейшим ростом мировых цен на нефть и другие виды топлива. Отсюда следует, что в качестве первоочередных задач является создание технологических линий, работающих в интенсивном режиме с максимальной энергетической отдачей, и разработка универсального проекта биогазовой станции, которую при незначительных изменениях и дополнениях можно было бы осуществить в любом регионе, например, в условиях России, этого обязывает наличие широкого диапазона климатических поясов.

В настоящее время научные исследования интенсификации процесса анаэробной переработки навозных стоков ведутся в следующих основных направлениях:

- изучение процесса переработки высококонцентрированных органических отходов с концентрацией твердых частиц 30-50%;

- многостадийная переработка органических отходов, основанное в применении метантенков по модульной технологии;

- изучение процесса метанового сбраживания при участии психрофильных микроорганизмов при температуре 0…20°С;

- рециркуляция сброженного осадка и применение анаэробных биофильтров в камере сбраживания метантенка [30, 43, 77, 93].

Совершенствование процесса анаэробного сбраживания навозных стоков – это, прежде всего уменьшение цикла брожения или времени пребывания органической биомассы в метантенке. Известно, что доза загрузки метантенка и периодичность брожения органического сырья зависят от следующих параметров:

- температуры технологического процесса брожения и влажности сбраживаемого сырья;

- концентрации органических веществ в сбраживаемом субстрате;

- концентрации ионов водорода (pH) и окислительного и восстановительного потенциала (ОВП) сбраживаемого субстрата в метантенке;

- технологии загрузки и перемешивания сбраживаемого субстрата(непрерывная или периодическая)[9,16, 38, 92].

В связи с этим, методы совершенствования процесса анаэробной переработки навоза и навозных стоков в метантенках можно условно разделить на следующие виды (рисунок 1.3):

- механическое воздействие на сбраживаемый субстрат (измельчение исходной массы перед загрузкой в метантенк, перемешивание сбраживаемого сырья рециркулирующими газами брожения и рециркуляция осадка;

- биохимические методы воздействия на сбраживаемый субстрат (щелочными агентами, ферментами, порошкообразный активированный уголь, поверхностно-активные вещества, термическая обработка, электромагнитная обработка);

- термическая и электромагнитная обработка сбраживаемого субстрата;

- микробиологические методы, т.е. накопление метанообразующих микроорганизмов на различных носителях, где бактерии фиксируются на специальных инертных-бактерионосителях, в результате которого достигается повышенная концентрация микроорганизмов в метантенке.

Рисунок 1.3 - Существующие методы совершенствования процесса анаэробной переработки навоза и навозных стоков.

Механическим воздействием, влияющим на интенсивность процесса метанового брожения, является предварительная подготовка исходного сырья

к сбраживанию. Поэтому твердые материалы, в особенности растительного происхождения, должны быть подготовлены с помощью режущих, разрывающих или плющильных устройств, чтобы в результате эффективного механического воздействия получить частицы более меньшего размера, т.к. измельчение исходной массы перед загрузкой или качество подготовки сырья, дозированная и регулируемая подача его в реактор влияют на степень распада органического вещества сбраживаемого продукта и на скорость газовыделения. В результате измельчения, например навоза, получается гомогенная масса, температура которой на выходе из измельчителя на 6…8^{0}С выше, чем температура исходного сырья. Далее измельченную массу выстаивают при определенной температуре и времени, при которой благодаря деятельности микроорганизмов, удаляется кислород, снижается окислительно-восстановительный потенциал среды, образуются углеводы, спирты и летучие жирные кислоты. При сбраживании подготовленного сырья выделение биогаза начинается уже через несколько часов с начала опыта[57,79].

Далее следует, что метаболическая и репродуктивная способность метанообразующих микроорганизмов находятся в функциональной зависимости от температуры. Таким образом, температура влияет на объем газа, который можно получить из определенного количества органического вещества в течение заданного времени. Если сбраживанию подвергается масса без предварительного нагрева, то в камере сбраживания приходится устанавливать теплообменники и перемешивающие устройства. Теплообменники не обеспечивают равномерного температурного поля, а механические перемешивающие устройства создают высокие скорости перемешивания слоев сбраживаемой массы, увеличивают потери тепла в окружающую среду. Кроме того, в момент загрузки в камеру сбраживания исходной массы с температурой, значительно отличающийся температуры выбранного рабочего режима в метантенке, происходит охлаждение перерабатываемой массы. В многочисленных более ранних работах приняты

два температурных оптимума (около 33ºС и 54ºС), которым соответствуют наивысшие значения метаболической активности метанообразующих микроорганизмов, т.е. от 25ºС до 55ºС интенсивность процесса метанообразования возрастает, при дальнейшем повышении температуры до 60ºС процесс распада органического вещества замедляется, а в интервале 60…70ºС отмечается значительное замедление процесса брожения. Микробиологическая активность микроорганизмов почти прекращается, если температура снижается примерно до 15ºС. К перепадам температуры, в особенности к ее внезапным понижениям, микроорганизмы весьма чувствительны и реагируют на это снижением к воспроизведению. Исходя из этого, приняты оптимальные температурные параметры для мезофильного режима сбраживания 32…35ºС, а термофильного 52…55ºС.Отсюда следует, что мнения и выводы, относительно температурного режима процесса анаэробного сбраживания навоза неоднозначны и недостаточно изучены[11,49,54,57].

Для поддержания необходимого температурного режима в камере сбраживания метантенка существует два варианта: предварительный нагрев исходной массы перед загрузкой, где теплообменные устройства расположены вне камеры сбраживания метантенка и подогрев продукта брожения непосредственно внутри емкости. Необходимо отметить, что расположение теплообменников в камере сбраживания метантенка не обеспечивает равномерность распределения температурного поля по всему объему, если отсутствует перемешивающее устройство сбраживаемой массы.

Для выравнивания температуры в камере сбраживания нередко устанавливают всевозможные приспособления для перемешивания массы. Рекомендаций по выбору способов перемешивания практически нет, а влияние перемешивания на процесс метанового сбраживания навоза изучено пока недостаточно. Есть все основания полагать, что перемешивание в какой-то мере должно способствовать увеличению площади контакта между микроорганизмами и субстратом, т.е. многоуровневое перемешивание и

принудительная дегазация ускоряет процесс сбраживания. При перемешивании можно добиться равномерного распределения загружаемого навоза и микроорганизмов в реакторе, а с помощью принудительной дегазации воспрепятствовать накоплению промежуточных и конечных продуктов метаболизма. В настоящее время известны следующие способы перемешивания навоза в метантенке: непрерывное перемешивание; перемешивание только в определенное время, непосредственно после загрузки исходного навоза; периодическое перемешивание, например, по 10 минут в каждый час, т.е. нет однозначного мнения в применении методов перемешивания при метановом сбраживании навоза. Специалистами Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства испытывалось несколько методов перемешивания: инжекторами, пропеллерными мешалками, рециркуляционными насосами и рециркуляцией газа, но оптимального решения выявить не удалось. Например, во Франции проведено исследование по получению биогаза из жидкого свиного навоза, где применялось непрерывное анаэробное сбраживание при постоянном перемешивании субстрата или ферментация «свободными клетками». Эксперименты показали, что этот способ не надежен, т.к. ферментация не всегда происходит или занимает много времени. Далее, усовершенствованием непрерывной смешивающей системы является «контактный метод», который заключается в улавливании в отстойнике на выходе из реактора активной биомассы, чтобы обратно ввести вместе с исходным навозом (установка бельгийской фирмы «Биопроцессинг») [57,62,68,79].

Также необходимо отметить, что на процесс образования метана стимулирует добавление ацетата в метантенк и в тоже время это единственный субстрат метаногенеза, который в них обнаруживается. Следовательно, имеется несоответствие между скоростями образования и потребления ацетата. Это может быть связано с недостатком ацетатоиспользующей микрофлоры и, вероятно, необходимо достижение

определенной концентрации ацетата, чтобы она начала развиваться активно[22,99].

Многочисленные исследования посвящены интенсификации процесса брожения навоза биостимуляторами, т.е. биохимическое воздействие на сбраживаемый субстрат. Для того, чтобы повысить интенсивность образования метана и накопление метановой микрофлоры учеными были проведены исследования влияния добавок метанола, ацетата, а также целлюлозы в виде измельченной фильтровальной бумаги. Для ускорения выхода метантенка на рабочий режим были использованы отселекционированные ассоциации микроорганизмов путем внесения ее в виде засевного материала одновременно с подготовленным навозом, т.е. внесение экзогенных добавок уменьшает время выхода метантенка на рабочий режим до 3…5 суток, а использование сбалансированной синтрофной ассоциации микроорганизмов позволяет сократить этот период до 2…3 суток и начать непрерывный процесс сбраживания навоза с довольно высокой суточной дозы загрузки 30…50%. Однако в первом случае требуется дополнительный расход химических реактивов, во втором – введение промежуточных емкостей для выращивания необходимого засевного материала [9,11,49].

1.4. Переработка навозных стоков в метантенке с биофильтром

Одним из путей совершенствования процесса анаэробной переработки навозных стоков – это применение системы анаэробного биофильтра т.е. продление срока нахождения метанообразующих микроорганизмов в рабочей камере метантенка. Биогазовая установка с биофильтром в метантенке позволяет приспосабливаться к любым типам отходов животноводства от наиболее насыщенных, находящихся во взвешенном состоянии органическими веществами (свиной навоз, бычий навоз, птичий помет) и менее насыщенными - отходы агропищевой промышленности [10].

Искусственное накопление метанобразующих микроорганизмов в метантенке с биофильтром ставит своей целью стабилизацию активности микроорганизмов, расширения pH, температурного оптимума, удлинения срока действия биофильтра [33, 50, 72].

Ко всем методам накопления метанобразующих микроорганизмов и к используемым при этом биофильтрам предъявляются определенные требования:

- либо исключить, либо свести к минимуму контакт биофильтра с токсичными веществами, а также предотвратить нежелательное воздействие на него температурных режимов;

- осуществлять накопление таким образом, чтобы в результате метанобразующие микроорганизмы надежно удерживались в биофильтре;

- необходима хорошая операционная стабильность получаемых накопленных биокатализаторов для их длительной эксплуатации, что зависит от механической, химической и биологической устойчивости биофильтра в условиях конкретного технологического процесса;

- обеспечение накопленных микроорганизмов питательными веществами и отвод продуктов жизнедеятельности, т.е. конструкция биофильтра не должен создавать значительных диффузионных препятствий массообменным процессам;

- невысокая стоимость (экономическая сторона) применяемого метода накопления метанобразующих микроорганизмов и доступность исходных компонентов.

Одним из путей совершенствования процесса анаэробной переработки навозных стоков – это применение биофильтров, т.е. продление срока нахождения метанообразующих микроорганизмов в рабочей камере метантенка, которая позволяет приспосабливаться к любым типам субстратов от наиболее насыщенных, находящихся во взвешенном состоянии органическими веществами (свиной навоз, бычий навоз, птичий помет) и менее насыщенными - отходы агропищевой промышленности [10].

Искусственное накопление метанообразующих микроорганизмов в метантенке ставит своей целью расширения pH, температурного оптимума, удлинения срока действия биофильтра [33,50,72].

Ко всем методам накопления метанобразующих микроорганизмов и к используемым при этом биофильтрам предъявляются определенные требования:

- либо исключить, либо свести к минимуму контакт метанообразующих микроорганизмов с токсичными для них веществами, а также предотвратить нежелательное воздействие на микроорганизмы температурных и осмотических стрессов;

- осуществлять иммобилизацию таким образом, чтобы в результате клетки надежно удерживались носителем;

- необходима хорошая операционная стабильность получаемых биокатализаторов для их длительной эксплуатации, что зависит от механической, химической и биологической устойчивости биофильтра в условиях конкретного технологического процесса;

- обеспечение накопления микроорганизмов питательными веществами и отвод продуктов жизнедеятельности, т.е. материал носителя биофильтра

- не должен создавать значительных диффузионных препятствий массообменным процессам;

- невысокая стоимость (экономическая сторона) применяемого метода иммобилизации клеток микроорганизмов и доступность исходных компонентов.

Одним из методов интенсификации процесса сбраживания биомассы является система анаэробного биофильтра (рисунок 1.4), основанный на способности адсорбироваться на подходящих развитых поверхностях.

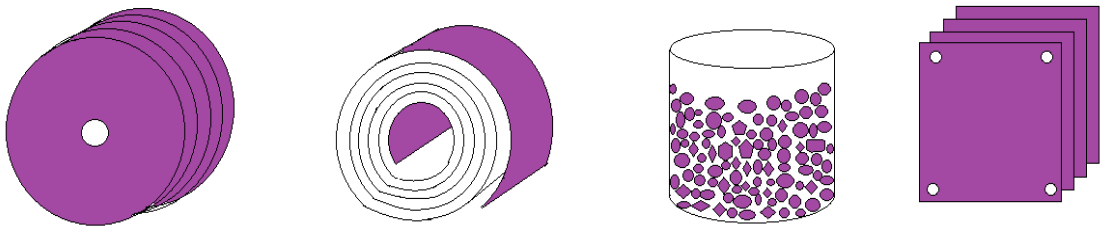
Рисунок 1.4 – Основные требования, характеристики и достоинства к анаэробным биофильтрам

Поскольку явление адсорбции микроорганизмов, обрастания постоянно существуют в природе, то основанные на этом методы не являются новыми. Новизна в основном заключается в применении материалов, не существующих в природе, как правило, различных полимеров. Степень закрепления метанообразующих микроорганизмов часто зависит не столько от полимерного адсорбента, сколько от его формы. Основные трудности при использовании физических методов накопления микроорганизмов возникают в обеспечении достаточной пористости получаемого материала, поскольку адсорбированные на носителе биофильтра микроорганизмы выделяют продукты жизнедеятельности, забивающие поры и создающие затруднения для доступа перерабатываемого продукта.

Накопленные на гранулированных адсорбентах метаногенные микроорганизмы применяют в реакторах, получивших название анаэробных фильтров (биофильтров). В последнее время проявляется большой интерес к анаэробным биофильтрам, к исследованию и применении их при переработке жидких стоков животноводства. Биофильтр является одним из основных элементов кооперационной биогазовой установки, где биопленка образуется в основном из ассоциации анаэробных микроорганизмов, которые разлагая

органические вещества преобразуют их в метан, водород, углекислоту без доступа кислорода. Преимуществом таких биофильтров, по сравнению с аэробными, является меньшее потребление электроэнергии и получение биогаза [7,17,45].

По конструктивным особенностям и видам применяемых материалов анаэробные биофильтры подразделяются на жёсткие засыпные и жёсткие блочные (рисунок 1.5).



а) б) в) г)

Рисунок 1.5 - Конструктивные особенности жёстких анаэробных биофильтров: а) дисковые; б) рулонные; в) засыпные; г) блочные

Жёсткие засыпные биофильтры по конструкции изготовления бывают в виде колец, седел, обрезков труб и других элементов и предназначены для анаэробной переработки слабонасыщенной органики, а в качестве источника изготовления могут быть использованы керамические, стальные и пластмассовые материалы. Удельная нагрузка по БПК для жестких засыпных биофильтров составляет 10-20 кг/м^3 (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Характеристика насадок для жестких засыпных биофильтров

№	Наименование насадок и их габаритные размеры (длина х ширина х высота), мм	Удельная пористость, $м^{-1}$	Свободный объем	Эквивалентный диаметр, м	Число единиц в 1 $м^3$, шт.	Масса 1 $м^3$, кг
1	2	3	4	5	6	7
1.1	Регулярные насадки: Керамические кольца Рашига. 50 х 50 х 5 80 х 80 х 8 100 х 100 х 10	 110 80 60	 0,735 0,72 0,72	 0,027 0,036 0,048	 8500 2200 1050	 650 670 670
2.1	Беспорядочные засыпные насадки: Керамические кольца Рашига. 10 х 10 х 1,5 15 х 15 х 2 25 х 25 х 3 35 х 35 х 4 50 х 50 х 5	 440 330 200 140 90	 0,7 0,7 0,74 0,78 0,785	 0,006 0,009 0,015 0,022 0,035	 700000 220000 50000 18000 6000	 700 690 530 530 530
2.2	Стальные кольца Рашига 10 х 10 х 0,5 15 х 15 х 0,5 25 х 25 х 0,8 50 х 50 х 1,0	 500 350 220 110	 0,88 0,92 0,92 0,95	 0,007 0,012 0,017 0,035	 770000 240000 55000 7000	 960 660 640 430

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7
2.3	Керамические кольца Паля					
	25 х 25 х 3	220	0,74	0,014	46000	610
	35 х 35 х 4	165	0,76	0,013	18500	540
	50 х 50 х 5	120	0,78	0,026	5800	520
	60 х 60 х 6	96	0,79	0,033	3350	520
2.4	Стальные кольца Паля					
	15 х 15 х 0,4	380	0,9	0,01	230000	525
	25 х 25 х 0,6	235	0,9	0,015	52000	490
	35 х 35 х 0,8	170	0,9	0,021	18200	455
	50 х 50 х 1,0	103	0,9	0,033	6400	415
2.5	Керамические седла Берля					
	12,5	460	0,68	0,06	570000	720
	25	260	0,69	0,011	78000	670
	38	165	0,7	0,017	30500	670
2.6	Керамические кольца					
	«Интолокс»	675	0,78	0,005	780000	545
	12,5	335	0,77	0,009	229000	560
	19	255	0,775	0,012	84000	545
	25	195	0,81	0,017	25000	480
	38	118	0,79	0,027	9350	530
	50					

Жёсткие блочные в виде решеток, блоков, собранных листов и мягкие блочные или рулонные (таблица1.2) - могут быть использованы пластмасс (поливинилхлорид), полиэтилен, асбестоцемент, керамика, пеностекло, металлическая сетка, синтетические ткани (капрон, нейлон) и другие материалы.

Таблица 1.2 - Характеристика насадок для жестких блочных, мягких блочных и рулонных биофильтров

№	Наименование насадок и их габаритные размеры	Удельная пористость $м^{-1}$	Свободный объем	Масса 1 $м^3$ кг	Удельная нагрузка по БПК, кг/ $м^3$. сут.	Степень очистки, %%
1	2	3	4	5	6	7
1	Пластмассовая решетка (поливинилхлорид) 50 х 50 х 40 х 22 (мм)	105	0,9	120	10-12 3,5	50-60 88-98,5
2	Гофрированные листы (полиэтилен) 500 х 500 х 60 (мм)	80	0,96	40	8-9	более 50
3	Гофрированные асбестоцементные листы 1,75 х 1,3 (мм)	56	0,8	250	до 20	60-80
4	Керамзит, 40-70 мм	120	0,73	500	9-13	60-70
5	Блоки пеностекла 0,45 х 0,45 х 0,12 м 2-18 мм	до 150			до 13	до 90
6	Металлические сетки (слоями или рулонами) 98 см		0,94	60	1,2	66-95
7	Синтетические ткани (капрон, нейлон на металлических стержнях)	80 85	0,94 0,94	15 35		
8	Пластмассовые пленки (рулон на металлических стержнях)	100 40-50	0,94 0,94	60 6	1,50 1,05	90-92 90-92

Например, фирма «СЖН» (Франция) широко рекламирует очистку животноводческих стоков путем анаэробного брожения, основанного на использовании фиксируемых микроорганизмов на пластиковом носителе произвольного наполнения и также биофильтр-метантенк с наполнителем в виде пористых образований или длинных вертикальных трубок со сквозными

параллельными каналами. Биофильтр-метантенк состоит из двух вертикальных ёмкостей, соединенных между собой и снабженных патрубками для выгрузки и подачи исходного сброженного субстрата и отвода биогаза, в верхней и нижней части которой слоями закреплен материал фиксирующий биопленку. Недостатком данной технологии, является форма устройства биофильтра, отсюда, низкая эффективность процесса очистки стоков из-за малой удельной площади накопительного материала и малой поверхности контакта очищаемых стоков [10].

В последнее время для очистки стоков животноводческих комплексов анаэробные биофильтры применяют в Японии, где наполнителем в основном используют природные камни, содержащие карбонат магния. Для очистки животноводческих высококонцентрированных стоков применяют многоступенчатые биофильтры с использованием высокоактивных анаэробных микроорганизмов. Применение анаэробных биофильтров практикуется и в США, особенно при очистке смешанных стоков (бытовых, промышленных и животноводческих стоков). Наполнителем в биофильтры используют пластмассовые блоки типа «Полигрид», «Доупак», «Флокор» размером 0,9 х 0,52 х 0,36 м, высота слоя 7…16 м. (Патент 4221657 США, Sep.9.1980).Сравнение работы биофильтров с загрузкой из пластмассы и доменного шлака показало, что эффект очистки составил 82 и 62 % соответственно. В сельской местности в США для очистки концентрированных стоков используют соломенные маты, рисовую шелуху, которые довольно устойчивы к загрязнениям и способствуют хорошему развитию и удержанию анаэробных микроорганизмов в метантенке [118].

В Германии проведено испытание анаэробного фильтра, предназначенного для очистки промышленных и бытовых сточных вод, в которых в качестве накопительного материала используют отходы бурого угля в виде неподвижного и псевдоподвижного слоя. Образующуюся избыточную биопленку определяют по разнице плотности [10,46].

В республике Польша разработан метод двухступенчатой очистки концентрированных стоков. Согласно этой технологии, сначала проводят анаэробное сбраживание в биофильтре в термофильном режиме (50...55ºС) в течение 4…6 суток, а затем обработку стоков осуществляют в аэробном фильтре, также в термофильном режиме. Процесс ведут до полной очистки стоков. Полученный биогаз используют для поддержания теплового баланса установки. Твердую массу используют в качестве удобрения [10].

В России широкое применение получают различного вида погружные дисковые и барабанные биофильтры с жесткими и мягкими дисками, предназначенные для очистки малых и средних расходов сточных вод. Такие биофильтры состоят из дисков 0,65-3 м, насаженные на горизонтальный вал, расстояние между дисками 2-3 см. Интерес, проявляемый к погружным биофильтрам, свидетельствуют о перспективности их применения, особенно для небольших объемов сточных вод и в том случае, когда коэффициент неравномерности поступления стоков велик. Сведения об эффективности очистки и рекомендуемых нагрузках по БПК для таких биофильтров разноречивы [91,101].

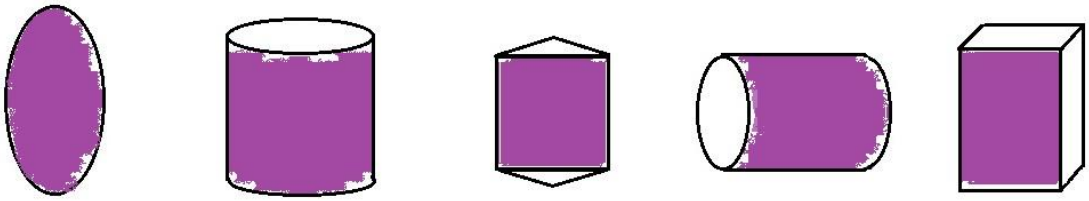
Исследования, проведенные специалистами России по определению окислительной способности погружных биофильтров различной конструкции показали, что эти биофильтры можно рекомендовать для очистки небольших количеств высококонцентрированных стоков от промышленных предприятий и сельскохозяйственных объектов. Эффект снижения органического загрязнения в данных биофильтрах зависит от продолжительности контакта сточной жидкости с биопленкой, т.е. скорости движения жидкости, также от степени ее загрязнения. Также, исследования в области применения дисковых вращающихся биофильтров для очистки сточных вод, практикуются в Японии, в Германии разработан вращающийся полый спиральный биофильтр для физико-химической и биологической очистки сточной воды, в частности, биофильтр с внешней и внутренней поверхностями для роста соответствующих микроорганизмов, а в США – вращающийся барабанный

биофильтр жесткого исполнения, внутри наполненный носителями микроорганизмов[101,135,136,137].

В результате действия метаногенного консорциума микроорганизмов происходит резкое снижение концентрации органических загрязнений в отходах или сточных водах с одновременным образованием биогаза, который можно в дальнейшем использовать как энергоноситель или углеродный субстрат для синтеза (кормовой) биомассы. Активное использование метаногенеза при сбраживании органических отходов является, по современным представлениям, одним из наиболее перспективных путей совместного решения экологических и энергетических проблем.

1.5. Конструктивные особенности метантенков

Из проведенного патентно-предметного анализа существующие биогазовые установки можно разделить по конструкции: резервуары с овальным сечением; цилиндрические резервуары с плоским низом и верхом; цилиндрические резервуары с коническими нижней и верхней частями; цилиндрические резервуары горизонтального расположения и прямоугольного изготовления (рисунок 1.6).



а) б) в) г) д)

Рисунок 1.6 - Конструктивные формы метантенков

а) овальные; б) цилиндрические с плоским дном и верхом; в) цилиндрические с коническим дном и верхом; г) цилиндрические горизонтальные; д) прямоугольные.

Конструктивное оформление метантенка весьма разнообразно, в общем случае это строго герметичный ферментер объемом от одного до нескольких

сотен кубометров, работающий с постоянным отбором биогаза и выгрузкой твердого осадка по мере развития технологического процесса.

Использование резервуара с овальным сечением представляется предпочтительным с точки зрения статической прочности, создания условий для перемешивания, отвода осадков и разрушения плавающей корки. Большие камеры сооружаются из железобетона, поэтому высокая стоимость изготовления таких резервуаров ограничивает их применение. В то же время для меньших объемов 25-30 м^3 можно изготавливать реакторы такой формы из полиэфирной смолы, армированной стекловолокном (стеклопластика) [7,8,28].

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, благодаря чему улучшались условия для роста метанообразующих бактерий. При снижении давления жидкая часть снова опускалась на дно резервуара. Поскольку эта установка не имела сколько-нибудь 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 [43, 66]. Резервуары такой формы, используемые в коммунальных установках для очистки и разложения стоков, изготавливают из бетона. Для сбраживания высококонцентрированных стоков (навоз, помет) предпочтительнее с точки

зрения затрат, стальные конструкции. Большой интерес к цилиндрическим резервуарам с коническими нижней и верхней частями представляется в США и Канаде [120]. Это объясняется в первую очередь тем, что анаэробная газификация очень удобна для избавления от неприятных запахов, характерных для свиного навоза. Цилиндрическая форма американо-канадской установки способствует снижению капитальных затрат, а также созданию наилучших возможностей для смешивания материала в резервуаре. В общем случае, при цилиндрической форме резервуара его диаметр должен быть больше или равен высоте. Если высота резервуара намного будет превышать его диаметр, то выход газа через самый верхний слой будет настолько сильным, что образуется пена. Рециркуляция биогаза в данной установке дает наилучшее перемешивание и к тому же благоприятствует газификации. В этом случае капитальные затраты больше, а эксплуатационные ниже. Подогрев сбраживаемого субстрата может осуществляться или посредством подачи пара через змеевики или путем прокачивания теплой воды через теплообменник. Расход тепла на поддержание температурного режима в реакторе равный 35°С для северной части США эквивалентен 1/3 суммарного выхода биогаза [38].

По системе сообщающихся резервуаров в настоящее время работают большинство сооружений биогазовых установок в Германии (установка системы «Дармштадт»). По этой системе в работе используется не менее двух последовательно соединенных резервуаров, которые попеременно наполняются навозной жижей и по истечении необходимого времени брожения опорожняются до определенного уровня остаточного шлама. Принцип действия накопительной системы основан на использовании одного резервуара, в котором происходит накопление и брожение навозной жижи до ее вывоза на поля. Резервуар опорожняют не полностью. Оставшийся шлам служит для сбраживания свежего материала.

Из проведённого анализа следует отметить, что при выборе формы, размеров и конструкции метантенка решающую роль играют следующие

факторы: массовый расход субстрата при заполнении рабочей ёмкости; заданный выход биогаза или степень сбраживания субстрата как функция, зависимая от концентрации сухих веществ в сырье, загрузки рабочего пространства, времени цикла сбраживания и интенсивности перемешивания; применяемая система производства; уровень механизации и автоматизации. Эти факторы определяются условиями производства и целями технологического процесса.

1.6. Анализ математических моделей процесса накопления метанобразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре

При изучении кинетики микробиологических процессов образования метана основное внимание уделяют на интенсивность переработки органической биомассы, которая зависит от скорости образования биогаза в метантенке. Отсюда следует, что несмотря на многолетние исследования и практическое применение анаэробного сбраживания, пока не получено общепризнанное математическое описание скорости образования биогаза, которое позволило бы применить при научно-исследовательских работах.

Авторы работ [9,53,65,68] считают, что концентрация микроорганизмов и количество образования биогаза в метантенке снижаются при увеличении дозы загрузки и выгрузки навоза, т.е. это происходит вследствие удаления из камеры сбраживания колоний активной биомассы - бактерий (далее «метанообразующие микроорганизмы»).А из анализа работ Ножевниковой А.Н., Елютиной Н.Ю., Некрасовой В.К. следует, что при сбраживании навозных стоков в метантенке и увеличение метанообразующих микроорганизмов в рабочей камере метантенка может быть достигнуто путем оптимизации дозы загрузки исходного сырья, при которой вынос активной микрофлоры и неперебродившего субстрата становится наименьшим[99, 100].

В диссертационной работе, теоретической основой построения математической модели процесса накопления метанообразующих микроорганизмов в биологических фильтрах, явилась кинетическая модель

Конто [38, 53, 55], которая может быть применена к более широкому классу органического сырья, начиная со слабонасыщенных отходов и в завершении - высококонцентрированными (навоз, птичий помет):

$$V_C = B(\frac{S}{\tau_Ц})(1 - \frac{\kappa}{\mu_m \ \tau_Ц - 1 + \kappa}), \qquad (1.1)$$

где V_C– скорость образования метана с перерабатываемого навоза, *м³/(м³ сут;* *B*– предельный выход биогаза из единицы органического сырья заданного состава при бесконечном времени переработки, *(м³/кг)*; *S*– исходная концентрация органического сырья в перерабатываемом навозе, *(кг/м³)*; $\tau_ц$– продолжительность переработки, *сут*; μ_m – максимальная удельная скорость роста биомассы в заданном процессе переработки навоза в метантенке, *(кг/м³сут)*;*К*– кинетический параметр процесса, *К =f(S)*[24, 84, 109].

Параметр *«К»* в биологической технологии выражает зависимость выхода биогаза от концентрации органического вещества в навозе в интервале температур 30…60°С[33, 77].

При S = 30…100 кг/м³, k = 1,5…2,0

При S = 100…150 кг/м³, k = 2,0…11,0

Максимальная удельная скорость накопления микроорганизмов в метантенке описывается линейной функцией в диапазоне температур 30…60°С и определяется следующей формулой:

$$\mu_m = 0{,}013 \cdot t_{пр} - 0{,}129 \ (сут^{-1}), \qquad (1.2)$$

где $t_{пр}$ *(К)* – температура технологического процесса.

Для математического описания зависимостей скорости выхода биогаза воспользуемся уравнением Михаэлиса-Метена, который имеет вид:

$$\frac{dX}{d\tau} = \gamma\left(-\frac{dX}{\mathrm{d}\tau}\right) - в_0 x \qquad (1.3)$$

где X– концентрация биомассы в метантенке, *кг/м*^{3};γ–прирост активной биомассы в метантенке при переработке субстрата, *кг/кг;в*$_0$- скорость отмирания активной биомассы, *сут*$^{-1}$;

Скорость накопления биомассы в метантенке, считают Зуев В.А., Гриднев П.И., Панцхава Е.С., может зависеть от концентрации органического субстрата, температуры, pH-среды и прочих факторов[54, 55, 95].

Скорость накопления активной биомассы в метантенке зависит от концентрации органического сырья и выражается зависимостью, предложенной Ж. Моно [14, 33, 49]:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{k_m \cdot Sx}{\kappa_S + S}, \tag{1.4}$$

гдеk_m–максимальная удельная скорость переработки навоза, *кг/(м*^{3} *сут);* k_s- константа Моно, равная концентрации субстрата, при которой удельная скорость роста биомассы в метантенке соответствует: μ = 1/2 μ_m (*сут*$^{-1}$).

Стационарность технологического процесса в метантенке с биофильтром обеспечивается при выполнении условия:

$$D, F_\delta, L_{en}, t_{пр}, X_{бм} = const, \tag{1.5}$$

где D–доза загрузки метантенка, *%*;F_δ– площадь поверхности лопастей биофильтра, *м*^{2};L_{en}– БПК$_{полн.}$ исходного сырья, *г/м*^{3}; $t_{пр}$– температура технологического процесса, *К*; $X_{бм}$– концентрация активной биомассы в биофильтре, осуществляющих процесс метаногенеза, *кг/м*^{3}.

Отсюда следует, что коэффициент трансформации органического сырья*«y»* в активную биомассу примет следующее выражение:

$$y = -\frac{dX_{бм}}{d\tau} = 0, \tag{1.6}$$

$$\frac{dX}{d\tau} = \frac{dX_{бм}}{\mathrm{d}\tau} \neq 0, \tag{1.7}$$

где $\rho_б$ – плотность биомассы, *кг/м*^{3}.

Система уравнений Ж. Моно, применительной к биофильтрам с активной биомассой, принимает вид:

$$\frac{dX}{d\tau} = \frac{\mu \cdot X_{бм} \cdot \mathrm{S}}{k_S + S} = const \quad (1.8)$$

,

Скорость изменения концентрации субстрата в метантенке «$-\frac{dS}{dt}$» примет следующее выражение:

$$-\frac{dS}{d\tau} = \frac{1}{\rho_б} \cdot \frac{\mu_S \cdot X_{бм} \cdot \mathrm{S}}{\kappa_\mathrm{S} + S} = const, \quad (1.9)$$

где $\rho_б$ – плотность биомассы, *кг/м*^{3};

Уравнение (1.8) описывает процесс накопления активной биомассы в биофильтре, а уравнение(1.9) – процесс снижения концентрации органических соединений в переработанном навозе.

Для описания внутренней задачи биосистемы «загрязнения органических отходов –накопление микроорганизмов в биофильтре» использована функциональная зависимость [24,38,58]:

$$S = f(F_\delta, t_{пр}, \delta, \rho_б, \tau, L_{en}), \quad (1.11)$$

где δ *(м/м*^{3}*)* - толщина образования активной биомассы в биофильтре.

Выводы:

1. Анализ состояния вопроса совершенствования процесса анаэробного сбраживания отходов животноводства показал, что существующие установки не обеспечивают переработку навозных стоков свиноводства в более короткие сроки с наименьшими затратами. В связи с этим, одним из перспективных направлений решения данной проблемы является разработка интенсивной технологии переработки навозных стоков свиноводства в биогазовой установке с применением анаэробного биофильтра.

2. Эффективность работы метантенков с биофильтрами в 2,5 раза выше, чем без биофильтра, т.е. во столько раз увеличивается выход биогаза с единицы перерабатываемого сырья. Недостатком процессов с накопленными метанобразующими микроорганизмами в биофильтрах является то, что они приспособлены для переработки растворимой органики, а для переработки высококонцентрированных навозных стоков в настоящее время мало изучено.

3. В результате экспериментальных исследований необходимо предъявлять особые требования к конструкции анаэробных биофильтров и метантенков, к качеству исходного органического сырья, выполнение которых обеспечат интенсивное ведение технологического процесса переработки навозных стоков.

4. Активное использование метаногенеза при сбраживании органических отходов является, по современным представлениям, одним из перспективных путей совместного решения экологических и энергетических проблем предприятий агропромышленного комплекса Республики Бурятия.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В МЕТАНТЕНКЕ С АНАЭРОБНЫМ БИОФИЛЬТРОМ

2.1. Динамическая модель процесса накопления метанобразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре

Основным направлением повышения интенсивности образования биогаза при переработке навозных стоков заключаются в искусственном увеличении метанобразующих микроорганизмов в метантенке, при которой вынос метанообразующих микроорганизмов и неперебродившего сырья уменьшаются. При анаэробной переработке навозных стоков сохранение метаногенной микрофлоры в метантенке имеет первостепенное значение, поскольку компенсировать потери ее из камеры сбраживания можно только путем увеличения продолжительности переработки, т.к. в перерабатываемом навозе имеется достаточная концентрация органических веществ. Однако, этот вариант, т.е. увеличение продолжительности переработки навоза, приводит к увеличению энергетических затрат и себестоимости производимого продукта[14,33].

Необходимым условием совершенствования процесса переработки навозных стоков является удержание метанообразующих микроорганизмов в рабочей камере метантенка. Это главный технологический принцип работы всех анаэробных фильтров, реализация которого возможна на основе способности метановых микроорганизмов создавать закрепленные макроструктуры.

Накопление метанобразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре происходит в условиях изменяющимися внешними воздействиями, обусловленных многочисленными и разнообразными факторами: температура, влажность, доза и периодичность загрузки метантенка, физико-механические свойства навозного стока, содержание органических веществ в сырье и т.п.

Входные параметры процесса переработки навозных стоков подразделяются на внешние и внутренние. Внешние параметры описывают условия функционирования метантенка, а внутренние параметры характеризуют элементы биофильтра (форма, количество рабочих органов, конструкцию частей и т.д.), свойства перерабатываемого сырья и состояние метанообразующих микроорганизмов в системе (изменение температуры и влажности сырья, скорости накопления, деятельности и концентрации анаэробных микроорганизмов, кинетику анаэробной переработки и т.д.).

Рассматривая функционирование метантенка как реакцию на входные воздействия и обозначив через $\overline{У} = (У_1, У_2,..., У_n)$ - вектор выходных параметров, а через $\overline{X} = (X_1, X_2,..., X_n)$ и $\overline{F} = (F_1, F_2, ..., F_n)$ соответственно векторы внешних и внутренних параметров, представим модель функционирования биогазовой установки в виде (рисунок 2.1) [56,89]:

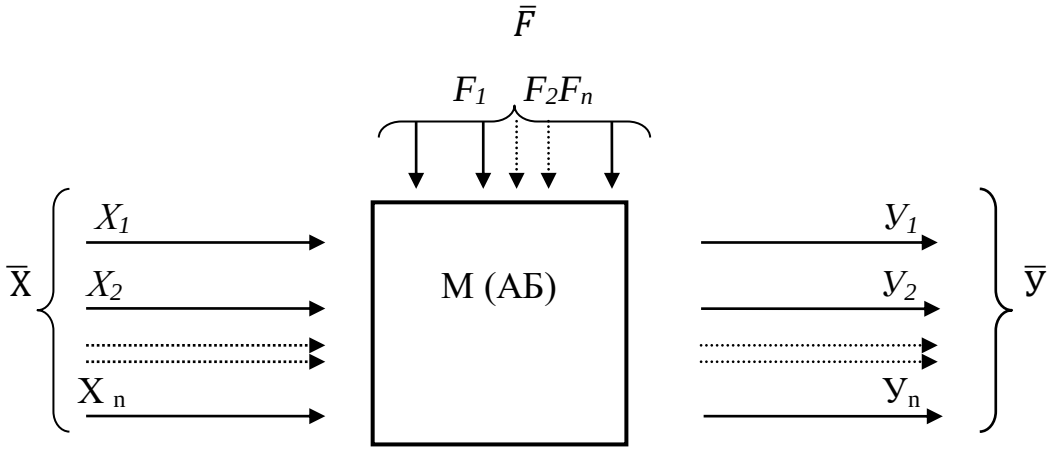


Рисунок 2.1 - Модель функционирования метантенка с биофильтром

Общая математическая модель процесса образования биогаза можно представить по принципу вход-выход в следующем виде:

$$\overline{У} = A(\overline{F}); \overline{X} \qquad (2.1)$$

Построение математической модели метантенка заключается в определении вида оператора $A=A(\overline{F})$, определяющего алгоритм преобразования внешних воздействий $\overline{X}$ в выходные параметры $\overline{У}$. Структура оператора *(A)* зависит не только от конструктивной схемы метантенка с биофильтром, но и от значения внутренних параметров.

Динамическую модель функционирования метантенка с биофильтром представим в следующем виде *М(АБ)* (рисунок 2.2):

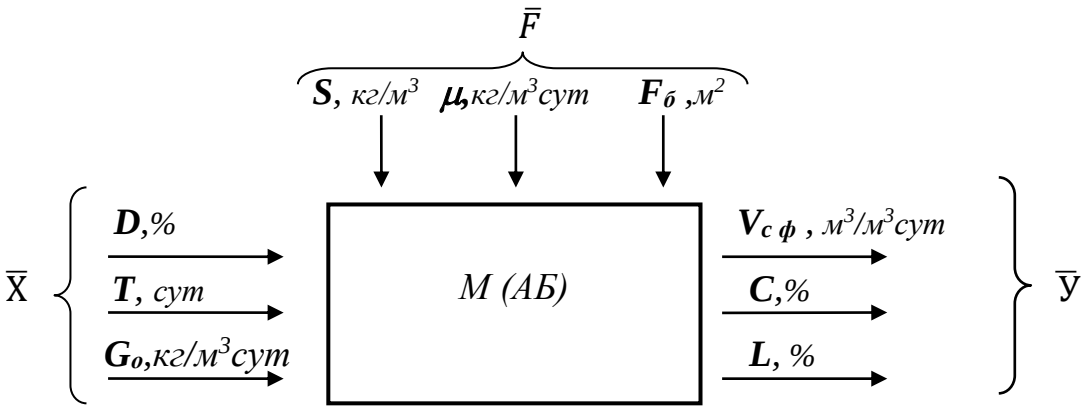


Рисунок 2.2 - Динамическая модель функционирования метантенка *(М)* с биофильтром *(АБ).*

Входные параметры: доза *(D,%)* и периодичность загрузки *(T, сут)* метантенка и содержание органического сухого вещества в навозном стоке *(G_o,кг/м³сут);выходные параметры*: скорость образования биогаза *($V_{сф}$, м³/м³сут),* метаносодержание в биогазе *(C,%)* и степень разложения органического вещества *(L,%)*; *внутренние параметры:* исходная концентрация органических веществ в субстрате *(S, кг/м³),* максимальная скорость роста микроорганизмов в заданном процессе ферментации *(μ ,кг/м³ сут),* общая площадь поверхности носителя биофильтра *($F_б$,м²).*

Теоретической основой для построения математической модели процесса накопления метанообразующих микроорганизмов в биологическихфильтрах послужила кинетическая модель Конто, которая может быть применена к более широкому классу органических отходов. Она описывает скорость образования биогаза *(V_C, м³/м³сут)* в зависимости от технологических параметров процесса анаэробной переработки навоза[14, 55,56]:

$$V_C = \frac{V_б S}{\tau_Ц}\left(1 - \frac{\kappa_S}{\mu\,\tau_Ц - 1 + \kappa_S}\right), \qquad (2.2)$$

где *$V_б$(м³/кг)*– предельный выход биогаза из органического вещества заданного состава при бесконечном времени переработки $\tau_ц$ *(сут)*; *S(кг/м³)* – исходная концентрация органического вещества в навозе; μ *(кг/м³ сут)*–

максимальная скорость роста микроорганизмов в заданном процессе переработки; k_S – кинетический параметр (константа полунасыщения).

Скорость образования биогаза $V_{сф}(м^3/м^3сут)$ с накопленной активной биомассой метанобразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре определяем по выражению:

$$V_{с\,ф.} = V_c + \Delta V, \qquad (2.2)$$

где $V_c(м^3/м^3сут)$ – скорость газообразования в традиционной биогазовой установке; $\Delta V(м^3/м^3сут)$ –изменение скорости газообразования в метантенке с биофильтром.

Отсюда следует, что ΔV может зависеть от следующих параметров:

$$\Delta V = f(X_{бм}, F_б, S, L, dS/d\tau_ц, \mu, \tau_ц и\ др.), \qquad (2.3)$$

где $X_{бм}(кг/м^3)$– масса анаэробных бактерий, накопленной на носителях биофильтра; $F_б(м^2)$ - общая площадь поверхности носителя лопастей биофильтра; $S(кг/м^3)$– концентрация органического вещества в перерабатываемом навозе; $L(\%)$– степень разложения органического вещества; $dS/d\tau_ц$ - изменение концентрации органического вещества в навозе за время переработки$(\tau_ц)$; $\mu(кг/м^3сут)$–скорость роста микроорганизмов в биофильтре.

Тогда, изменение скорости образования биогаза в анаэробном биофильтре определяем как:

$$\Delta V = X_{бм} \times K_б \times (\mu / S), \qquad (2.4)$$

где $K_б(м^3/кг)$– коэффициент образования биогаза с единицы активной биомассы биофильтра.

В биофильтрах, как правило, скорость накопления микроорганизмов $(\mu, кг/м^3сут)$ лимитируется концентрацией перерабатываемого навоза, что отражается зависимостью Ж.Моно [14, 55, 56]:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{k_m \cdot Sx}{\kappa_S + S}, \qquad (2.5)$$

где $\mu_S, (кг/м^3сут)$ - удельная скорость накопления микроорганизмов при данных условиях.

Скорость накопления активной биомассы в метантенке зависит от концентрации органического сырья и выражается зависимостью, предложенной Ж. Моно [14, 33, 49]:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{k_m \cdot Sx}{\kappa_S + S}, \qquad (1.4)$$

гдеk_m– максимальная удельная скорость переработки навоза, *кг/(м^3 сут);* k_s- константа Моно, равная концентрации субстрата, при которой удельная скорость роста биомассы в метантенке соответствует: $\mu = 1/2\ \mu_m$ (*сут$^{-1}$*).

Массу, накопленных анаэробных бактерий на поверхностях носителя лопастей анаэробного биофильтра определяем по выражению:

$$X_{бм} = F_б \times \delta \times \rho_б, \qquad (2.6)$$

где δ *(м/м^3)* - толщина слоя накопленных микроорганизмов в биофильтре; $\rho_б$ (кг/м^3) - плотность микроорганизмов.

Отсюда общая площадь поверхности носителя лопастей $F_б$ *(м^2)*,разработанного нами шарообразного биофильтра определяем следующим образом:

$$F_б = F_л x n_л = \pi d_ш x l_ш x\ n_л, \qquad (2.7)$$

где $F_л$ *(м^2)* – общая площадь поверхности носителя (капроновый шнур) лопастей биофильтра; $n_л$ *(шт)* – количество лопастей биофильтра; $d_ш$ *(м)* - диаметр капронового шнура; $l_ш$ *(м)* - общая длина шнура.

После преобразований выражения (2.2)скорости образования биогаза с накопленной метанобразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре примет вид:

$$V_{СФ.} = B\frac{S}{\tau_ц}\left(1 - \frac{\kappa_S}{\mu\,\tau_ц - 1 + \kappa_S}\right) + [X_{бм} \times K_б \times (\mu / S)] \qquad (2.8)$$

Таким образом, получим математическую модель процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях шарообразного

биофильтра, характеризующуюся скоростью образования биогаза $V_{сф}(м^3/м^3сут)$ в следующем виде:

$$V_{СФ.}=V_C + [X_{бм} \times K_б \times (\mu / S)], \quad (2.9)$$

Разработанная математическая модель процесса накопления метанобразующих микроорганизмов в биофильтре позволяет интенсифицировать процесс анаэробной переработки органических стоков животноводства в биогазовой установке (БГУ). В связи с этим, производительность биогазовой установки находится в функциональной зависимости от структурных элементов биофильтра (диаметра, количества лопастей и площади поверхности носителей), с повышением размеров которых, увеличиваются процесс накопления метаногенной микрофлоры и скорость образования биогаза. Концентрация метанообразующих микроорганизмов и интенсивность образования биогаза резко снижаются при увеличении дозы загрузки навоза в метантенк. Это происходит вследствие удаления из метантенка колоний метанообразующих микроорганизмов с переработанной дозой выгруженного навоза, что, в свою очередь, приводит к сокращению общего объёма газообразования [10].

По разработанной математической модели(2.9)и системного анализа процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях биофильтра разработана структурная модель технологии анаэробной переработки навозных стоков в метантенке, которая состоит из следующих элементов: ЭМС – энерго-микробиологические средства, ТС – технические средства и ЭТС – энерго-технические средства. Разработанная модель позволяет проследить процесс интенсификации анаэробной переработки навозных стоков в биогазовой установке путём накопления метанобразующих микроорганизмов в шарообразном биофильтре, который является конструктивным элементом метантенка, а также управляющее устройство (УУ) энерго-технологическими (ЭТП)и микробиологическими процессами (МБП). Критериями оценки технологического процесса интенсификации анаэробного сбраживания навозных стоков, которые представлены в

структурной модели, являются накопительные свойства и физико-структурные характеристики носителей анаэробного биофильтра. Накопление метанобразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре характеризуется скоростью образования биогаза, в результате которого получим энергетические показатели работы биогазовой установки при переработке навозных стоков (рисунок 2.3).

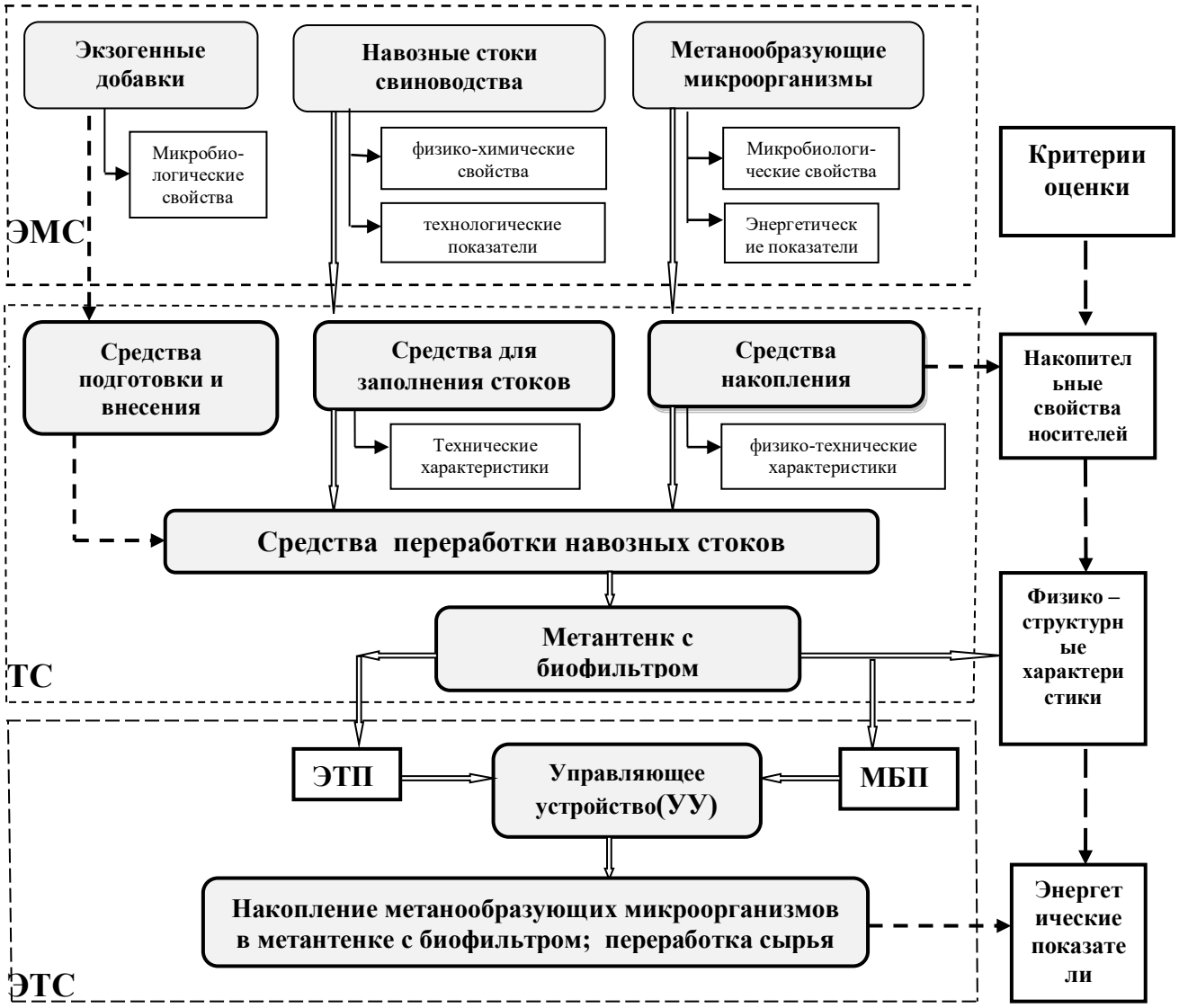


Рисунок 2.3 - Структурная модель технологии анаэробной переработки навозных стоков свиноводства: **ЭБС** – энерго-микробиологические средства: **ТС** - технические средства; **ЭТС** – энерго-технические средства; **ЭТП** – энерго-технологический процесс; **МБП** – микробиологический процесс.

2.2. Анализ основных зависимостей расчета дозы загрузки метантенка

Одной из основных величин, подлежащих определению при проектировании фабрик и цехов по переработке навозных стоков в анаэробных условиях, является доза загрузки метантенка, от которой зависит вместимость камеры сбраживания и продолжительность переработки стоков.

Экспериментальными исследованиями, проведенными специалистами Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства установлено, что от дозы загрузки исходного навоза в метантенк зависят эффективность процесса сбраживания, степень разложения органических веществ, содержащихся в нем, объемы получаемого биологического газа из реактора, а, следовательно, величина капитальных и эксплуатационных затрат. Доза загрузки метантенка выбирается из условия надежной защиты окружающей среды от загрязнения и эффективного производства органических удобрений. Охрана окружающей среды обеспечивается при полном обеззараживании навоза в процессе сбраживания от элементов и болезнетворных микроорганизмов, а качество органических удобрений определяется степенью распада беззольного органического вещества [16,95].

Отсюда следует, что при накоплении метаногенной микрофлоры на носителях биофильтра контролирующим параметром является скорость образования биогаза *($V_{сф}$, $м^3/м^3сут$)* в единицу времени перерабатываемого сырья, который зависит от дозы загрузки метантенка *(D, %):*

$$D = \frac{\rho_б \times V_{Сф}}{L \times \rho_Н \times G_О \times K_б} 100^2, \tag{2.10}$$

где $\rho_б$, $кг/м^3$ – плотность биогаза; L, % – степень разложения органического вещества; $G_о$, $кг/м^3сут$-масса органического вещества в перерабатываемом навозном стоке;$\rho_н$,$кг/м^3$- плотность навозного стока; $K_б$, $м^3/кг$ – коэффициент образования биогаза с единицы активной биомассы биофильтра.

Объем органического вещества в сбраживаемом навозном стоке зависит от его влажности и зольности и определяем по формуле:

$$G_O = G_H \times (100 - W)\,(100 - A_C) \times 100^{-2}, \qquad (2.11)$$

где $G_н$*(кг)*–массасбраживаемого навозного стока в метантенке; *W(%)* – влажность иA_C*(%)* – зольность навозного стока.

Доза загрузки метантенка *D(%)* является фактором, на которой основывается весь ход процесса метанового сбраживания и при этом, данный фактор предопределяет степень биологической конверсии органического вещества. Она указывается по объему и беззольному веществу. Доза загрузки по объему выражается в процентах и показывает, какую часть объема метантенка составляет суточный объем загрузки субстрата. Доза загрузки по беззольному веществу – это масса беззольного вещества субстрата в килограммах, подаваемая на *1,0* $м^3$ объема метантенка в сутки [16,95].

Доза загрузки метантенка по беззольному веществу$D_Б$*(%)*исходного навоза связана с дозой загрузки по объёму сбраживаемого сырья $D_З$*(%)* следующей зависимостью:

$$D_Б = D_З \times (100 - W)\,(100 - A_C)/1000 \qquad (2.12)$$

Эффективность производства биогаза во многом зависит не только от свойств навоза и схем его переработки, но и от технологического процесса, конструктивных параметров биогазовой установки, а также температуры окружающей среды[66,79,83].

Главным показателем технологического процесса образования биогаза является продолжительность сбраживания навоза в метантенке *τ(сут)* и определяют следующим образом:

$$\tau = \frac{V_б \times \rho_H}{V_{сф.} \times G_H}, \qquad (2.13)$$

где $V_б$ *(*$м^3$*)*–объём выделившегося биогаза;.$V_{с.ф.}$*(*$м^3/м^3$*сут)*– скорость образования биогаза с сбраживаемого навозного стока в метантенке с анаэробным биофильтром.

Зная продолжительность сбраживания сырья определяем необходимую вместимость камеры сбраживания метантенка $V_k(м^3)$из следующего выражения:

$$V_k = \frac{G_H \times \tau(1+\beta)}{\rho_H}, \qquad (2.14)$$

гдеβ - коэффициент объемного расширения навоза, д.ед.

2.3. Энергетическая модель биогазовой установки с анаэробным биофильтром

Для оценки энергетической эффективности работы биогазовой установки *(БГУ)* с анаэробным биофильтром *(АБ)* проведен анализ тепловых потоков при сбраживании навозных стоков, который представлен в виде схемы (рисунок 2.4):

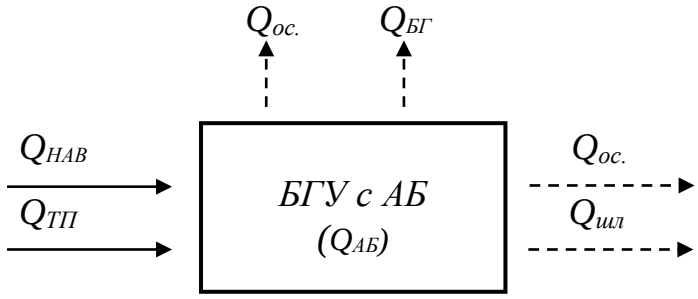


Рисунок 2.4 –Схема тепловых потоков биогазовой установки *(БГУ)* с анаэробным биофильтром *(АБ)*

Входную часть теплового баланса *БГУ* составляют количество энергии, заключенной в исходном навозном стоке $Q_{НАВ}$, энергия технологического процесса метанообразования $Q_{ТП}$ и энергия активной биомассы накопленной в анаэробном биофильтре $Q_{АБ}$, а выходная часть суммируется потерями энергии в окружающую среду через ограждающие поверхности метантенка $Q_{ОС}$, энергиями образующегося биогаза $Q_{БГ}$ и сброженного шлама $Q_{шл}$. Таким образом, уравнение теплового баланса для установившегося температурного режима технологического процесса метаногенерации навоза в БГУ запишется в следующем виде [71]:

$$Q_{НАВ}+Q_{ТП}+Q_{АБ}=Q_{ОС.}+Q_{БГ}+Q_{ШЛ}, \quad (2.15)$$

Количество энергии $Q_{НАВ}$ *(МДж/сут)*, заключенной в исходном навозе, подвергаемому анаэробному сбраживанию зависит от дозы загрузки исходного сырья в метантенк, его теплоемкости, температуры окружающей среды. Исходя из этого $Q_{НАВ}$ определяем по следующей формуле:

$$Q_{НАВ}=G_Н\times C_Н(T_{ИН}-T_{ОС}), \quad (2.16)$$

где $G_Н$*(кг/сут)* - суточная масса навозного стока, подлежащая нагреву; $C_Н$*(МДж./кг·К)* – удельная теплоемкость навозных стоков; $T_{ИН}$ *(К)* - исходная температура нагрева навозного стока и $T_{ОС}$ *(К)* - потери температуры в окружающую среду

Количество энергии $Q_{ТП}$ *(МДж/сут)*, необходимое для технологического процесса сбраживаемого навозного стока в метантенке, т.е. поддержание температурного режима метанообразования находим из выражения:

$$Q_{ТП}=\frac{V_Н\times C_Н\times\rho_Н\times(T_{ТП}-T_{ИН})}{\eta}, \quad (2.17)$$

где$V_Н$*(м^3/сут)* – суточный объем навозного стока подлежащей нагреву; $\rho_Н$*(кг/м^3)* – плотность навозного стока; $T_{ТП}$ *(К)*–температура технологического процесса; $T_{ИН}$ *(К)*- исходная температура навозного стока; η *(%)*- КПД установки для контактного нагрева.

Одной из основных характеристик, определяющая товарность получаемого биогаза является энергосодержание анаэробного биофильтра $Q_{АБ}$ *(МДж/м^3)*, зависящая от количества активной биомассы $X_{бм}$ *(кг/м^3)*, закрепленных на поверхностях носителей биофильтра и их удельной теплоемкости $C_{бм}$*(МДж/(кг•К)*, температур технологического процесса сбраживания $T_{Т.П.}$ и окружающей среды $T_{ОС..}$*(К)*.

Энергосодержание анаэробного биофильтра определяем следующим образом:

$$Q_{А.Б.}=X_{бм}\times C_{б\,м}\times(T_{ТП}-T_{ОС}), \quad (2.18)$$

Потери энергии$Q_{БГ}$ *(МДж/сут),* связанные с выделением биологического газа из метантенка, зависят от суточного объема $V_б$ *(м^3/сут)* выделившегося биогаза и находим по следующей формуле [18,63]:

$$Q_{БГ} = V_б \times C_б \times (T_{ТП} - T_{ОС}), \tag{2.19}$$

где $C_б$*(МДж/(м^3·К)*– теплоемкость биогаза.

Суточные потери энергии $Q_{ШЛ}$ *(МДж/сут),* связанные с количеством выгруженного из метантенка сброженного шлама находим по следующей формуле:

$$Q_{ШЛ} = G_{ШЛ} \times C_{ШЛ}(T_{ТП} - T_{ОС}), \tag{2.20}$$

где $G_{ШЛ}$*(кг/сут)*– масса выгружаемого шлама из метантенка; $C_{ШЛ}$*(МДж/(кг·К)* – удельная теплоемкость шлама.

Для нормального протекания технологического процесса сбраживания органического сырья в большей мере влияют теплопотери $Q_{ОС}$ через непрозрачные ограждающие поверхности метантенка в окружающую среду, которые зависят от ряда факторов. В связи с этим запишем следующую функциональную зависимость:

$$Q_{ОС} = f(F_{м,}\ \delta_{из.}, \lambda_{из.,} T_{ТП,} T_{ОС,} k, \tau), \tag{2.21}$$

где $F_м$ *(м^2)*– поверхность теплообмена метантенка; $\delta_{из}$ *(м)*– толщина теплоизоляционного материала; $\lambda_{из}$*[Вт/(м^2·К)]*– коэффициент теплопроводности теплоизоляции; *k[Вт/(м^2·К)]*–коэффициент теплопередачи, определяющий среднюю скорость передачи тепла вдоль всей поверхности теплообмена; τ*(сут)*– время технологического процесса.

При определении поверхности теплообмена метантенка $F_м$*(м^2)* была принята цилиндрическая емкость с высотой *h(м),* равной диаметру *d(м),* а верх и низ, представляющие собой коническую форму с длиной уклона *L(м).* Отсюда следует, что $F_м$ складывается из боковой поверхности цилиндра $F_Ц$ и двух поверхностей (верх и дно) конуса $2F_К$ (рисунок 2.5).

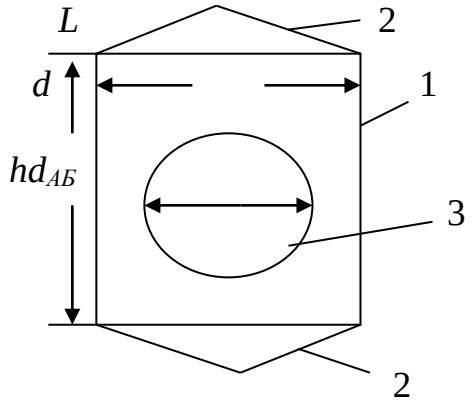


Рисунок 2.5 - Схема размещения поверхностей теплообмена метантенка F_M и анаэробного биофильтра $F_{АБ}$

1 - цилиндр с диаметром d и высотой h; 2 - конус с диаметром d и поверхностью наклона l; 3 – шар (биофильтр) с диаметром $d_{АБ}$.

Общую поверхность теплообмена метантенка F_M находим из следующего выражения:

$$F_M = F_Ц + 2F_к = \pi\, d(h+l) = \pi\, d^2 + \pi\, dl, \quad при\ d = h \qquad (2.22)$$

Во всех случаях поверхность теплообмена выражена через диаметр d, который зависит от объема метантенка $V_м$:

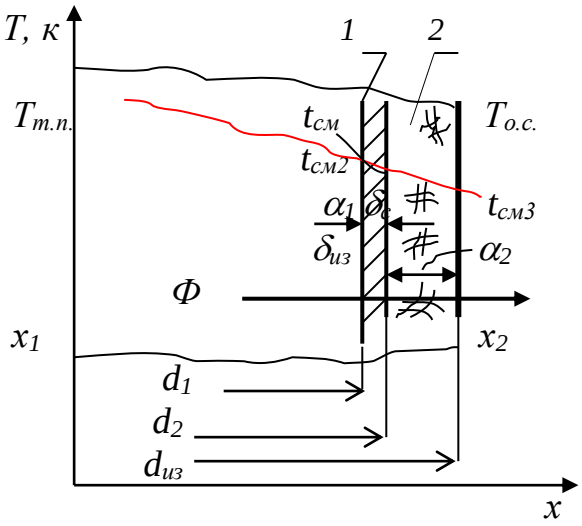
$$d = \sqrt[3]{2{,}4V_M / \pi} \qquad (2.23)$$

На теплообменные поверхности с целью уменьшения тепловых потерь Q_{OC} часто накладывается тепловая изоляция из материалов с низким значением теплопроводности λ (асбест, минеральная вата, пенопласт, войлок и т.д.). Из литературных источников следует, что материал считается теплоизоляционным, если его теплопроводность меньше *0,2…0,25 Вт/(м²·К)*. Наложение теплоизоляции на цилиндрическую поверхность имеет свою особенность, т.е. при увеличении толщины изоляции тепловой поток в одних случаях может уменьшаться, а в других - увеличиваться, т.е. при $d_{из}<d_{кр}$ увеличение толщины изоляции $\delta_{из}$ приводит к увеличению теплопотерь, а при $d_{из}>d_{кр}$ - к их уменьшению. Критический диаметр изоляции находим из следующего выражения [4,108]:

$$d_{кр} = 2\lambda_{из} / \alpha_2, \tag{2.24}$$

где α_2(Вт/м^2·К)– коэффициент теплообмена от стенки теплоизоляции к холодному теплоносителю.

В наших исследованиях приняли метантенк как вертикальный цилиндрический сосуд, состоящий из двух разнородных слоев – на основном стальном корпусе с внешней стороны наложен теплоизоляционный слой (рисунок 2.6).



$T_{т.п.}$ - температура технолог-го процесса, *К;*

$T_{о.с.}$ – температура окружающей среды, *К;*

α_1 – коэффициент теплоотдачи со стороны сбраживаемой среды, *МДж/(м^2·К);*

α_2 – коэффициент теплоотдачи со стороны окружающей среды *МДж/(м^2·К);*

λ_1, λ_2 – коэффициент теплопроводности, *Вт/(м^2·К).*

$\delta_c, \delta_{из}$ – толщина стенки и изоляции, *м*;

Рисунок 2.6 - Схема распределения температуры в цилиндрической оболочке при *Ф=const*: 1 – стенки метантенка, 2 – теплоизоляция.

Тепловые потери метантенка, помимо степени теплоизоляции и теплоотдающей поверхности, в большей мере зависят от температуры, требуемой для нормального протекания процесса. Общая кинетическая зависимость для процессов теплоотдачи, выражающая связь между тепловым потоком в окружающую среду $Q_{ос}$и поверхности теплообмена метантенка F_M, представляет собой основное уравнение теплопередачи [4]:

$$Q_{OC} = k \times F_M \times \Delta T_{cp} \times \tau, \qquad (2.25)$$

где $k[Вт/(м^2 \cdot К)]$ – коэффициент теплопередачи, определяющий среднюю скорость передачи тепла вдоль всей поверхности теплообмена; $F_M(м^2)$– площадь теплоотдающей поверхности метантенка; $\Delta T_{cp}(К)$ – средняя разность температур между сбраживаемым субстратом и стенкой метантенка; $\tau(сут)$- время работы метантенка.

Коэффициент теплопередачи находим из выражения:

$$k = q / \Delta T, \qquad (2.26)$$

где $q(МДж/м^2)$– расчетная величина удельной тепловой нагрузки; $\Delta T(К)$– средняя разность температур между сбраживаемым субстратом и стенкой метантенка.

Полный температурный напор (рис. 2.6) проходящий через двухслойную цилиндрическую стенку вычисляем по следующей формуле:

$$T_{ТП} - T_{OC} = \frac{q_1}{\tau}\left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_2} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3}\right) \qquad (2.27)$$

и значение линейной плотности теплового потока:

$$q_1 = \frac{Q_{OC}}{1} = \frac{\pi(T_{ТП} - T_{OC})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}} \qquad (2.28)$$

Линейный коэффициент теплопередачи для 2^{х} слойной стенки:

$$\kappa_L = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3}} \qquad (2.29)$$

$$q_1 = \frac{Q_{OC}}{1} = \pi(T_{Т.П.} - T_{О.С.}) \cdot \kappa_L, \qquad (2.30)$$

Отсюда

$$Q_{OC} = 1\pi(T_{ТП} - T_{OC}) \cdot \kappa_L \qquad (2.31)$$

Удельную тепловую нагрузку $q_1(МДж/м^2)$ со стороны сбраживаемой среды на внутреннюю стенку метантенка находим из следующего выражения:

$$q_1 = \alpha_1 (T_{ТП} - t_{ст1}), \tag{2.32}$$

где α_1*(МДж/м²·К)*– коэффициент теплоотдачи;$t_{ст1}$*(К)* – температура стенка со стороны среды сбраживания.

По величине термического сопротивления стенки различают температуру стенки с другой ее стороны по формуле:

$$t_{ст_2} = t_{ст_1} - q_1 \delta_{ст} / \lambda_1, \tag{2.33}$$

где $t_{ст_2}$ *(К)*– температуры в месте соприкосновения разнородных цилиндрических слоев;λ*(Вт/(м²·К)*– коэффициент теплопроводности стенки метантенка.

Удельную тепловую нагрузку q_2 *(МДж/м²)* со стороны окружающей среды:

$$q_2 = \alpha_2 (t_{ст_2} - T_{ОС}) \tag{2.34}$$

При достижении равенства $q_1 \approx q_2$с достаточной точностью определяется расчетная величина удельной тепловой нагрузки q.

Температуры стенок $t_{ст._1}, t_{ст._2}$ и $t_{ст.3}$определяем из следующего выражения [60].

$$\left.\begin{aligned} t_{ст._1} &= T_{ТП} - \frac{q_1}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} \\ t_{ст_2} &= T_{ТП} - \frac{q_1}{\pi}\left[\left(\frac{1}{\alpha \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}\right) \right] \\ t_{ст_3} &= T_{ТП} + \frac{q_1}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3} \end{aligned}\right\} \tag{2.35}$$

Коэффициент α_1характеризует интенсивность переноса энергии между поверхностью тела, и определяем по формуле:

$$\alpha_1 = 0{,}075 \left[1 + 10 \left(\frac{\rho_б}{\rho_C - \rho_б}\right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\lambda_{суб}^2}{\nu_{суб} \cdot \delta_{суб} \cdot T_S}\right)^{1/3} \cdot q^{2/3}, \tag{2.36}$$

где ρ_c(кг/м^3;)– плотность субстрата;$\rho_б$ (кг/м^3)– плотность биогаза; $\lambda_{суб}$(Вт/м^2·К)– коэффициент теплопроводности;$\nu_{суб}$(нс/м^2)– кинетическая вязкость; $\delta_{суб}$(н/м^2)– поверхность натяжения; T_S(К) – температура насыщения.

Эффективность получения биогаза возможно лишь в том случае, когда суммарная энергия полученного биогаза значительно будет превышать расходы на его производство, т.е. должно выполняться условие получения товарной энергии Q_{VT} (МДж/м^3), которое в общем виде может быть представлена как:

$$Q_{VT} - \frac{Q_{ТП} - Q_{АБ}}{\lambda} \geq O, \qquad (2.37)$$

где$Q_{ТП}$ (МДж/м^3) – расход энергии на технологический процесс; $Q_{АБ}$(МДж/м^3)– энергосодержание анаэробного биофильтра; λ(МДж/м^3)– теплотворная способность биогаза.

По результатам аналитического расчета и расчетной схемы теплового баланса метантенка с анаэробным биофильтром разработана энергетическая модель биогазовой установки для переработки навозных стоков:

$$\left.\begin{aligned}
&Q_{НАВ} = G_Н \times C_Н \times (T_{ИН} - T_{ОС}) \\
&Q_{ТП} = \frac{V_Н \times C_Н \times \rho_Н \times (T_{ТП} - T_{ИН})}{\eta} \\
&Q_{АБ} = X_{бм} \times C_{бм} \times (T_{ТП} - T_{ОС}) \\
&Q_{ОС} = \frac{k \times F_М \times \lambda_{ИЗ} \times (T_{ТП} - T_{ОС})}{\delta_{из} \times \tau_ц} \\
&Q_{БГ} = V_б \times C_б \times (T_{ТП} - T_{ОС}) \\
&Q_{ШЛ} = G_{ШЛ} \times C_{ШЛ} \times (T_{ТП} - T_{ОС})
\end{aligned}\right\}, \qquad (2.38)$$

где $G_Н$(кг/сут) - суточная масса навозного стока, подлежащая нагреву; $C_Н$ (МДж./кг·К) – удельная теплоемкость навозных стоков; $T_{ТП}$ (К) – температура технологического процесса, $T_{ИН}$ (К) - исходная температура нагрева навозного стока и $T_{ОС}$ (К) - потери температуры в окружающую

среду; $V_H(м^3/сут)$ – суточный объем навозного стока подлежащей нагреву; η *(%)* - КПД установки для контактного нагрева; $X_{бм}$ $(кг/м^3)$ – количество активной биомассы, закреплённой на носителях биофильтра; $F_M(м^2)$ – площадь теплообмена метантенка; $\delta_{из}$ *(м)* – толщина теплоизоляции метантенка; $\lambda_{из}$, $(Вт/м^2 \cdot К)$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляции; k $(Вт/м^2 \cdot К)$ – коэффициент теплопередачи; $V_б$ $(м^3/м^3 сут)$– суточный объём образования биогаза; $C_б$ $(МДж/(м^3 \cdot К)$– теплоемкость биогаза; $G_{ШЛ}$ *(кг/сут)* – масса выгруженного сброженного шлама; $C_{ШЛ}(МДж/кг \cdot К)$ – удельная теплоёмкость шлама.

Выводы:

1. Разработанная математическая модель процесса переработки навозных стоков свиноводства в метантенке с анаэробным биофильтром позволит установить изменение скорости образования биогаза в зависимости от содержания органического сухого вещества $G_{св}(кг)$в перерабатываемом сырье, периодичности *T(сут)* и дозы загрузки*D(%)* метантенка. По полученной математической модели разработана структурная модель совершенствования технологии анаэробной переработки навозных стоков свиноводства, учитывающая энергобиологические (ЭБС), технические (ТС)и энерготехнологические средства (ЭТС).

2. Производительность *БГУ* находится в функциональной зависимости от структурных элементов биофильтра (диаметра, количества лопастей и площади поверхности носителей), с повышением размеров которых, увеличивается процесс накопления метанобразующих микроорганизмов в биофильтре и скорость образования биогаза.

3. Разработанная энергетическая модель биогазовой установки позволит определить энергосодержание анаэробного биофильтра и эффективность производства товарного биогаза на свинофермах, зависящие от количества метанообразующих микроорганизмов $X_{бм}$ $(кг/м^3)$, накопленных на поверхностях носителя лопастей биофильтра и их удельной теплоемкости

$C_{бм}$*(кДж/(кг•К),* температур технологического процесса сбраживания $T_{ТП}$ и окружающей среды $T_{ОС}$ *(К).*

Для подтверждения теоретических предпосылок совершенствования процесса анаэробной переработки навозных стоков свиноводства в работе поставлены следующие *задачи экспериментальных исследований:*

- разработать общую методику и программу экспериментальных исследований;
- создать лабораторную установку и разработать методику исследования процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на твёрдых носителях биофильтра;
- разработать опытно-экспериментальную биогазовую установку *(БГУ)* с анаэробным биофильтром *(АБ)* и методику проведения её производственной проверки.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В МЕТАНТЕНКЕ С АНАЭРОБНЫМ БИОФИЛЬТРОМ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

3.1. Общая методика и программа исследований

Изучение путей и механизмов управления процессов биоконверсии органического сырья в метан является основополагающей информацией при создании современной технологии анаэробной переработки органических отходов сельского хозяйства в топливо и удобрение.

В крупнотоннажном производстве, как правило, для оптимизации процесса или выведения его на максимальные скорости, широкое варьирование параметрами технологического процесса практически невозможно и всякий раз требует лабораторных исследований для выяснения причин снижения активности процесса и разработки рекомендаций по регенерации процесса.

Целью экспериментальных исследований является подтверждение и уточнение разработанных теоретических предпосылок на интенсификацию процесс анаэробной переработки навозных стоков в метантенке при накоплении метанобразующих микроорганизмов на носителях биофильтра.

Первый этап заключался в создании лабораторной установки и изучение на ней особенностей разрабатываемой технологии. Небольшие объемы лабораторной установки от 1,0 до 10 литров позволяют легко варьировать различные параметры процесса и подбирать оптимальные условия для его протекания.

Вторым этапом явилось создание опытно-экспериментальной установки с рабочим объёмом метантенка от 0,1 до 1,0 м^3, на которой отрабатываются технологические режимы процесса, основанные на результатах лабораторных экспериментов, но уже в условиях приближенных к крупнотоннажному производству.

Заключительный этап был основан на математической обработке результатов экспериментальных исследований и разработки рекомендаций для крупнотоннажных метантенков.

Программа предусматривала перечень следующих основных видов мероприятий: планирование эксперимента; техническая экспертиза оборудования; условия проведения эксперимента; оценочные показатели качества выполнения технологического процесса; энергетическая оценка [88].При технической экспертизе конструкции биогазовой установки было выполнено техническое описание и схема технологического процесса сбраживания навоза. При обследовании технического состояния метантенка, кроме выявления соответствия проектной документации действующим нормам и правилам и фактическим размерам смонтированного оборудования, проводили гидравлические испытания на водо– и газонепроницаемость, а также ревизию всех механизмов и запорно-регулирующей арматуры, состояние электропроводок и контрольно-измерительной аппаратуры.

При выявлении соответствия фактически построенным сооружениям, проведено сравнение размеров биогазового оборудования, отметок уклонов днищ метантенка, верхних кромок переливных и перемешивающих устройств, диаметров всех технологических трубопроводов, состояние вентиляционных устройств.

При проведении производственной проверки биогазовой установки соблюдали определенные условия, которые характеризуются следующими показателями: вид и состав исходного органического сырья, вносимого в метантенк; давление, температура, влажность, зольность, объемная масса, фракционный состав частиц, содержание общего и аммиачного азота, фосфора, калия, pH-среды органического сырья в метантенке [78,88].

3.2. Техническое описание лабораторной установки

Для исследовании процесса накопления метанообразующих микроорганизмов в биофильтре, при переработке навозных стоков, в институте микробиологии РАН в лаборатории академика РАН Заварзина Г.А. под руководством к.б.н. Крюкова В.Р. была разработана экспериментальная лабораторная биогазовая установка (рисунки 3.1 и 3.2), которая состоит из следующего основного и вспомогательного оборудования: метантенк (1), газосборник (3), перистальтический насос (4), ультратермостат (2), потенциометр, пробоотборники для газа и жидкости, шланги вакуумные и силиконовые, анаэробный биофильтр (5), термометр (8).

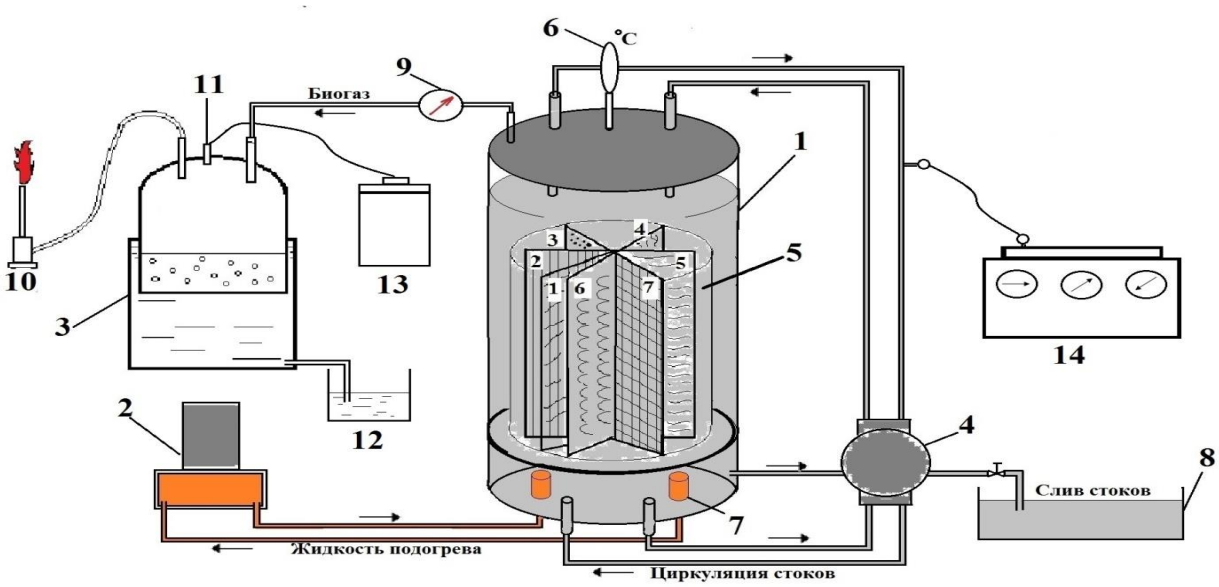


Рисунок 3.1- Технологическая схема лабораторной биогазовой установки 1 –метантенк; 2 – ультратермостат; 3 – газометр; 4 – перистальтический насос; 5 –анаэробный биофильтр; 6 – термометр; 7 – нагревательный элемент (НЭ); 8 – ёмкость для слива отработанного субстрата; 9 – газовый счётчик: 10 – горелка; 11– пробоотборник; 12 – сборник-сосуд; 13 – хроматограф; 14 – потенциометр.

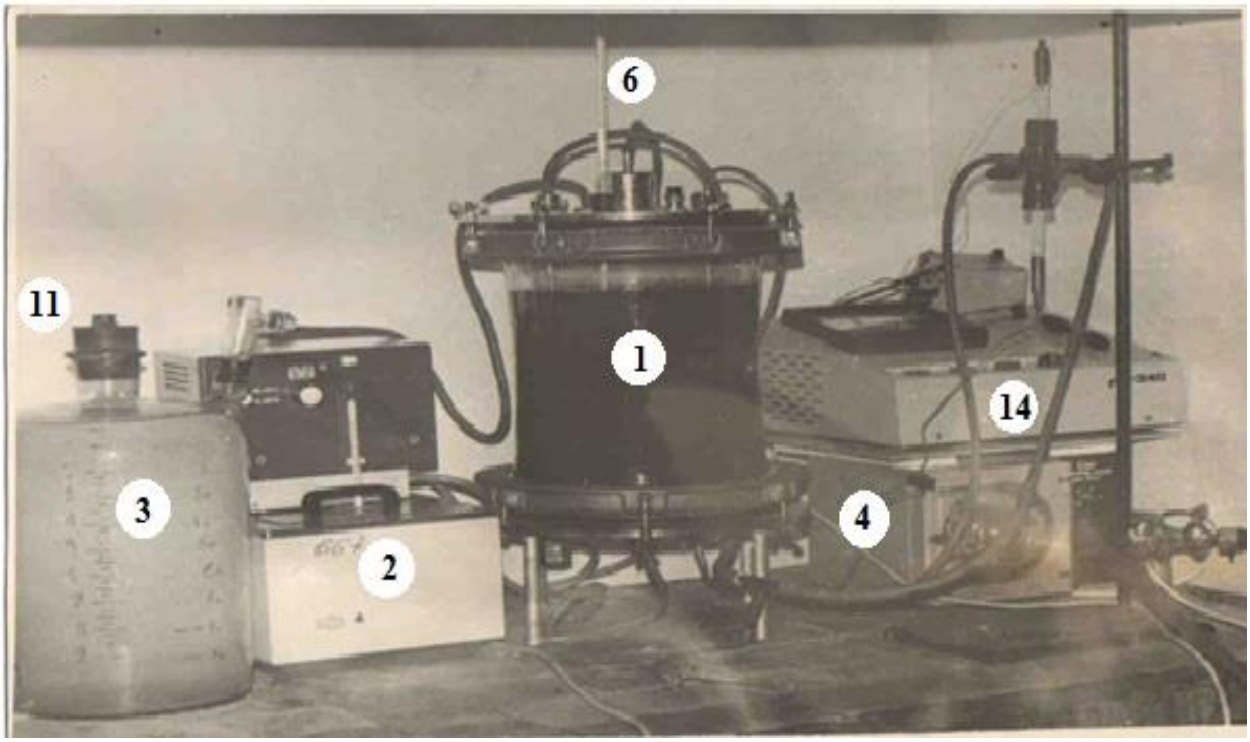


Рисунок 3.2 - Общий вид лабораторной установки

Метантенк (1) представляет собой цилиндрическую вертикального расположения стеклянную емкость со стальным нержавеющим плоским верхом и дном, также представляет собой одновременно и модель метантенка для второй фазы переработки органических отходов. На крышке метантенка установлен термометр (6), трубка для отвода образующегося биогаза и две параллельно расположенные трубки для рециркуляции сбраживаемого сырья. В нижней части в основании метантенка установлены нагревательные элементы (7) для подогрева перерабатываемой биомассы, представляющие собой ячейки с платиновым и хром-серебряным электродами, функционирующие от ультратермостата (2) с глицериновым теплоносителем, а также установлены два параллельно расположенных штуцера с обратными клапанами, предназначенные для рециркуляции, т.е. для перемешивания перерабатываемого сырья с помощью перистальтического насоса (4).

Для сбора и определения количества образующегося газа из метантенка предназначен газометр (3), который представляет собой цилиндрическую

стеклянную ёмкость с герметично закрывающейся горловиной, заполненный насыщенным раствором NaCl объемом 9 литров. Для контроля образующегося биогаза газометр имеет на боковой стороне литражную шкалу с размерностью 0,25… 9,0 л, нанесенную сверху вниз. В верхней части газометра имеется пробоотборник (11), стеклянное устройство с обратным клапаном, служащий для приема и взятия пробы биогаза на содержание метана и углекислого газа, а в нижней части – горловина для отвода жидкости NaCl, вытесняющейся биогазом и накапливающейся в специальном сборнике –сосуде. Для перемешивания перерабатываемой биомассы в метантенке предназначен перистальтический насос, работающий путём объемного вытеснения снизу вверх субстрата по типу “Up-flow” через красные вакуумные резиновые шланги. Производительность насоса, при постановке экспериментальных опытов, была установлена на оптимальный режим перемешивания жидкости равной 150-200 л/сутки. Автоматическая поддержка выбранного температурного режима в метантенке производится ультратермостатом (2), путем подогрева и нагнетания через силиконовые шланги глицерина в теплообменные нагревательные элементы (7), установленные в основании метантенка.

В рабочей камере метантенка установлено экспериментальное накопительное устройство метанообразующих микроорганизмов, представляющий с собой модель анаэробного биофильтра и состоящий из стеклянной рамки в виде параллелепипеда, на которой подвешены исследуемые макроносители: стеклоткань, ткань (пенька армированная полиэтиленом), сетка металлическая, флизелин, леска капроновая, капроновый шнур, сетка полихлорвиниловая.

В таблице 3.1. представлена техническая характеристика лабораторной биогазовой установки.

Таблица 3.1 -Техническая характеристика лабораторной биогазовой установки

№ п/п	Наименование оборудования	Марка, модель, форма	Характеристика оборудования	Назначение оборудований
1	2	3	4	5
1	Метантенк	“Biotec”, Швеция	Стеклянный ферментер объемом 15 л, рабочий объем –10л. Плоский верх и дно	Для переработки органической массы
2	Газометр	Цилиндрический	Стеклянная емкость с рабочим объемом 10л, заполненный насыщенным раствором NaCl	Сбор биогаза
3	Ультратермостат	У – 4, Германия	С глицериновым теплоносителем, электрическим подогревателем и насосом	Создание температурного режима в метантенке
4	Нагревательный элемент	НЭ, стержневой, стальной	Ячейки с платиновым и хлорсеребряным электродами	Контактный нагрев жидкости
5	Насос	Модель-372, “Up-flow”, Польша	Перистальтический с рабочей производительностью 30-500 л/сут	Рециркуляция (перемешивание) перерабатываемой массы
6	Потенциометр	pH-340, Россия	Электрический	Измерение окислительно-восстановительного потенциала субстрата
7	Хроматограф	ЛХМ-80, Россия	Газовый с катарометромгазоносителем аргон и сорбентами молекулярные сита 13-х и селикагель	Для определения метана и углекислого газа в биогазе
8	Хроматограф	Chrom-5, Чехия	Газовый с пламенно-ионизационным детектором и хромосорбом в качестве сорбента. Газ-носитель – аргон	Определение кислотности в субстрате
9	Пробоотборник	Газовый	С резиновой мембраной	Отбор проб биогаза из газометра с помощью мед.шприца (10мл)
10	Пробоотборник	Жидкостный	Резиновый с тройником и зажимом	Отбор проб из реактора
11	Биофильтр	Параллелепипед	Стеклянная рамка для фиксации испытуемых материалов	Накопление метанообразующих микроорганизмов

3.3. Методика определения технологических показателей перерабатываемого навоза в метантенке

При переработке свиного навоза в биогазовой установке были соблюдены определенные условия, которые характеризовались следующими показателями:

- вид и состав исходного навоза, вносимого в метантенк;
- влажность, зольность, кислотность, объемная масса, содержание общего и аммиачного азота, фосфора, калия, отношение C/N подаваемого на переработку навоза;
- давление, температура, относительная влажность и скорость движения окружающего воздуха.

Влажность, зольность и объемную массу исходного навоза определяли в соответствии с ГОСТ 70.2.8.-79 и инструкциями [75,111,121].

Для определения влажности навоза брали навеску (50-100 гр.) с субстратом и взвешивали на аналитических весах модели ВАР-1 3 класса точности с допустимой погрешностью $\pm$10 мг и помещали во взвешенную фарфоровую чашу, предварительно высушенную в сушильном шкафу ШС-40 при температуре 100-150^{0}С. Этот процесс считался законченным, если между первым и последующими взвешиваниями нет разницы в весе или она не превышает 2%. Первое взвешивание проводили через 6-7 часов после высушивания, а повторное - через 1 час. Взвешивание проводили после охлаждения чашек с пробой в эксикаторе.

Далее приступали к теоретическим расчетам. Под влажностью W(%) понимают отношение массы влаги к общей массе материала и определяли по следующей формуле:

$$W = (G_{ВЛ} / G) \cdot 100, \tag{3.1}$$

где $G_{ВЛ}$ *(кг)* – масса влаги в материале; *G(кг)* – масса материала.

$$G = G_{CB} + G_{ВЛ}, \tag{3.2}$$

где G_{CB}*(кг)* – масса органического сухого вещества (ОСВ).

Удельным влагосодержанием U^C *(кг/кг)* материала называют отношение массы влаги $G_{ВЛ}$к массе абсолютного органического сухого вещества G_C:

$$U^C = \frac{G_{ВЛ}}{G - G_{ВЛ}} = \frac{G_{ВЛ}}{G_C} \tag{3.3}$$

Влагосодержание материала W^C, выраженное в процентах, является отношением массы влаги к массе сухого вещества:

$$W^C = \frac{G_{ВЛ}}{G - G_{ВЛ}} \cdot 100 \tag{3.4}$$

при равномерном распределении влаги в материале:

$$W^C = 100 \cdot U^C \tag{3.5}$$

При определении зольности брали навеску сухого субстрата, оставшегося после определения влажности, помещали в предварительно прокаленный и взвешенный фарфоровый тигель и озоляли сначала осторожно на электроплите, чтобы избежать потерь золы при быстром выделении продуктов сгорания и влаги. Ни в коем случае нельзя было допускать появление пламени в тигеле. Когда прекратилось выделение дыма, усиливали прокаливание поместив тигель с образцом в муфельную печь и проводили озолирование при температуре не ниже 400-450^{0}С до постоянного веса.

Содержание золы *A(%)* в сухом субстрате вычисляли по следующей формуле:

$$A = n_1 \cdot 100 / G_C, \tag{3.6}$$

где n_1*(кг)* – масса золы; G_C*(кг)* – масса *СОВ*.

Одной из основных величин оказывающих влияние на объем метантенка, является коэффициент объемного расширения*(β)*сбраживаемого

сырья, который зависит от содержания сухого вещества *(G_C)*в исходном сырье и может быть, определена по следующей эмпирической зависимости:

$$\beta = \sqrt{-1{,}92(G_C)^2 + 72{,}56G_C - 92} \qquad (3.7)$$

Объемная масса навоза зависит от дисперсности во влажности его, т.е. чем больше в сырье частиц более крупного размера, тем меньше его объемная масса. Объясняется это тем, что, несмотря на большую величину сил молекулярного сцепления у крупных частиц, суммарная поверхность в одном и том же объеме у более мелких частиц во много раз превосходит суммарную поверхность крупных частиц и, следовательно, ими значительно больше связывается и удерживается вода [78,104].

Активная реакция среды характеризуется степенью ее кислотности или щелочности и определяется соотношением концентраций водородных и гидроксильных ионов [69,78].

При постановке экспериментальных опытов *pH* определяли электрометрическим методом, который основан на измерении разности потенциалов возникающих на поверхности раздела между стеклянным электродом и раствором (лабораторный *pH-метр* типа *pH-340*).

При определении *pH-среды* из средней пробы сбраживаемого навоза брали навеску объемом*5-10 гр,* доливали соответственно *50-100 мл* 1%-го нормального раствора *HCl* и 1-2 капли толуола, перемешивали в течение *1,0 - 1,5 минут* и оставляли на 10-12 часов. Далее, для определения *pH* в полученный раствор опускали стеклянный электрод *pH-метра*, дополнительно размешивая в течение *1,0-1,5 минут.*

Качество выполнения технологического процесса переработки навозных стоков проводили после того, когда оборудование пройдет обкатку и выполнит не менее *15%* планового объема работ[78].

Показателями качества проведения экспериментальных исследований процесса переработки навозных стоков в метантенке с накопленными сообществами метанобразующих микроорганизмов явились: периодичность

и суточная доза загрузки метантенка; суточный выход и скорость газообразования с единицы сбраживаемого сырья; содержание метана в биогазе; степень разложения органических веществ, содержащихся в перерабатываемом навозе.

Эффективность получения биогаза возможно лишь в том случае, когда суммарная энергия полученного биогаза значительно будет превышать расходы на его производство, т.е. должно выполняться условие получения товарной энергииQ_{VT} *(МДж/м^3)*, которое в общем виде может быть представлена как:

$$Q_{VT} - \frac{Q_{ТП.} - Q_{АБ}}{\lambda} \geq O, \qquad (3.8)$$

где $Q_{ТП}$ *(МДж/м^3)* – расход энергии на технологический процесс; $Q_{АБ}$ *(МДж/м^3)* – энергия, содержащаяся в анаэробном биофильтре; λ *(МДж/ м^3)*– теплотворная способность биогаза.

Энергетическая ценность биогаза зависит от его количества, которая определяется соотношением основных компонентов - метана CH_4 – и углекислого газа CO_2. Остальные компоненты - сероводород, аммиак, кислород составляют незначительную часть биогаза и на теплотехнические свойства его как топлива практические не могут оказать влияние [63].

Теплоту сгорания сухого газообразного топлива можно определить по объемному составу и известной теплоте сгорания компонентов. Низшая теплота сгорания биогаза, с учетом внешнего балласта, определяют по следующему выражению:

$$Q_{бн} = [358{,}6 CH_4 - C_{CO_2}(t_{гор} - t_{нач}) \cdot CO_2] \cdot 100^{-1}, \qquad (3.9)$$

где $Q_{бн}$*(МДж/м^3)*– низшая теплота сгорания биогаза; *358,6* CH_4 *x 100(МДж/м^3)*– низшая теплота сгорания метана; CH_4*(%)*– объемное содержание метана в *1,0м^3*биогаза;C_{CO_2} *(МДж/м^{3}К)*–объемная теплоемкость углекислого газа;$t_{гор.}$*(К)* – теоретическая температура горения биогаза с

заданным содержанием CH_4 *и* CO_2; $t_{нач}(K)$– начальная температура биогаза; $CO_2(\%)$– содержание углекислого газа в *1,0* $м^3$ биогаза.

3.4. Планирование и методика экспериментальных исследований процесса накопления метанообразующих микроорганизмов в биофильтре

Экспериментальные исследования, проводимые на лабораторной установке с целью отработки систем контроля процесса накопления метанообразующих микроорганизмов в анаэробном биофильтре и разработки рекомендаций для промышленных биогазовых установок, представляли собой продолжительную по времени ферментацию с постоянной регистрацией целого ряда важных параметров. Метанообразующие микроорганизмы растут медленно и очень чувствительны к неконтролируемым загрузкам метантенка, изменению pH, температуры, окислительного и восстановительного потенциала, поэтому экспериментальные опыты были продолжительными - 80 и более суток [15,92].

В соответствие с поставленной целью исследования, при планировании эксперимента важно было правильно выбрать параметры, дающие наиболее полную характеристику оптимизации технологического процесса переработки навозных стоков [1,39,42].

Количественная сторона технологического процесса переработки навозных стоков характеризуется скоростью газообразования с единицы перерабатываемого сырья – $У_1$ $(м^3)$, который позволяет оценить интенсивность переработки. Качественная сторона процесса переработки навозных стоков характеризуется содержанием метана в биогазе – $У_2$ *(%)* и степенью разложения органического сухого вещества –$У_3$ *(%)*, содержащихся в сырье.

Накопления метанообразующих микроорганизмов в биофильтре в зависимости от их удельной поверхности материала лопастей – $У_4$ *(мкг белка/см²)* характеризует количественную сторону процесса, а накопление микроорганизмов в зависимости от массы испытуемых носителей – $У_5$ *(мкг белка/гр материала)*характеризует качественную сторону технологического процесса.

Факторы, определяющие процесс газообразования:

X_1 – периодичность загрузки навоза в метантенк, *(Т, сут);*

X_2– доза загрузки навоза в метантенк, *(Д, %);*

X_3–органическое сухое вещество в перерабатываемом навозе, *(G_o, кг/м³сут);*

X_4– температура процесса переработки,*(t, ºК);*

X_5– влажность навоза, *(W,%);*

X_6– кислотность, среды, *(кг/м³).*

При выборе варьируемых факторов первоначально были проведены поисковые эксперименты. По их результатам и ранжированию факторов (таблица 3.2) в лабораторных опытах было решено варьировать первыми тремя факторами *(X_1, X_2,X_3).* Температура процесса переработки*(X_4)*, влажность навоза*(X_5)* и кислотность среды *(X_6)* являются контролируемыми величинами, если не применять специальных технологический воздействий на них.

Таблица 3.2 – Факторы и интервалы их варьирования

№ п/п	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования	Наименование фактора
X_1	4	7,25	10,5	3,25	Фактор 1
X_2	1	4,25	7,5	3,25	Фактор 2
X_3	0,1	0,2625	0,425	0,1625	Фактор 3

Таким образом, при планировании экспериментальных исследований был принят полный факторный эксперимент типа 2^K. Отсюда последовало решение проводить исследования на *2-х* уровнях варьирования (таблица 3.3).

Таблица 3.3 –План эксперимента и выходные параметры опытов

№ опыта	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр		
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	$У_1$	$У_2$	$У_3$
1	-1	-1	-1	4	-1	0,1	0,18	0,15	0,18
2	+1	-1	-1	10,5	-1	0,773	0,763	0,763	0,77
3	-1	+1	-1	4	7,5	0,1	0,5	0,5	0,5
4	-1	-1	+1	4	1	0,425	1,759	1,75	1,79
5	-1	0,19	0,19	4	4,867	0,293	3.3	3,35	3,205
6	0,19	-1	0,19	7,867	1	0,293	2,91	2,91	2,93
7	0,19	0,19	-1	7,867	4,867	0,1	2,95	2,92	2,94
8	-0,29	+1	+1	6,307	7,5	0,425	4,76	4,76	4,78
9	+1	-0,29	+1	10,5	3,307	0,425	4,72	4,77	4,52
10	+1	+1	-0,29	10,5	7,5	0,215	4,79	4,9	4,13

Факторы в матрице представлены как в натуральных физических величинах, так и в кодированных. С алгебраической точки зрения введение кодированных переменных отражает стремление к ортогонализации систем функции. С вычислительной – к упрощению расчетов коэффициентов моделей, с общеметодической – к созданию стандартизированного набора оптимальных планов, независимых от субстанции и структуры исследований [1,94].

Переход от натуральных переменных к кодированным осуществляли двумя операциями – центрированием и масштабированием. Центрирование –

перенос начала координат системы кодированных факторов в центр эксперимента с координатами в натуральных переменных:

$$X_{Oi} = 0,5\ (X_{i\ max}+X_{i\ min}) \qquad (3.10)$$

Масштабирование – изменение центрированных числовых значений факторов в раз:

$$Ц = 1/\Delta X, \qquad (3.11)$$

где ΔX – полудиапазон измененияi-го фактора, вычисляем по следующей формуле:

$$\Delta X = 0,5\ (X_{max} - X_{min}) \qquad (3.12)$$

Кодирование переменных вычисляются по формуле (3.10.), а возврат от них к натуральным значениям осуществляем по выражению (3.11.)

$$X_i = (X_i - X_{Oi}) / \Delta X_i \qquad (3.13)$$

$$X_i = X_i \cdot \Delta X_i + X_{Oi} \qquad (3.14)$$

Кодирование параметров и возврат от них к натуральным величинам осуществляется в той же последовательности.

Перед началом экспериментальных исследований на установке было проведено качественное обследование технического состояния ее основных узлов и деталей. Также обследовали состояние электропроводки и контрольно-измерительной аппаратуры, провели ревизию всех механизмов и запорно-регулирующей системы.

Перед запуском биогазовой установки в работу провели проверку на водопроводной воде режимов загрузки и выгрузки. Затем воду слили и повторно провели обследование всех узлов и деталей, устранили выявленные при проверке на воде дефекты и подготовили установку к работе.

Загрузку метантенка продуктом переработки было проведено до верхнего рабочего уровня, т.е. до исчезновения биофильтра. Для создания анаэробных условий в метантенке при начальной стадии переработки установка обеспечивалась системой газоснабжения, состоящей из баллона со сжатым газом (CO_2, N_2) и газопроводом.

В опытах были использованы термофильные метанообразующие микроорганизмы родов Methanotrix и Methanosarcina, как основные компоненты метаногенной ассоциации, а в качестве основного субстрата – ацетат натрия $NaCH_3COOH$, т.к. из анализа литературных источников следует, что в термофильных условиях метана (CH_3 – групп ацетата) образуется на 5-10% больше, чем в мезофильных (табл. 3.4). Использование ацетата приводит к образованию высокоактивного ила, в котором микроорганизмы могут составлять до 90% осадка [9, 99].

Таблица 3.4 - Состав сбраживаемого субстрата в метантенке

№ п/п	Наименования компонентов	Единицы измерения	Количество
1	Навоз свиной стерилизованный	л	2,0
2	Вода водопроводная	л	7,0
3	Микроэлементы Пфеннига	г	1,5
4	Сульфид натрия ($NaCH_3COOH$)	г	5,0
5	Бикарбонат натрия	г	18,0
6	Ацетат натрия	г	100,0
	Итого	л	10,12

Согласно планирования эксперимента, при постановке опытов доза загрузки метантенка *(концентрация ацетата Na)* составляла *1,0%,* далее к концу экспериментального исследования была увеличена до *7,5%* от общего объема сбраживаемой массы.

При проведении экспериментальных исследований процесса накопления процесса метаногенной микрофлоры в биофильтре оптимальный температурный режим метанообразования соответствовал термофильному режиму процесса анаэробного сбраживания навоза (таблица 3.5). Общая однородность навоза в метантенке поддерживалась путем перемешивания по типу “Up-flow” перистальтическим насосом.

Таблица 3.5 - Основные показатели технологического процесса анаэробной переработки навоза

Наименование	Ед. измерение	Показатели
Продолжительность	*сут*	*90*
Влажность навоза	*%*	*95*
Содержание сухого вещества	*кг.*	*0,250*
Оптимальный температурный режим	*С*	*54*
Окислительно-восстановительный потенциал	*мВ*	*-360*
pH – среда		*7,5*
Доза загрузки субстрата (ацетат Na) в метантенк	*%*	*1,0-7,5*

В процессе ферментации навоза осуществлялся контроль системы по следующим параметрам:

1. Кислотность среды (посуточная динамика). Определялась в отобранной пробе жидкости на патенциометре со стеклянным электродом.

2. Окислительно-восстановительный потенциал (посуточная динамика).

3. Температура (посуточная динамика).

4. Определение сухого вещества минеральных компонентов и влажности гравиометрическим методом.

5. Содержание метана и углекислого газа в выделяющемся биогазе (посуточная динамика). Определение газов на газовом хроматографе ЛХМ-80 (Россия) с катарометром газоносителем аргон и сорбентами молекулярные сита 13-х и селикагель.

6. Содержание ацетата (посуточная динамика). Определение кислот на газовом хроматографе Chrom-5 (Чехия) с пламенно-ионизационным детектором и хромосорбом в качестве сорбента, газ-носитель – аргон.

При постановке экспериментальных опытов были исследованы способность метанообразующих микроорганизмов закрепляться, и

развиваться на поверхностях испытуемых материалов иммобилизационного устройства (См. техническое описание). Размеры испытуемых материалов соответствовали (ширина х длина) 80 х 220 мм.

Результаты экспериментальных исследований процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на макроносителях анаэробного биофильтра определяли по следующей методике:

1. Определение белка (биомассы бактерий) на исследуемых материалах по методу Лоури и по содержанию ДНК, с экстракцией ДНК этиловым спиртом. Оценка корреляции прироста бактериальной биомассы на исследуемых поверхностях со скоростью метаногенеза.

2. Электронная сканирующая микроскопия бактериальных обрастаний на исследуемых материалах в конце ферментации с целью установления доминирующих бактериальных форм в сообществе.

3.5. Методика проведения производственной проверки биогазовой установки (БГУ) с анаэробным биофильтром (АБ)

В последнее время, существующие технологии переработки навозных стоков животноводства в биогазовых установках, отличаются тем, что в рабочей камере метантенка отсутствует применение биофильтра, также следует отметить, что система поддержания температурного режима технологического процесса переработкисырья в метантенке основана на использовании электроэнергии, либо всего образующегося биогаза, которое, в свою очередь, влияет на себестоимость перерабатываемого сырья.

На представленной технологической схеме (рисунок 3.3) исходное сырьё, перед загрузкой в метантенк, в основном не проходит предварительной подготовки, что, в свою очередь, отрицательно влияет на весь технологический процесс анаэробного сбраживания.

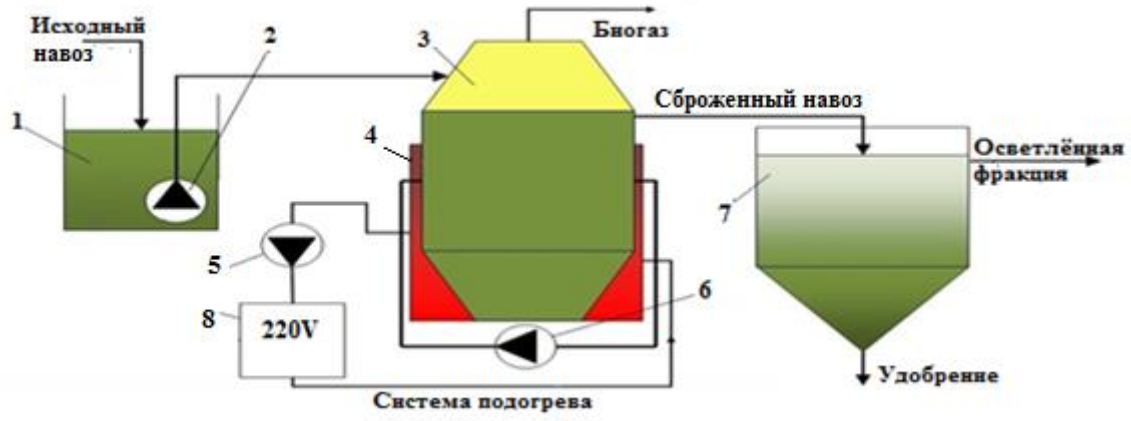


Рисунок 3.3 – Технологическая схема существующей биогазовой установки. 1 – приёмная ёмкость; 2 – насос загрузки; 3 – метантенк; 4 – ёмкость с водой; 5 – насос циркуляции теплоносителя; 6 – насос перемешивания субстрата; 7 – отстойник; 8 – водогрейный котёл.

На основании результатов лабораторных исследований нами была разработана и создана экспериментальная биогазовая установка (БГУ) с анаэробным биофильтром (АБ), технологическая схема которой показана на рисунке 3.4.

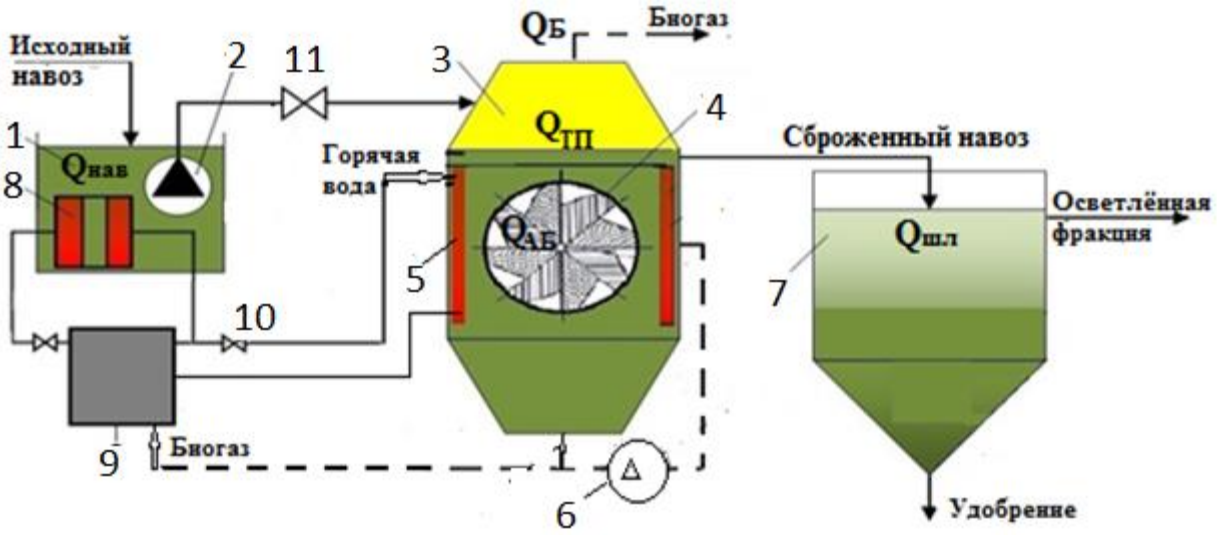
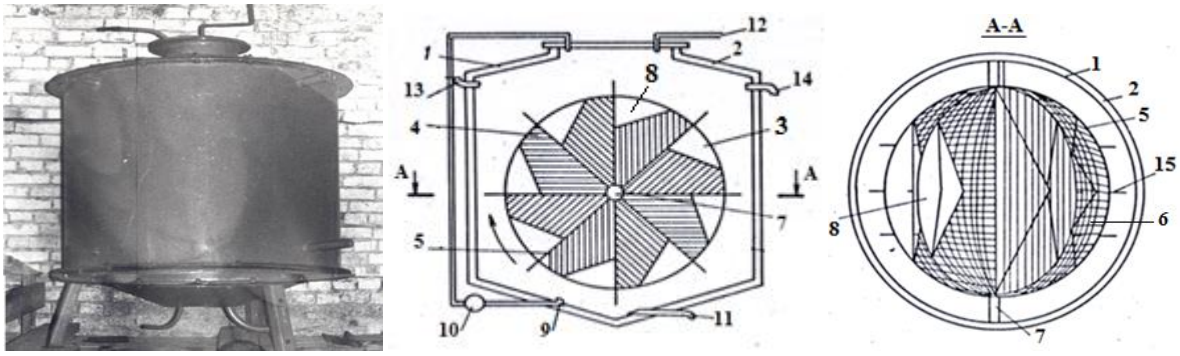


Рисунок 3.4 – Технологическая схема разработаннойбиогазовой установки БГУ с анаэробным биофильтром: 1 – приёмная ёмкость; 2 – насос загрузки; 3 – метантенк; 4 – биофильтр; 5 – тепловая рубашка метантенка; 6 – насос перемешивания перерабатываемого навоза; 7 – отстойник переработанного навоза; 8 – теплообменник; 9 – водогрейный котёл на биогазе; 10 и 11 – краны.

Целью производственной проверки БГУ (Аппарат, см. приложение В) явилось определение эффективности применения анаэробного биофильтра в рабочей камере метантенка (рисунок 3.5). Для достижения поставленной цели решались следующие вопросы: изучение эффективности работы анаэробного биофильтра с накопленными сообществами метанообразующих микроорганизмов при переработке навозных стоков свиноферм, исследование энергетического баланса биогазовой установки с биофильтром и определение образования товарной энергии.

Метантенк представляет собой цилиндрическую ёмкость 1, высота которого равна диаметру, имеет конусное дно. Данная форма обеспечивает накопление активного ила на дне метантенка. Корпус имеет теплоизоляционную прослойку 2.



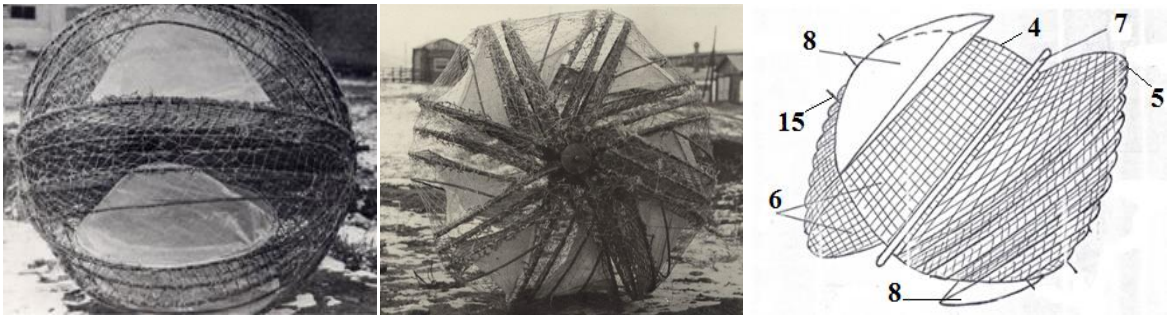
а) б) в)

Рисунок 3.5–Биогазовая установка (БГУ):а – общий вид метантенка; б – технологическая схема, вид с боку; в –вид сверху (сечение А-А).

1 – корпус метантенка; 2 –теплоплоизоляция; 3 – биофильтр; 4 –лопасти; 5 – каркас; 6 –капроновая сетка; 7 –вал биофильтра; 8 –полиэтиленовые ёмкости; 9 –штуцер; 10 –компрессор; 11 – труба для шлама; 12 –трубка отвода биогаза; 13 –труба загрузки навоза; 14 –труба удаления сброженного навоза; 15 –зубья.

Анаэробный биофильтр (рисунок 3.6) представляет собой форму шара жесткой конструкции, структурным элементом которого являются лопасти(4), натянутые капроновой сеткой(6) с ячейкой 50 х 50 мм и

диаметром шнура 5,0 мм. (ГОСТ 25574-83). Биофильтр вращается вокруг своей оси на валу (7) с помощью выталкивающей силы образующегося биогаза, который собирается в ёмкости (8), выполненный из полимерного материала. В днище корпуса метантенка введен штуцер (9) для принудительной подачи газа (биогаза) в рабочую емкость (8) лопастей.



а) б) в)

Рисунок 3.6 – Общий вид анаэробного биофильтра: а) вид спереди; б) вид с боку; в) 1/4 часть биофильтра (4 –лопасти, 5 –каркас, 6 –капроновая сетка, 7 –вал, 8 –полиэтиленовая ёмкость, 15 –зубья).

Принудительная подача биогаза (рисунок 3.5б) осуществляется компрессором (10). В днище корпуса (1) установлен вентиль (11) для слива осадка с активным илом. Труба (12) служит для отвода образующегося биогаза, труба (13) - для подачи исходной массы и ввода активного ила (система рециркуляции), труба (14) – для удаления переработанного навоза, зубья (15) – для разрушения образующейся корки на поверхности перерабатываемого навоза.

В таблице 3.6. представлена техническая характеристика БГУ с анаэробным биофильтром.

Таблица 3.6 - Техническая характеристика БГУ

Наименование	Ед. изм.	Показатели
1	2	3
Метантенк		
Тип		цилиндрический с коническим дном и верхом
Полезная вместимость	$м^3$	1,5
Суточная доза загрузки	%	4,5
Периодичность загрузки	сут	7,0
Температура сбраживания	ºС	54
Поверхность теплоотдачи	$м^2$	5,59
Способ перемешивания перерабатываемого сырья		газовый
Способ подогрева навоза в метантенке		водяной теплообменник
КПД нагревательного устройства		0,75
Габаритные размеры (диаметр х высота)	м	1,2 х 1,2
Биофильтр		
Тип		шарообразный
Материал носителя лопастей биофильтра		капроновый шнур
Площадь поверхности носителя	$м^2$	36,0
Габаритные размеры: диаметр	м	1,0

Перед запуском биогазовой установки на рабочий режим, метантенк продувался углекислым газом для создания анаэробных условий. Образующийся биогаз собирается в мокром газосборнике объемом 1,0$м^3$.

Первоначально, медленное перемещение лопастей (4)анаэробного биофильтра обеспечивается принудительной подачи биогаза компрессором (10) через штуцер (9). Далее по мере адаптации метанообразующих микроорганизмов к перерабатываемому навозу и накопления микроорганизмов на поверхностях лопастей биофильтра осуществляется высокоэффективное сбраживание. Увеличение скорости образования биогаза в метантенке приводит к более интенсивному перемешиванию без принудительной подачи газа из вне. Основным условием эффективности

переработки навозных стоков в метантенке является накопление метанообразующих микроорганизмов на рабочих поверхностях лопастей, от которых зависит энергоемкость биофильтра.

Развитие метанообразующих микроорганизмов в метантенке контролируется по выделению биогаза. После формирования и закрепления ассоциаций метаногенных сообществ на поверхностях лопастей биофильтра в метантенк подается основной сбраживаемый субстрат (навозные стоки).

При проведении производственной проверки биогазовой установки с анаэробным биофильтром доза загрузки*(Д)* метантенка составляла *5,2%* от объема сбраживаемого сырья с периодичностью загрузки *7,0 суток*, влажность *(W) – 95%,* зольность субстрата *(A_c) – 2,26%.*

3.6. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований процесса переработки навозных стоков в биогазовой установке

Обработку экспериментальных данных проводили по методу множественной регрессии в программе STATISTIKA-8. В соответствии с матрицей планирования эксперимента получены значения скорости образования биогаза, метаносодержания в биогазе и степени разложения органического вещества сбраживаемого субстрата, а также энергоемкости анаэробного биофильтра и выхода товарной энергии.

Для движения к точке оптимума составлялась математическая модель:

$$y = b_o + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_{12} + b_{13}x_{13} + b_{23}x_{23} \qquad (3.15)$$

По результатам экспериментальных исследований определяем значения неизвестных коэффициентов математической модели по следующей формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{j=1}^{N} x_{ji} y_i}{N}, \qquad (3.16)$$

где $j = 0,1, \ldots;$ k – номер фактора; N– число опытов.

Полученные значения образования биогаза при сбраживании навозных стоков в биогазовой установке с анаэробным биофильтром заносим в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 - Коэффициенты уравнения математической модели образования биогаза

b0	b1	b2	b3	b11	b12	b13	b22	b23	b33
4,551	0,82	0,881	1,136	-0,685	0,447	0,069	-0,943	0,265	-0,698

При проверке гипотезы коэффициентов или о пригодности полученной модели, использовали один из статистических методов - регрессионный анализ.

Матрица планирования состоит из серии опытов и дисперсии всего эксперимента получается в результате усреднения дисперсий. Находим дисперсию в каждом опыте по следующей формуле:

$$S^2_{\{y\}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_q - \bar{y})^2}{n-1}, \tag{3.17}$$

где $S^2_{\{Y\}}$ – дисперсия; y_q– результат отдельного опыта; $\bar{y}$– среднее арифметическое значение всех опытов; (n-1) – число степеней свободы; n – количество опытов.

Среднее арифметическое значение опытов $\bar{y}$ находим из следующего выражения:

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \ldots y_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_q}{n}. \tag{3.18}$$

Квадратичная ошибка, стандарт или среднее квадратичное отклонение – это корень квадратный и дисперсии, взятый со знаком плюс:

$$S_{(Y)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_q - \bar{y})^2}{n-1}}. \tag{3.19}$$

Стандарт имеет размерность той величины, для которой он вычислен. Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах - 0,02; число степеней свободы – 20; табличное значение критерия Стьюдента - 2,09

Таблица 3.8 - Критерии Стьюдента и значимость коэффициентов модели (1/0 - значимый/незначимый)

Значения	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{22}	b_{23}	b_{33}
t-крит-ий	34,748	14,628	15,717	20,266	6,322	6,689	1,032	8,704	3,965	6,442
Знач-ть	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

Вывод по адекватности математической модели определяли по критерию Фишера. Удобство использования критерий Фишера состоит в том, что проверку гипотезы к сравнению с табличным значением [1,94]:

$$F = \frac{S^2_{ад}}{S^2_{\{y\}}}, \tag{3.20}$$

где $S^2_{ад}$ - дисперсия адекватности или остаточная дисперсия.

В технических задачах, как правило, используется уровень значимости 0,05.

Если рассчитанное значениеF – критерия не превышает табличного, то с соответствующей достоверной вероятностью модель считается адекватной.

Остаточная дисперсия или дисперсия адекватности - это остаточная сумма квадратов ($\sum_{i=1}^{n} \Delta y_i^2$), деленная на число степеней свободы «f» и находим из следующего выражения:

$$S^2_{ад} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta y_i^2}{f} \tag{3.21}$$

$$f = N - (\kappa + 1),$$

где κ - число степеней свободы.

Проверку значимости полученных коэффициентов проводили независимо друг от друга по t-критерию Стьюдента и построением доверительного интервала [1,94].

В нашем случае, при отсутствии параллельных опытов, прежде всего, необходимо было найти дисперсию коэффициента регрессии $S^2_{(bj)}$ по формуле:

$$S^2_{(bj)} = \frac{S^2_{(y)}}{N}, \tag{3.22}$$

Дисперсии всех коэффициентов зависят от ошибки опыта и числа опыта, поэтому, как видно из формулы (3.21), они равны друг другу.

Теперь легко построить доверительный интервал (Δbj):

$$\Delta bj = \pm t\, S_{\{bj\}}, \tag{3.23}$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы, с которыми определялась дисперсия каждого опыта при уровне значимости равной 0,05;

$S_{(bj)}$ - квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

$$S_{(bj)} = +\sqrt{S^2_{\{bj\}}}, \tag{3.24}$$

Формулу для доверительного интервала можно записать в следующей эквивалентной форме:

$$\Delta bj = \pm \frac{tS_{\{y\}}}{\sqrt{N}}, \tag{3.25}$$

Доверительный интервал задается верхней и нижней границами $b_j + \Delta b_j$ и $b_j - \Delta b_j$. Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала.

Значимость коэффициентов по t – критерию Стюдента вычисляем по формуле:

$$t = \frac{|b_j|}{S_{\{bj\}}}, \tag{3.26}$$

Вычислительное значение t-критерия сравнивается стабличным при заданном α и соответствующем числе степеней свободы. Если вычисленное значение больше табличного, то коэффициент считается значимым.

Выводы:

1.Разработанная цилиндрическая форма метантенка и его конусообразное дно обеспечивает накопление активного ила и при сливе переработанного сырья ил остаётся в камере сбраживания ёмкости, что также способствует ускорению технологического процесса газообразования;

2.В соответствии с матрицей планирования эксперимента получены значения скорости образования биогаза, метаносодержания в биогазе и степени разложения органического вещества сбраживаемого субстрата, а также энергоемкости анаэробного биофильтра и выхода товарной энергии;

3.Основным условием эффективности применения анаэробного биофильтра в камере сбраживания метантенка, при постановке задач исследований на опытно-экспериментальной установке, является накопление активной биомассы на рабочих поверхностях лопастей анаэробного биофильтра (АБ), от которых будет зависеть энергоемкость АБ.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА

4.1. Результаты лабораторного исследования процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях анаэробного биофильтра

Совершенствование технологии переработки навозных стоков заключается в применении биофильтра в рабочей камере метантенка. При искусственном накоплении метанообразующих микроорганизмов на носителях лопастей биофильтра интенсифицируется процесс переработки навозных стоков [33,50].

В связи с этим, целью экспериментальных исследований является подтверждение и уточнение разработанных теоретических предпосылок на процесс анаэробной переработки навозных стоков в метантенке при накоплении метанобразующих микроорганизмов на носителях биофильтра. Согласно планирования экспериментальных исследований были изучены: влияния периодичности и дозы загрузки метантенка, содержание органического сухого вещества на выход биогаза с единицы перерабатываемого навоза и на процесс метанообразования; способность метаногенных сообществ закрепляться и развиваться на твердых макроносителях и их активность на скорость образования биогаза; устойчивость системы к нарушениям технологического процесса метанообразования. Температура технологического процесса сбраживаемого субстрата при проведении экспериментальных исследований составляла *54°С* (термофильный режим) при влажности сырья *95,0%.*

Исследования показали, что процесс колонизации макроносителей микроорганизмами происходит сравнительно медленно и обеспечивает накопление бактериальной массы метаногенов и увеличивает скорость образования биогаза с единицы перерабатываемого сырья.

При накоплении метанообразующих микроорганизмов на твердых носителях (стеклоткань, ткань - пенька армированная полиэтиленом, сетка металлическая, флизелин, леска капроновая, шнур капроновый, сетка полихлорвиниловая) наиболее оптимальным была доза загрузки метантенка равной 5,0%. При повышении дозы загрузки метантенка до 7,5% наблюдались уменьшение метаносодержания в биогазе и снижение степени разложения органического вещества перерабатываемого сырья (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Результаты лабораторных опытов накопления метаногенной микрофлоры в метантенке с анаэробным биофильтром

Показатели	Ед. изм.	Номера опытов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Периодичность загрузки (x_1)	Т, сут	2	2	4	4	6	6	8	8	10	10
Доза загрузки (x_2)	Д, %	1,0	1,0	2,5	2,5	4,0	4,0	5,0	5,0	7,5	7,5
Органическое сухое вещество (x_3)	G_c,кг/л сут	0,203	0,213	0,234	0,240	0,238	0,240	0,250	0,310	0,320	0,370
Скорость газообразования (y_1)	$V_{сф}$,л/сут	0,029	0,68	3,47	3,99	4,01	4,15	4,81	4,90	5,22	5,94
Выход биогаза (опытное)	$V_б$, л	0,23	3,82	12,90	14,31	22,76	24,56	29,11	44,15	61,20	78,91
Выход биогаза (расчетное)	$V_б$,л	0,31	2,86	11,30	19,71	21,12	23,71	27,65	42,80	58,93	74,85
Метаносодержание (y_2)	С, %	15,1	29,75	30,12	42,48	50,34	63,43	68,70	64,44	55,10	45,10
Степень разложения (y_3)	L, %	10,29	12,27	16,91	25,98	26,01	35,93	45,8	40,89	28,74	22,10

Начальная концентрация ацетата натрия в метантенке (рисунок 4.1) составляла*1,0% (0,1 кг)* от сбраживаемого субстрата в метантенке. Метаногенное сообщество адаптировалось к созданным условиям с незначительной продукцией биогаза. Процентное содержание метана CH_4 в биогазе постепенно росло. Далее концентрация ацетата была увеличена до*2,5% (0,25 кг)* и после фазы задержки, которая составляла двое суток, начался процесс активного образования метана в биогазе. При дозе загрузки

метантенка *от 2,5% (0,25кг)до 4,0% (0,4кг)*обеспечила содержание метана в биогазе *от 42,5 до 63,4 %,* при менее *2,5%*– не более *30%*, а повышение дозы загрузки до *5,0%*(*0,5 кг концентрация ацетата*) процесс метанообразования также активизировался и составил *от 64,0 до 68,7%,* а общее образование биогаза при периодичности загрузки метантенка *8 суток* составил *44,2 л*. Степень разложения органического сырья *41,0%.*

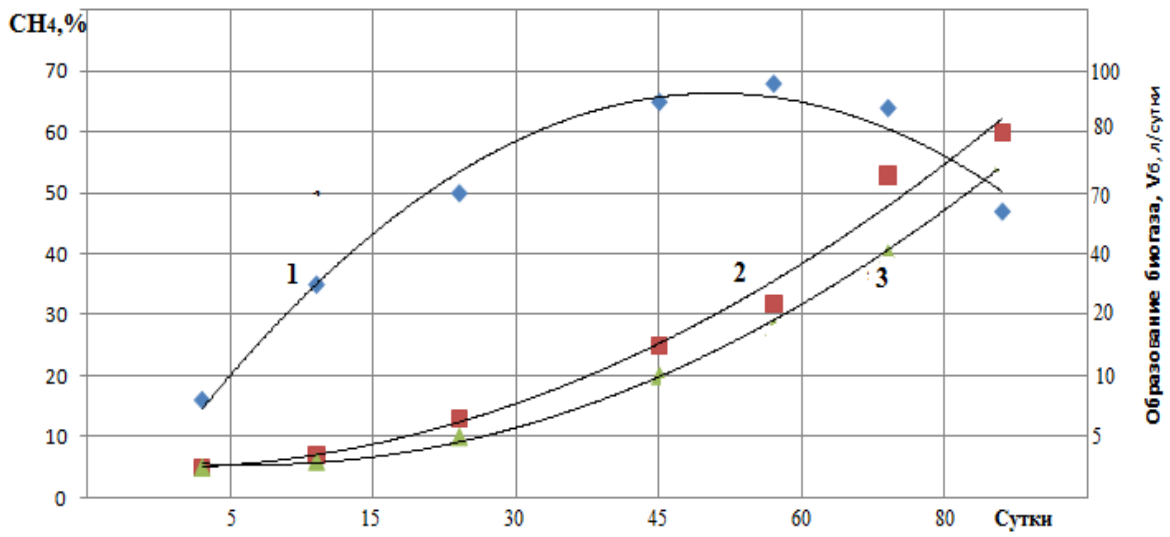


Рисунок 4.1–Графики образования биогаза(2- экспериментальное, 3 - теоретическое) и метаносодержания в биогазе (1) в зависимости от времени технологического процесса сбраживания органического сырья.

При увеличении дозы загрузки метантенка *до 7,5% (0,75 кг),* результаты показали, что суточное образование биогаза проходила без изменений, однако, качество его значительно снизилось, т.е. содержание метана CH_4 в биогазе к концу экспериментальных опытов соответствовала не более *45,1%* и также снизилась степень разложения органического сырья в метантенке до *22,1%.*

В опытах с ацетатом в качестве субстрата метаногенеза отмечено физиологическое подщелачивание среды. Увеличение величины *pH* до 8,0 ингибировала процесс метанообразования. Поддержание оптимального значения величины *pH* обеспечивали подтитровкой среды

концентрированной *HCl*. Процесс метаногенеза при доведении *pH* до оптимальной величины восстанавливался полностью практически без фазы задержки.

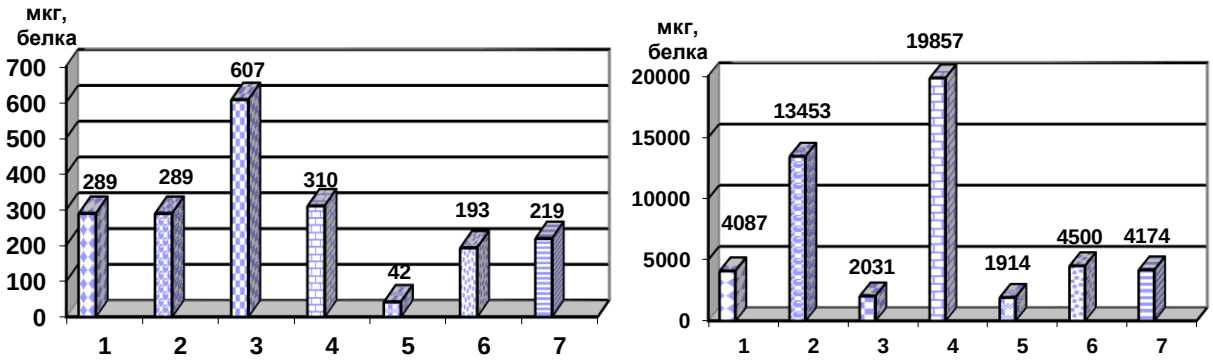
Процесс образования метана протекал нормально при окислительно-восстановительном потенциале ниже – *360 мВ*. Повышение окислительно-восстановительного потенциала вызывалось проникновением следов воздуха в ферментер. При потенциале выше – *250 мВ* метаногенез прекращается. Создание микроаэрофильных условий полностью ингибировало процесс газообразования. В ферментере возникло небольшое отрицательное давление за счет потребления следов кислорода.

Таким образом, повышение окислительно-восстановительного потенциала среды приводит к окислительным процессам, и как следствие этого, образованию отрицательных давлений внутри системы. При снижении потенциала за счет проникновения воздуха атмосферы на поверхности жидкой фазы формируется белая пленка. Это элементарная сера – продукт окисления сероводорода. Появления подобных пленок в процессе ферментации может служить показателем плохой герметичности реакторов. Выход системы на нормальный режим из подобной «стрессовой» ситуации требует продолжительного времени.

Разовое внесение жидкого свиного навоза в начале опыта обеспечила фоновую концентрацию пропионовой кислоты порядка *0,2-0,3 г/л,* содержание которой к концу опыта снизилось незначительно до *0,2г/л*, фоновая концентрация масляной кислоты за счет внесения навозного стока, составила в начале *0,2 г/л,* далее в результате деструкции навоза, она возросла до *0,9 г/л* и постепенно снизилась до *0,1г/л* по завершению первого этапа экспериментального исследования.

В начале опыта микроорганизмы на исследуемых материалах не накапливались. После $3^{х}$ месячной переработки навозных стоков метанообразующие микроорганизмы покрыли все исследуемые материалы (см. приложение А). Из диаграммы (рисунок4.3) видно, что максимальное

количество метанообразующих микроорганизмов накоплено на поверхности металлической сетки, примерно в два раза меньше на поверхности стеклоткани, и в три раза меньше на полихлорвиниле и капроновом шнуре. Преимущества поверхности металлической сетки из железа для адсорбции микроорганизмов связаны с крайне выраженной шероховатостью поверхности и ее гидрофильными свойствами (гидроокись железа на поверхности)_ по сравнению с сравнительно гладкими поверхностями органических материалов.



а) б)

Рисунок 4.3 - Диаграмма общего количества метанообразующих микроорганизмов (мкг), удерживаемой на поверхностях носителей *[1 - стекловолокно армированное (ткань); 2 – ткань (пенька армированная полиэтиленом); 3 – сетка металлическая; 4 – флизелин; 5 – леска капроновая; 6 – шнур капроновый; 7 – полихлорвиниловая сетка] в зависимости: а) площади 1 см^2 и б) массы 1 г/материала.*

Если рассматривать диаграмму, характеризующую количество метанообразующих микроорганизмов на единицу массы испытуемого материала, то наиболее благоприятным для накопления бактериальных клеток является флизелин и комбинированная ткань. Примерно в*4,0 раза* меньше белка содержалось на стеклоткани, капроновом шнуре и полихлорвиниловой сетке. В данном случае мы видим преимущества полимерных материалов, которые на единицу массы материала способны

поддерживать значительно больше бактериальных клеток, чем на металлической поверхности. Однако, для создания конструктивных элементов анаэробного биофильтра стекловолокно армированное, ткань (пенька армированная полиэтиленом), флизелин и полихлорвиниловая сетка по своим физико-структурным характеристикам в агрессивной навозной среде являются непригодными, в сравнении с капроновыми носителями: леска и капроновый шнур (см. приложение А).

На микрофотографиях (см. приложение Б) видны как отдельные бактериальные обрастания клетки на поверхности материалов, так и микроколонии, плотно покрывающие поверхности носителей анаэробного биофильтра. Однако изображения на фотографиях не представляют истинной картины обрастаний, поскольку при фиксации препаратов и обезвоживании этиловым спиртом значительная часть клеток могла десорбироваться. На фотографиях представлены лишь наиболее прочно прикрепленные клетки и колонии клеток. Следует отметить, что для получения более толстого слоя бактериальной пленки на поверхности материалов требуется значительно больше времени, чем мы имели в опытах.

4.2. Математическое моделирование процесса переработки навозных стоков в метантенке с биофильтром

В соответствии с матрицей планирования экспериментальных исследований и на основании результатов лабораторных опытов были получены математические модели скорости газообразования, содержания метана в биогазе, степени разложения органического вещества сбраживаемого субстрата и накопления активной биомассы на носителях биофильтра в зависимости от X_1 – периодичности загрузки сырья в метантенк, X_2- дозы загрузки и X_3– содержания органического сухого вещества в сбраживаемом субстрате.

Математическая модель образования биогаза с единицы сбраживаемого субстрата:

$$У_1= 4,5+0,8x_1+0,9x_2 +1,2x_3-0,7x_1^2-0,9x_2^2-0,7x_3^2+0,5\ x_1x_2++0,1x_1x_3+0,3x_2x_3 \quad (4.1)$$

Расчетные значение F – критерия Фишера составляет 4,25; F – статистика имеет распределение с одной степенью свободы; табличные значение F– статистики равно 4,35; дисперсия адекватности математической модели – 0,08.

Проверка значимости отдельных коэффициентов уравнения регрессии проведена по критерию Стьюдента (t-критерию), который составляет 2,09; дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах - 0,02; число степеней свободы – 20.

Математическая модель метаносодержания в биогазе:

$$У_2=66,5+1,9x_1 +1,9x_2+1,9x_3– 17,4x_1^2– 17,1x_2^2– 17,1x_3^2– 0,1x_1x_2– 0,01x_1x_3 +0x_2x_3 \quad (4.2)$$

Расчетные значение F – критерия Фишера составляет 2,18; F – статистика имеет распределение с тремя степенью свободы; табличные значение F – статистики равно 3,1; дисперсия адекватности математической модели – 0,06.

Проверка значимости отдельных коэффициентов уравнения регрессии проведена по критерию Стьюдента (t-критерию), который составляет 2,09; дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах - 0,028; число степеней свободы – 20.

Математическая модель степени разложения органического вещества сбраживаемого субстрата:

$$У_3 = 43,7+3,4x_1+4,7x_2+3,2x_3– 10,2x_1^2–12,1x_2^2– 10,9x_3^2+2,5x_1x_2+ 0,7x_1x_3+2,2x_2x_3 \quad (4.3)$$

Расчетные значение F – критерия Фишера составляет 4,3; F – статистика имеет распределение с одной степенью свободы; табличные значение F – статистики равно 4,35; дисперсия адекватности математической модели – 8,58.

Проверка значимости отдельных коэффициентов уравнения регрессии проведена по критерию Стьюдента (t-критерию), который составляет 2,1; дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах – 2,0; число степеней свободы – 20.

Математическая модель количества накопления активной биомассы на носителях анаэробного биофильтра:

$$У_4 = 2076,5 + 52,9x_1 + 254,6x_2 - 1288,2x_3 - 1805,8x_1^2 - 1629,5\,x_2^2 + 1500,3 -$$

$$-244,9\,x_1x_2 - 463,5x_1x_3 - 800,7x_2x_3 \qquad (4.4)$$

Расчетные значение F – критерия Фишера составляет 3,59; F – статистика имеет распределение с одной степенью свободы; табличные значение F – статистики равно 4,35; дисперсия адекватности математической модели – 63861,1;

Проверка значимости отдельных коэффициентов уравнения регрессии проведена по критерию Стьюдента (t-критерию), который составляет 2,1; дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах – 17765,6; число степеней свободы – 20.

Вывод по адекватности математической модели: по критерию Фишера все математической модели (выражения 4.1 – 4.4) являются адекватными ипримeнимы для решения производственных задач.

Определение ошибки опытов проведено по критерию Стьюдента (t - критерию).Все расчетные t–критерии оказались меньше табличного критерия. Отсюда следует, что все лабораторные опыты проведены корректно.

Все аналитические уравнения (4.1, 4.2, 4.3, 4.4) представлены четырьмя членами. Из проведенного статистического анализа модели (4.1) следует, что фактор X_3– содержание органического сухого вещества в сбраживаемом навозном стоке оказывает существенное влияние на скорость образования

биогаза, т.к. факторы X_1(диаметр биофильтра) и X_2(площадь поверхности носителей биофильтра) оказались минимальными.

Анализ математической модели (выраж. 4.4) свидетельствует о том, что фактор X_2 – площадь поверхности носителей биофильтра оказывает существенное влияние на накопление активной биомассы в метантенке и также фактор X_1– диаметр биофильтра, а фактор X_3– количество лопастей биофильтра неоднозначно влияет на технологический процесс накопления биомассы.

Во всех моделях (выражения 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4) коэффициенты регрессий по абсолютной величине оказались меньше значения свободного члена (B_o),т.е. математические модели позволили выявить значимые факторы и исследовать их влияние и взаимодействие на поведение процесса анаэробного сбраживания навозных стоков в метантенке с анаэробным биофильтром.

4.3. Канонический анализ математических моделей по результатам лабораторных исследований

На основании планирования экспериментальных исследований проводим канонический анализ математических моделей, полученных от комбинаций взаимодействия факторов периодичности загрузки метантенкаX_1*(Т, сут)* исходным сырьём переработки, дозы загрузки метантенка X_2*(Д,%)* и содержания органического сухого вещества в перерабатываемом навозе X_3 *(G_o,кг/л)*на скорость образования биогаз$У_1$*($V_{сф}$,л/л сут)* в метантенке с биофильтром, содержания метана в биогазе$У_2$ *(С, %)*и степени разложения органического сухого вещества$У_3$*(L,%)*при переработке навозных стоков. Отсюда следует, что при априорном ранжировании, были выбраны следующие наиболее значимые факторы:

$$V_{сф},\ C,\ L = f\,(T,\ Д,\ G_o) \qquad (4.5)$$

где *Т (сут)*– периодичность загрузки навоза в метантенк *(X_1);Д (%)*– доза загрузки навоза в метантенк, *(X_2); G_o(кг/л)*–органическое сухое вещество в перерабатываемом навозе, *(X_3).*

Во-первых, рассмотрим влияние факторов X_2 и X_3на показатель скорости образования биогаза при стабилизацииX_1 на нулевом уровне. Тогда, подставив$X_1=0$ в уравнение регрессии второго порядка, получим:

$$У_1 = 4,5 + 0,8x_2 + 1,14x_3 - 0,9x_2^2 - 0,7x_3^2 + 0,3x_2 x_3 \qquad (4.6)$$

Результаты скорости образования биогаза в метантенке с биофильтром показали, что оптимальным (рисунок 4.2)является $V_{сф}$= *3,5 л/л сут* ($У_{1opt}$) при значениях факторов дозы загрузки навоза в метантенк *Д= 6,2 %* (X_2=*0,59*)и содержания органического сухого вещества в перерабатываемом навозеG_o=*0,41кг/л* (X_3=*0,93).*

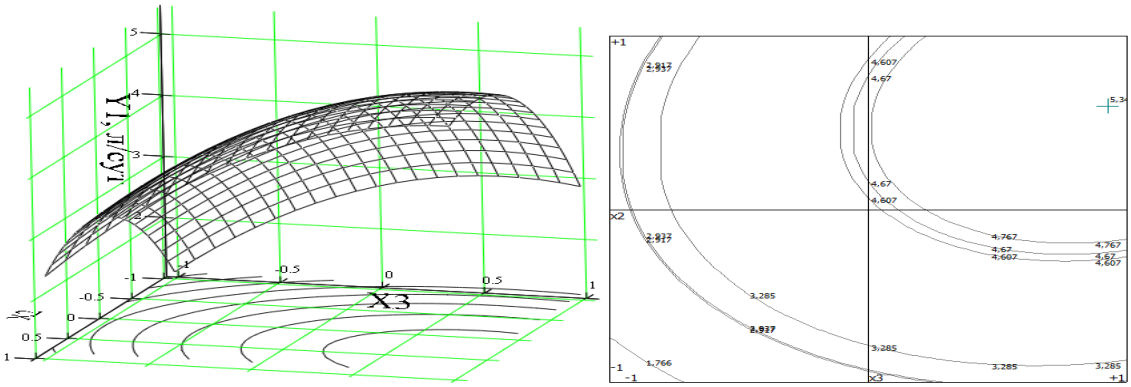


Рисунок 4.2 –Поверхность отклика, характеризующая скорость образования биогаза$V_{сф}$($У_1$),в зависимости *Д* (X_2) *и* $G_{св}$ (X_3).

Во-вторых, в качестве постоянного фактора был принят X_2= *0*– доза загрузки метантенка исходным сырьём (рисунок 4.3). Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора следующее:

$$У_1 = 4,5 + 0,8x_1 + 1,2x_3 + 0,7x_1^2 + 0,7x_3^2 + 0,07x_1 x_3 \qquad (4.7)$$

На рисунке 4.3 представлена поверхность отклика, характеризующая скорость образования биогаза $V_{сф}$($У_1$), в зависимости от периодичности

загрузки исходного сырья в метантенк $T(X_1)$ и содержания органического сухого вещества в перерабатываемом навозе $G_o(X_3)$. Оптимальным значением является $V_{сф}$= *6,3 л/л сут* ($У_{1opt}$) в пределах варьирования факторов *T=9,0 сут* (X_1=*0,64*) *и* G_o =*0,4 кг/л* (X_3=*0,85*).

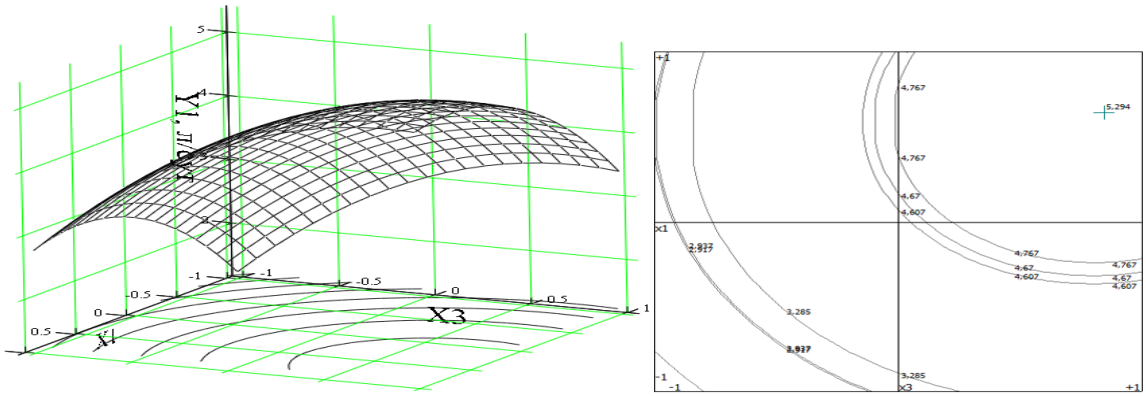


Рисунок 4.3 –Поверхность отклика, характеризующая$V_{сф}$ ($У_1$)в зависимости от $T(X_1)$ *и* $G_{св}$ (X_3).

В-третьих, рассмотрим влияние факторов X_1*и* X_2при X_3 = *0*, после чего получим:

$$У_1 = 4{,}5 + 0{,}82x_1 + 0{,}88x_2 - 0{,}7x_1^2 - 0{,}94x_2^2 + 0{,}45x_1 x_2 \quad (4.8)$$

Поверхность отклика, характеризующая скорость образования биогаза $V_{сф}(У_1)$,в зависимости от периодичности загрузки исходного сырья в метантенк $T(X_1)$ и дозы загрузки $Д(X_2)$представлена на рисунке 4.4.

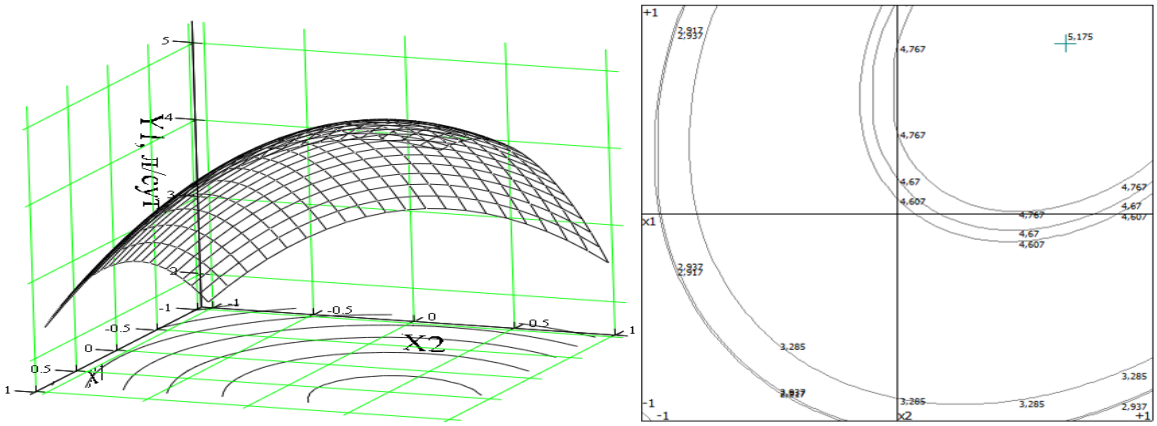


Рисунок 4.4 –Поверхность отклика, характеризующая $V_{сф}$ ($У_1$)в зависимости от $T(X_1,)$ *и* $Д(X_2,)$.

Анализ поверхности отклика показал оптимальное значение скорости образования биогаза $V_{сфopt}$=5,2л/л сут($У_{1opt}$)в пределах варьирования переменных факторов периодичности загрузки исходного сырья в метантенк *Т=10сут*(X_1= 0,82)и дозы загрузки *Д= 6,4%*(X_2=0,66).

Результаты априорного ранжирования содержания метана в биогазе *С,%*($У_2$)в пределах варьирования переменных факторов показаны на рисунках 4.5, 4.6 и 4.7.

В начале, в качестве постоянного фактора был принят X_1=0.Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора примет вид:

$$У_2 = 66,5 + 1,96x_2 + 1,96x_3 - 17,1x_2^2 - 17,1x_3^2 + 0,001x_2 x_3 \qquad (4.9)$$

Экстремуму функции отклика содержания метана в биогазе (рисунок 4.5) C_{opt}= 66,6% ($У_2$)соответствует значениям переменных факторов дозы загрузки исходного сырья в метантенк *Д=4,3%* (X_2=0,06)и содержания органического сухого вещества в перерабатываемом навозеG_o =0,26 кг/л (X_3=0,06).

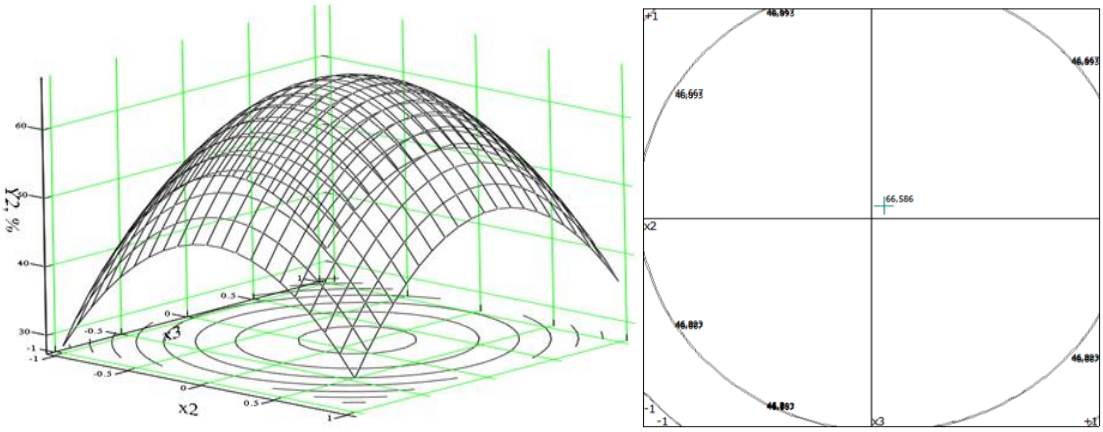


Рисунок 4.5 - Поверхность отклика метаносодержания в биогазе *С*($У_2$,%)в пределах варьирования переменных факторов *Д*(X_2) *и* $G_{св}$(X_3).

Далее, в качестве постоянного фактора был принят$X_2=0$, а преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора получили следующее:

$$У_2 = 66,5 +1,96x_1 +1,96x_3 -17,4x_1^2 -17,1x_3^2 -0,009x_1\ x3 \qquad (4.10)$$

Экстремуму функции отклика содержания метана в биогазе $C_{opt}= 67,6\%$ $(У_{2opt})$соответствуют значения факторов периодичности загрузки исходного сырья в метантенк $T=7,0$ суток$(X_1=0,06)$и содержания органического сухого вещества в перерабатываемом навозе $G_o=0,26$ *кг/л* $(X_3=0,06)$.

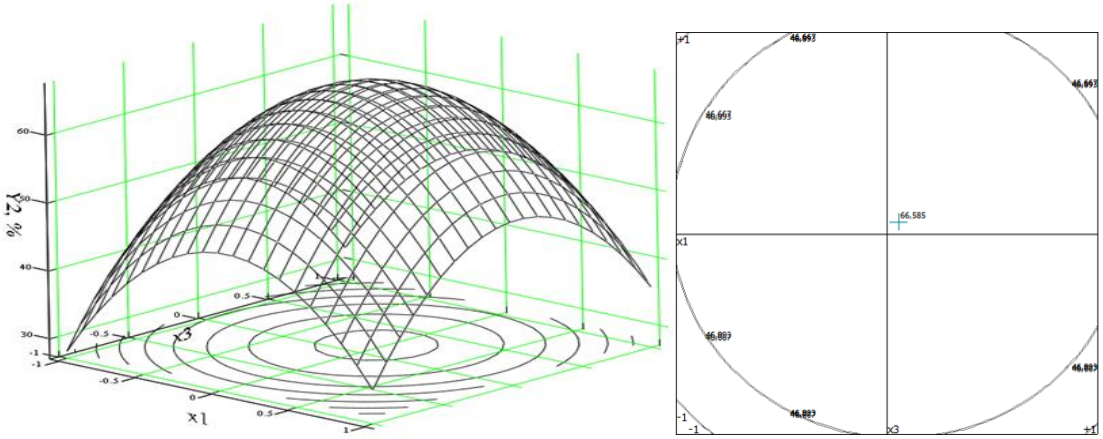


Рисунок 4.6 - Поверхность отклика, характеризующая метаносодержания в биогазе $C(У_2, \%)$в пределах варьирования переменных факторов Т$(X_1,)$и $G_{св}(X_3)$.

В итоге, в качестве постоянного фактора принят$X_3=0$. Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора примет вид:

$$У_2 =66,5+1,96x_1+1,96x_2– 17,4x_1^2– 17,1x_2– 0,025x_1\ x_2 \qquad (4.11)$$

Экстремуму функции отклика содержания метана в биогазе (рисунок 4.7) $C_{opt}= 68,6\%$ $(У_{2opt})$соответствуют значения факторов периодичности загрузки исходного сырья в метантенк $T=7,0$ *суток* $(X_1=0,06)$и дозы загрузки исходного навоза в метантенк $Д=4,3\%$ $(X_2=0,06)$.

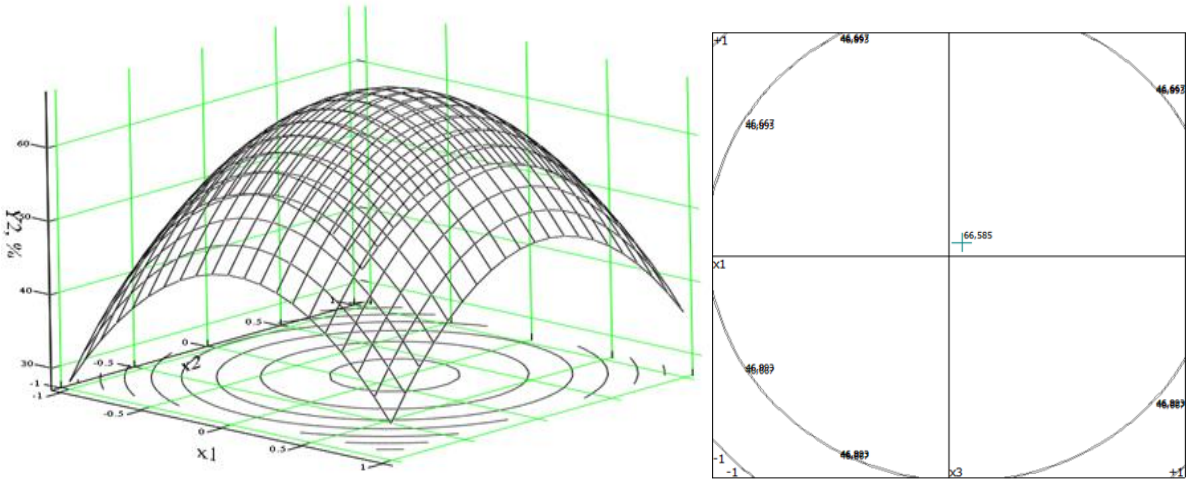


Рисунок 4.7 –Поверхность отклика метаносодержания в биогазе *С (У₂,%)*в пределах варьирования переменных факторов *Т(Х₁,)и Д(Х₂).*

Результаты априорного ранжирования степени разложения органического сухого вещества *У₃ (L, %)*содержащихся в перерабатываемом навозе в пределах варьирования переменных факторов периодичности *(Т,сут),*дозы загрузки метантенка *(Д,%)*и содержания органического сухого вещества *(G_o, кг/л)*в перерабатываемом навозном стоке показаны на рисунках 4.8, 4.9 и 4.10.

Во-первых, в качестве постоянного фактора был принят периодичность загрузки метантенка исходным сырьём: $X_1=0$. Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$У_3= 43,6 +4,7x_2+3,2x_3-12,1x_2^2-10,9x_3^2 +2,2\, x_2\, x_3 \qquad (4.12)$$

Оптимальное значение степени разложения органического сырья составляет (рисунок 4.8) $L_{opt}=46,4\%$ ($У_{3\ opt}$), в зависимости от дозы загрузки $Д=5,0\%$ ($X_2=0,21$) и содержания органического сухого вещества в перерабатываемом навозе $G_o=0,29$кг/л($X_3=0,16$).

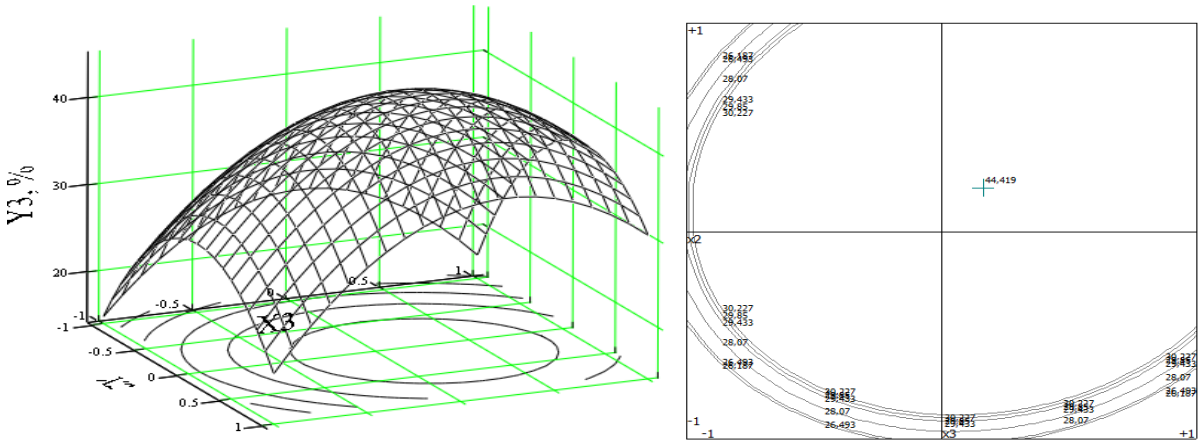


Рисунок 4.8 - Поверхность отклика, характеризующая степень разложения органического сухого вещества*L(У₃)*в зависимости от факторов *Д (X_2 %) и G_o (X_3,кг/л).*

Во-вторых, в качестве постоянного фактора принят$X_2=0$. Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора следующее:

$$У_3=43,6+3,4x_1+3,2x_3-10,2x_1^2-10,9x_3^2+0,72x_1\,x_3 \qquad (4.13)$$

Значение экстремума (рисунок 4.9) составляет L_{opt}= *44,2%* ($У_{3\ opt}$) припериодичности загрузки метантенка *T= 8суток* (X_1=0,17) и содержания органического сухого вещества в перерабатываемом навозе G_o=*0,28 кг/л* (X_3=0,15).

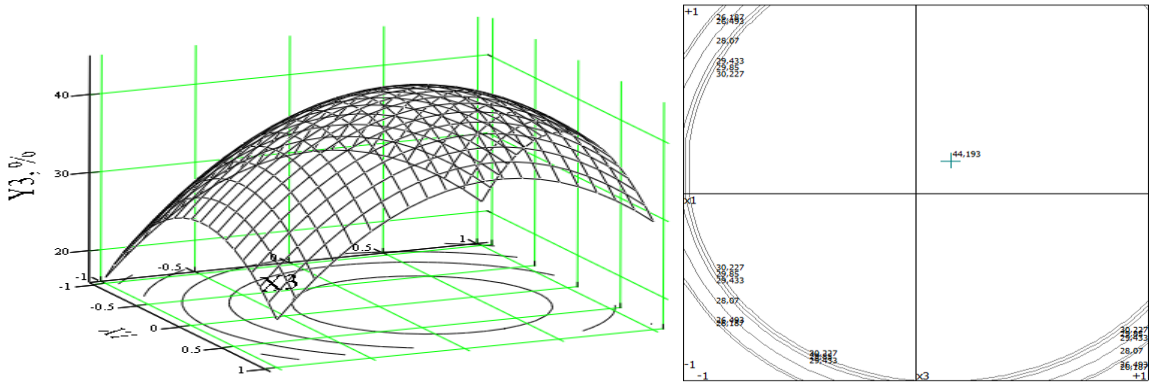


Рисунок 4.9 -Поверхность отклика, характеризующая степень разложения органического сухого вещества*L(У₃)* в зависимости от факторов *T,сут(X_1) и G_o,кг/л(X_3).*

В-третьих, качестве постоянного фактора принят: $X_3=0$. Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$У_3=43,6+3,39x_1+4,7x_2-10,2x_1^2-12,06x_2^2+2,475x_1x_2 \quad (4.14)$$

Оптимальное значение степени разложения органического сухого вещества (рисунок 4.10) составляет $L_{opt}=45,5\%(У_{3opt})$. Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов периодичности загрузки метантенка $T=8$ *суток* $(X_1=0,19)$ и дозы загрузки метантенка $Д = 5,0\%$ $(X_2=0,22)$.

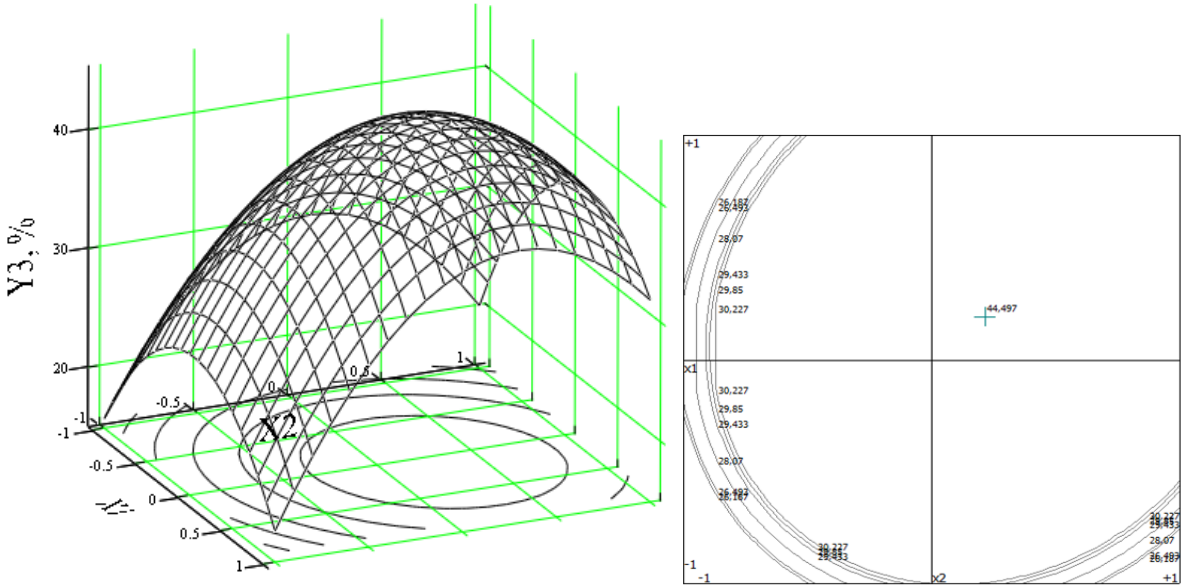


Рисунок 4.10 -Поверхность отклика, характеризующая степень разложения органического сухого вещества $L(У_3)$ в зависимости от факторов $T,сут(X_1)$ и $Д\ (X_2)$

Полученные результаты канонического анализа значений скорости газообразования $V_{сф}$ $(У_{1opt})$, метаносодержания в биогазе C $(У_{2opt})$и степени разложения органического вещества $L(У_{3opt})$ в зависимости от варьирования факторов периодичности загрузки T, *сут* (X_1), дозы загрузки $Д,\%(X_2)$ и содержания органического сухого веществаG_o, *кг/л* (X_3) в перерабатываемом навозном стоке в метантенке с биофильтром сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты канонического анализа значений $V_{сф}$ $(У_{1opt})$, C $(У_{2opt})$ и $L(У_{3opt})$в зависимости от варьирования факторов *Т, сут* (X_1), *Д,%*(X_2) и$G_{св}$, *кг* (X_3) по результатам лабораторных исследований

$V_{СФ}$ $(У_{1ОРТ})$, *Л/Л СУТ*			*С* $(У_{2\,ОРТ})$ *%*			*L*$(У_{3\,ОРТ})$*%*		
3,5	6,3	5,2	66,6	67,6	68,6	46,0	44,2	45,5
Д(X_2)= 6,2%	Т(X_1)= 9СУТ	Т(X_1)= 10СУТ	Д(X_2)= 4,3%	Т(X_1)= 7СУТ	Т(X_1)= 7СУТ	Д(X_2)= 5%	Т(X_1)= 8СУТ	Т(X_1)= 8СУТ
G_o(X_3)= 0,4кг/л	G_o(X_3)= 0,85кг/л	Д(X_2)= 6,4%	G_o(X_3)= 0,26кг/л	G_o(X_3)= 0,26кг/л	Д(X_2)= 4,3%	G_o(X_3)= 0,26кг/л	G_o(X_3)= 0,28кг/л	Д(X_2)= 5,0%

На основе проведённого канонического анализа результатов лабораторных исследований, факторы периодичность загрузки *(Т)*навоза в метантенк был принят *7,0 суток,* а содержание органического сухого вещества в перерабатываемом сырье *(G_o)- 0,25 кг/л.* Это повлияло на значимость коэффициентов, т.е. математические модели позволили выявить значимые факторы и исследовать его влияние и взаимодействие на поведение процесса анаэробной переработки и в качестве значимого фактора, при оптимизации выходных значений скорости образования биогаза $V_{сф}$*($У_1$, 4,5л/л сут),* метаносодержания в биогазе *С* *($У_2$, 66,5%)* и степени разложения органического сухого вещества перерабатываемого навоза *L* *($У_3$, 44,3%)* доза загрузки метантенка исходным сырьем была принята *Д = 5,2% (X_2).*

4.4. Результаты производственной проверки биогазовой установки (БГУ)с биофильтром(АБ)

Для подтверждения полученных результатов лабораторных исследований процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях биофильтра была проведена производственная проверка, разработанной нами биогазовой установки (см. техническую характеристику

п. 3.4) при переработке навозных стоков *свинофермы с содержанием 110 голов животных в сельскохозяйственном производственном кооперативе (СПК) «Тамча» Селенгинского района Республики Бурятия* (см. акт внедрения в приложениях Г и Д).

Производственная проверка биогазовой установки (БГУ) позволила установить эффективность применения биофильтра (АБ) в камере сбраживания метантенка на интенсивность переработки навозных стоков свиней в сравнении с существующими технологиями анаэробной переработки (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Результаты производственной проверки биогазовой установки (БГУ)

Сутки	Скорость образования биогаза (V_c $м^3/м^3сут$) в метантенке при анаэробной переработке навозных стоков свиноводства		
	С биофильтром		Без биофильтра - экспериментальное
	Экспериментальное	Теоретическое	
1	0,52	1,15	0,14
2	0,85	1,32	0,40
3	1,07	1,44	0,62
4 – 5	1,16	1,95	0,89
6 – 10	2,31	2,42	1,25
11 - 15	4,15	3,98	2,73
16 – 20	6,85	6,31	5,02
21 - 25	-	-	6,52

Отсюда следует (рисунок 4.11), что скорость образования биогаза в метантенке с биофильтром *(V_c $м^3/м^3сут$) на 34,0 % выше*, чем без анаэробного биофильтра.

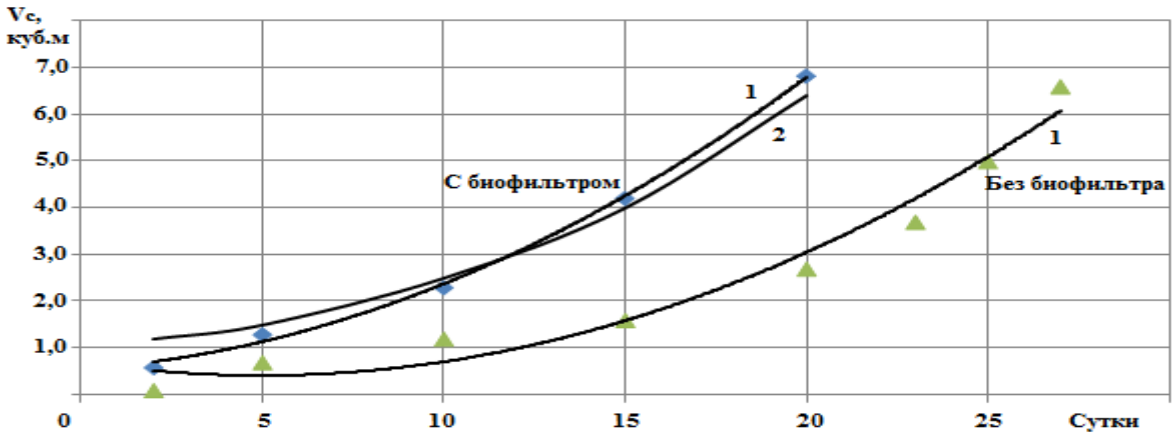
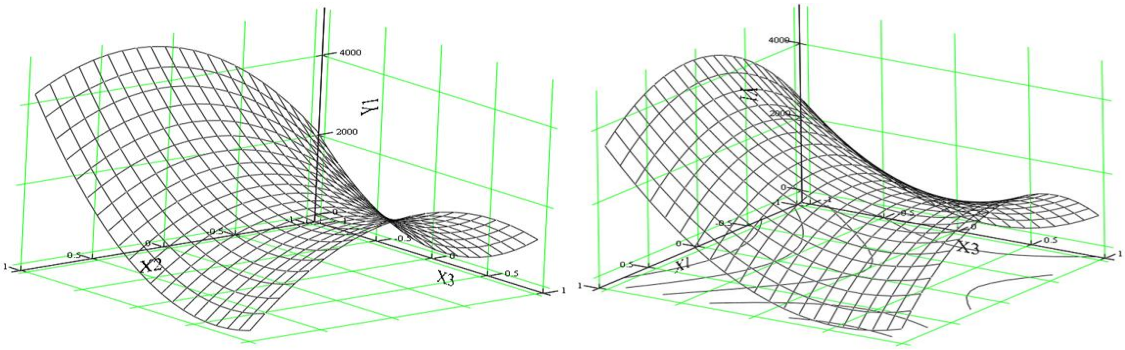


Рисунок 4.11 – Результаты производственной проверки скорости образования биогаза *(V_c м³/м³сут)* при переработке навозных стоков свиней в метантенке с биофильтром (1 – экспериментальные и 2 - теоретические данные) и без биофильтра (1 – экспериментальные данные).

При разработке биофильтра, были оптимизированы его конструктивные параметры: диаметр$d_б$, количество лопастей $n_л$ и площадь поверхности носителей $F_б$ для накопления метанобразующих микроорганизмов.

Поверхности отклика, характеризующие накопление метанообразующих микроорганизмов $X_{бм}$ $(У_4)$ в зависимости от площади поверхности носителя лопастей (капроновый шнур) $F_б$ (X_2) и количества лопастей$n_л$ (X_3), диаметра $d_б$ (X_1) и количества лопастей $n_л$ (X_3) биофильтра показаны на рисунке 4.12 а и б.



а) б)

Рисунок 4.12 – Поверхность отклика, характеризующая накопление активной биомассы $X_{бм}$ $(У_4)$в зависимости от: а) $F_б$ (X_2) и $n_л$ (X_3); б) $d_б$ (X_1) и $n_л$ (X_3) анаэробного биофильтра

Полученные результаты априорного ранжирования поверхности отклика, характеризующей оптимальное значение накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях лопастей позволили оптимизировать технологические параметры биофильтра, т.е. при накоплении активной биомассы метанобразующих микроорганизмов $X_{бмopt}$= *0,18 кг/м*^{3} соответствуют оптимальные значения диаметра биофильтра $d_б$ = *1,0 м,* количество лопастей соответственно $n_л$ = *8 шт* и площадь поверхности носителя (капроновый шнур) $F_б$ = *36,4 м*^{2}.

Также следует отметить, что результаты априорного ранжирования скорости образования биогаза $V_{сф\ opt}$в метантенке с биофильтром при переработке навозных стоков позволили установить (рисунок 4.13), что соответствует значения диаметра биофильтра $d_б$= *1,0 м* и площадь поверхности носителя (капроновый шнур) $F_б$ = *36,4 м*^{2}при $V_{сф\ opt}$= *4,5 м*^{3}*/м*^{3}*сут.* Однако, с увеличением диаметра и соответственно площади поверхности носителей биофильтра уменьшается степень разложения сбраживаемого навозного стока.

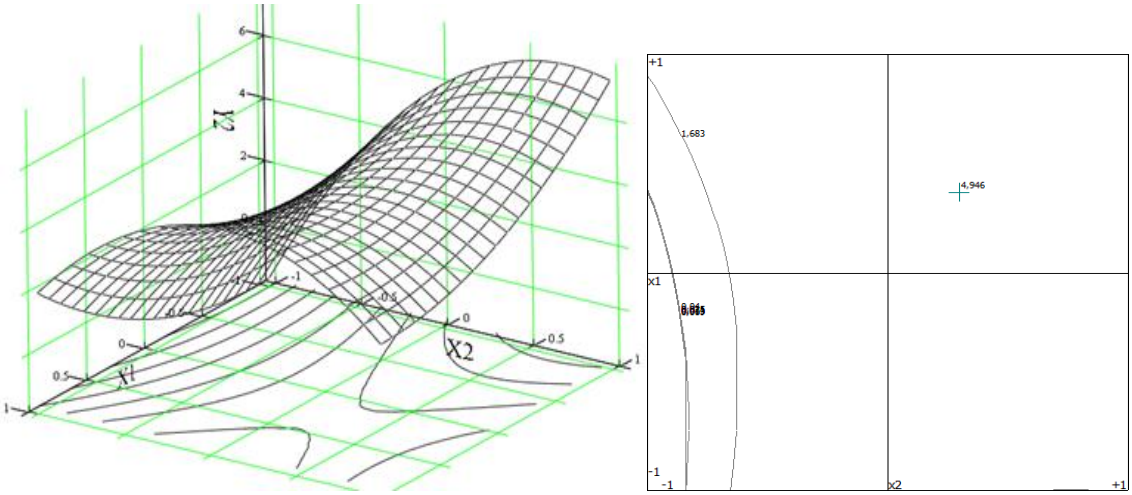


Рисунок 4.13 – Поверхность отклика, характеризующая скорость образования биогаза $V_{сфopt}$в зависимости от $d_б$ *(X*$_1$*) и* $F_б$ *(X*$_2$*)* биофильтра.

Для оценки эффективности работы биогазовой установки, при проведении производственной проверки, были определены основные

энергетические характеристики производимой продукции (см. приложение Л, таблицы ПЛ.1 – ПЛ.5). Энергия выделившегося биогаза $Q_б$*(МДж/м*^{3}*)* характеризует энергетическую количественную стороны процесса переработки навозных стоков, т.к. отражает энергосодержание биофильтра $Q_{аб}$*(МДж/м*^{3}*)* в технологическом процессе накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях лопастей и метанообразования в биогазе. Энергия получения товарного биогаза – $Q_Т$ *(МДж/м*^{3}*)* характеризует качественную энергетическую сторону процесса анаэробной переработки навозных стоков в метантенке с биофильтром.

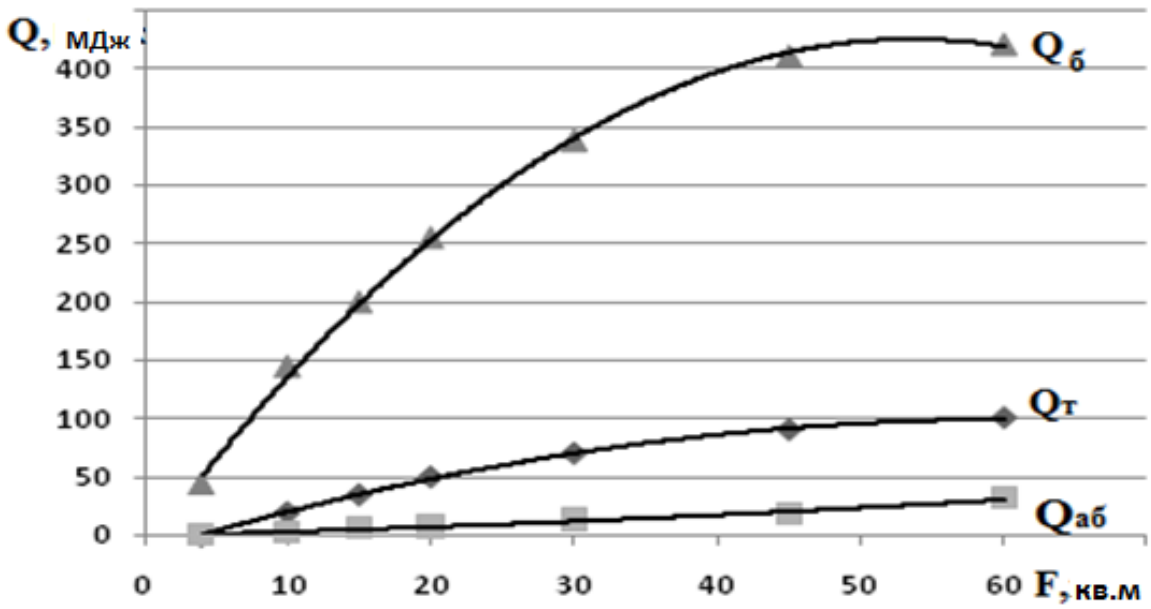


Рисунок 4.14 - Энергетическая характеристика биогазовой установки (БГУ) при накоплении активной биомассы на носителях лопастей $X_{бм}$ = *0,033кг/м*^{3}биофильтра:$Q_б$– энергия выделившегося биогаза; $Q_Т$– энергия товарного биогаза; $Q_{аб}$– энергосодержание биофильтра.

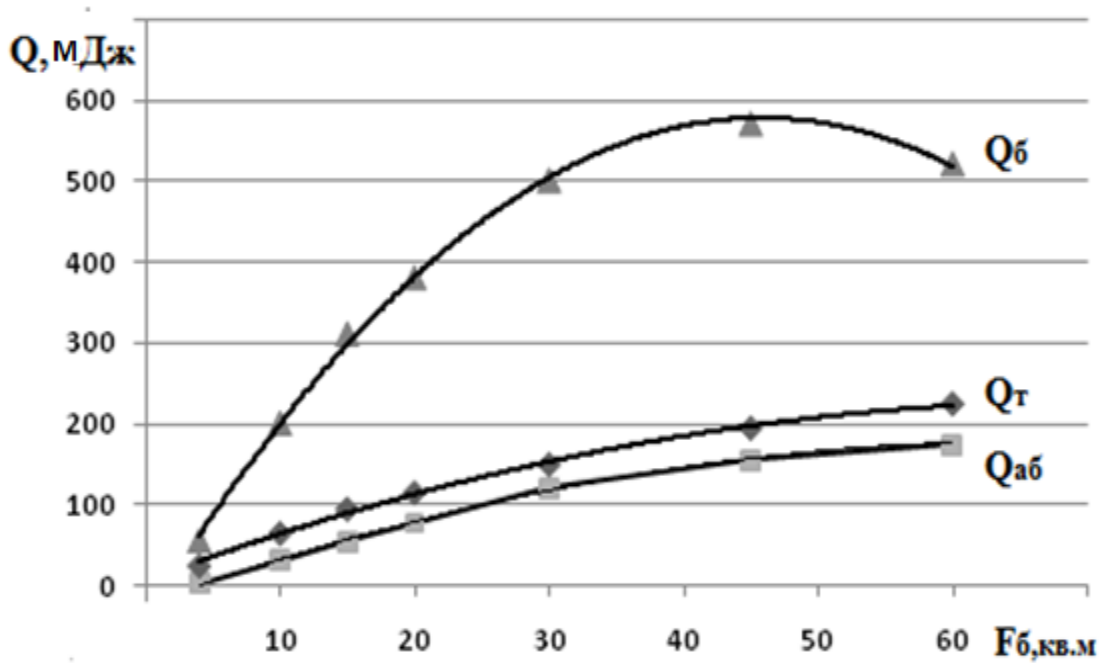


Рисунок 4.15 - Энергетическая характеристика БГУ при накоплении активной биомассы на носителях лопастей $X_{бм}$ = *0,21 кг/м*^{3}биофильтра.

Полученные результаты производственной проверки опытно-экспериментальный биогазовой установки (БГУ) позволили установить эффективность работы биофильтра (АБ) с накопленными сообществами метанообразующих микроорганизмов при сбраживании навозных стоков, т.е. с увеличением активной биомассы метанобразующих микроорганизмов $X_{бм}$ (рисунки 4.14 и 4.15) повышается энергосодержание биофильтра $Q_б$ *в 2,5 раза* и увеличивается товарная энергия биогаза $Q_Т$ *в 2,0 раза.*

Выводы:

1. В результате реализации многофакторного эксперимента получены регрессионные модели скорости образования биогаза $V_{сф}$ и накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях лопастей биофильтра $X_{бм}$ при переработке навозных стоков свиноводства, соответственно $V_{сф}$= *4,5 л/сут* и$X_{бм}$= *0,18 кг/м*^{3},

2. В качестве конструктивного элемента-носителя метанообразующих микроорганизмов анаэробного биофильтра, при проведении лабораторных исследований, был установлен капроновый шнур диаметром $d_ш$=*5,0мм* (ГОСТ 25574-83) и получены его микробиологические характеристики накопления метаногенной микрофлоры в зависимости от поверхности *193 мкг белка/см*^{2}и массы *4500 мкг белка/г,* а в дальнейшем явился конструктивным элементом для анаэробного биофильтра.

3. По результатам априорного ранжирования оптимизированы конструктивные параметры шарообразного анаэробного биофильтра: диаметра $d_б$= *1,0м,* количества лопастей $n_л$ = *8,0 шт* и площадь поверхности носителей $F_б$ = *36,4 м*^{2}.Результаты производственной проверки позволили установить, что скорость образования биогаза в метантенке с анаэробным биофильтром $V_{сф}$ *на 34 % выше*, чем в метантенке без биофильтра, а также повышается энергоёмкость анаэробного биофильтра $Q_б$ *в 2,5 раза* и увеличивается товарная энергия биогаза Q_T *в 2,0 раза.*

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ (БГУ) В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ

5.1. Экономическая эффективность анаэробной переработки навозных стоков свиноводства

Производство биогаза из органических отходов животноводства представляет собой один из видов энергосберегающей технологии, которая позволяет получить газообразное топливо и органическое удобрение с высоким содержанием аммиачного азота, производить биологическую очистку стоков, сократить объемы иловых площадок и улучшить экологическую обстановку Байкальского региона.

Отсюда следует, что для определения экономической эффективности применения интенсивной технологии анаэробной переработки органических отходов животноводства в биогаз и удобрение, разработана и создана 2-х ступенчатая биогазовая установка (БГУ)горизонтального (рисунок 5.1а)и вертикального расположения метантенков (рисунок 5.1б)и её технологическая схема(рисунок 5.2) *на свиноферме с содержанием 110 голов животных в ООО сельскохозяйственном производственном кооперативе (СПК) «Тамча» Селенгинского района Республики Бурятия*.

Технология (рисунок 5.2) включает в себя ряд последовательных операций (метантенк - предсбраживатель и метантенк с биофильтром) и ее можно характеризовать как интенсивную, природоохранную и ресурсосберегающую. Особенностью технологии является переработка навозных стоков в интенсивном режиме с разделением их на жидкие и твёрдые фракции после анаэробного сбраживания. Совершенствование технологии переработки навозных стоков заключается в применении биофильтра, который является конструктивным элементом метантенка.

а) б)

Рисунок 5.1 - 2-х ступенчатая биогазовая установка (БГУ):
а) горизонтального и б) вертикального расположения метантенков.

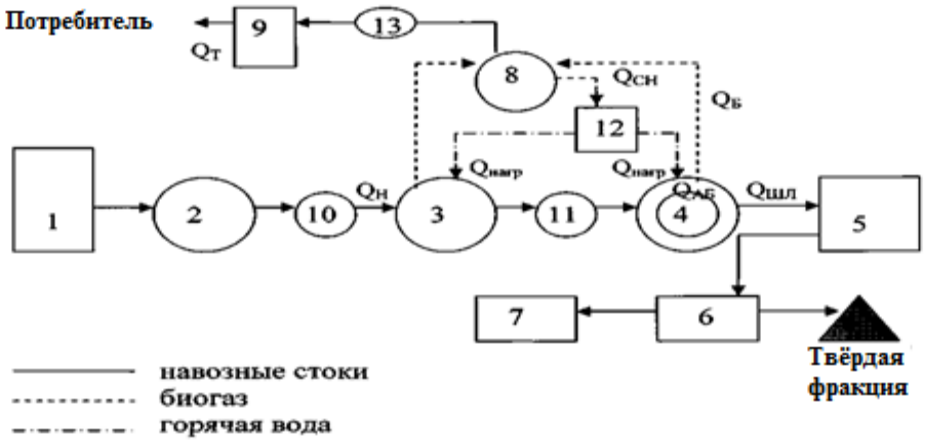


Рисунок 5.2. Технологическая схема системы интенсивной переработки навозных стоковв СПК «Тамча» Селенгинского района Республики Бурятия: 1 –свиноферма; 2 – навозосборник; 3 – метантенк – предсбраживатель; 4 – метантенк с биофильтром; 5 – отстойник сброженной биомассы; 6 – разделитель навозных стоков на фракции; 7 – пруд –накопитель жидкой фракции; 8 – мокрый газосборник; 9 – газгольдер биогаза; 10, 11 – фекальные насосы; 12 – котел на биогазе; 13 – компрессор.

Критерием оценки экономической эффективности применения биогазовой установки в сельскохозяйственных предприятиях Республики Бурятия является сравнительный годовой экономический эффект $Э_Г$, который определяется по следующей формуле [65, 67, 81]:

$$Э_{Г} = (П_{б} - П_{Н}) \cdot P_{Год.} + \sum Э_{Т.З.} + Q_{б}, \quad (5.1)$$

где $П_{б}$ *и* $П_{Н}$*(тыс.руб)*– приведенные затраты по базовому (существующему) и новому варианту; $P_{Год.}$*(т)* – годовой объем работ; $\sum Э_{Т.З.}$ *(тыс. руб)* - сумма эффектов от ликвидации ущербов, причиненных техногенными загрязнениями;$Q_{б}$ *(тыс. руб)* – товарная энергия от получения биогаза.

Удельные капитальные вложения на единицу перерабатываемого навоза определяется как:

$$K_{уд} = \sum_{i=1}^{n} \frac{Б_{i}}{P_{Год}}, \quad (5.2)$$

где $Б_{i}$*(тыс. руб)*– балансовая цена i-той машины и оборудования в применяемой технологии; $P_{Год}$ *(т)* –годовой объем работ.

Прямые годовые эксплуатационные затраты на единицу перерабатываемого навоза рассчитывают как:

$$C_{уд} = A_{м} + P_{м} + Г, \quad (5.3)$$

где $A_{м}$*(руб/т)*– затраты на реновацию; $P_{М}$ *(руб/т)*– затраты на капитальный, текущий ремонты и планово-техническое обслуживание; *Г (руб/т)*– затраты на горюче-смазочные материалы и электроэнергию.

Затраты на реновацию единицы перерабатываемого навоза составляет:

$$A_{м} = \sum_{i=1}^{n} \frac{Б_{i.} \times a_{i}}{G_{r}}, \quad (5.4)$$

гдеa_{i} - коэффициент отчислений на реновацию по каждой машине и оборудованию.

Затраты на капитальный, текущий и планово-техническое обслуживание машин и оборудования на единицу перерабатываемого навоза рассчитывают по формуле:

$$P_{м} = \sum_{i=1}^{n} \frac{Б_{i}(R_{ki} + R_{Ti} + R_{ПТi})}{G_{r}}, \quad (5.5)$$

где R_{ki}, R_{Ti}, $R_{Пmi}$– коэффициенты отчислений на капитальный, текущий и планово-техническое обслуживание по каждой машине и оборудования.

Затраты на горюче-смазочные материалы и электроэнергию на единицу перерабатываемого навоза находим по выражению:

$$Г = \sum_{i=1}^{n} Э_{M\,i} \cdot Ц_{Э}, \tag{5.6}$$

где $Э_{Mi}$*(кВт·ч)*– годовой удельный расход энергии соответственно по i-ой машине и оборудованию; $Ц_{Э}$ *(руб)*– отпускной тариф на 1,0 кВт·ч электроэнергии.

Экологическое содержание непроизводительных расходов выражается величиной приведенных затрат по сравниваемым вариантам. К непроизводительным расходам, связанным с техногенным загрязнением относятся: затраты на дополнительное строительство артезианских скважин и водоводов, обеззараживающих устройств; дополнительные затраты, связанные с созданием нормальных санитарно-гигиенических условий содержания и эксплуатации животных; дополнительные затраты связанные с проведением ветеринарных мероприятий по профилактике и ликвидации последствия влияния техногенных загрязнений на животных.

Годовой экономический эффект от ликвидации ущербов, причиненных техногенными загрязнениями определяется следующим выражением:

$$Э_{Т.З.} = Э_{Ж.П.} + Э_{ЭБ}, \tag{5.7}$$

где $Э_{Ж.П.}$*(тыс.руб)* – экономический эффект от повышения животноводческой продукции и улучшения ее качества; $Э_{Э}$*(тыс. руб)*– экологический эффект.

Годовой экономический эффект от повышения производства животноводческой продукции и улучшения её качества выражается величиной приведенных затрат: от вынужденного убоя, падежа и уничтожения животных; от снижения продуктивности и качества

животноводческой продукции; от недополучения приплода в соответствующей условно чистой и загрязненной зонах, и определяется как:

$$Э_{Ж.П.} = \sum_{i=1}^{3} З_i, \qquad (5.8)$$

где $\sum_{i=1}^{3} З_i$ - сумма затрат на повышение продуктивности животноводства и улучшение ее качества, *тыс. руб.*

Экологический эффект характеризуется снижением загрязнения воздушной среды от вредных выбросов при сгорании топлива и исключением ущерба от загрязнения водоемов солями и органическими веществами имеющихся в навозе [38, 53]. Отсюда, следует выражение для определения годового экологического эффекта $Э_{ЭК}$,*(тыс. руб)* как:

$$Э_{ЭК} = Э_{вод} + Э_{АТ}, \qquad (5.9)$$

где $Э_{АТ}$– годовой экономический эффект от снижения загрязнения атмосферы от вредных выбросов при сгорании топлива, *тыс. руб*;

$Э_{ВГ}$– годовой экономический эффект от предотвращения загрязнения водоемов солями и органическими веществами, тыс. руб.

Годовой экономический эффект от снижения загрязнения водоемов $Э_{вг}$определяют по формуле [53]:

$$Э_{ВГ} = P_{год} \times \beta \times (Z_1 \times C_1 + Z_2 \times C_2), \qquad (5.10)$$

где $P_{год}(т)$ – годовое образование навоза на ферме;β- коэффициент выноса загрязняющих веществ поверхностным стоком (0,005), при неблагоприятных условиях (снеготаяние, дождь) равна 0,2;Z_1,Z_2– содержание загрязняющих веществ в тонне навоза; C_1, C_2– удельный ущерб на *1 кг* загрязнителя, *руб*: соответственно солей и *БПК (0,016 руб/кг и 2,00 руб/кг).*

Годовой экономический эффект от снижения суммарного ущерба от сокращения вредных выбросов в атмосферу составит:

$$Э_{АГ} = \sum_{i=1}^{n} y_i \cdot B_i, \quad (5.11)$$

где y_i*(тыс. руб/т)*– ущерб от i-го компонента вредных выбросов; B_i(т/год) – снижение вредных выбросов за счет сокращения потребления топлива на базовой энергетической установке при использовании биогаза.

Снижение вредных выбросов за счет потребления базового энергетического сырья при использовании биогаза можно определить по формуле:

$$B_i = \frac{S_T}{10^6} \times в_i \times (V_{ПГ} - V_{БГ}), \quad (5.12)$$

гдеS_T– годовая экономия первичного энергоресурса, *т.у.т./год;*B_i– концентрация i-го компонента вредных выбросов, *г/м*^{3};$V_{ПГ}$– объем продуктов горения при сжигании 1-ой тонны замещаемого условного топлива, *м*^{3}*/т.у.т;*$V_{БГ}$ – объем продуктов горения при сжигании *1,0м*^{3} биогаза, *м*^{3}*/т.у.т.*

Концентрация вредных выбросов при горении биогаза в настоящее время не установлена, однако представляется возможным в первом приближении принять их соответствующими выбросам природного газа. Для пересчета выбросов, приходящихся на одну тонну сжигаемого топлива в условном исчислении в объемные единицы можно применять следующую формулу [109]:

$$V_{ПТ} = \frac{Q_{УТ}}{Q_H^P}[2(1{,}088Q_H^P + 66W^P - 10) + (0{,}053Q_H^P + 12{,}4W^P + 50)], \quad (5.13)$$

где Q_H^P - низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг, 29,3 мДж/кг; $Q_{УТ}$ - теплота сгорания условного топлива, 31,5 МДж/кг;α - коэффициент избытка воздуха, 1,3…1,35; W^p- процентное содержание влажности в топливе, %.

Расчеты экономической эффективности от внедрения интенсивной технологии анаэробной переработки навозных стоков в метантенке с биофильтром на свиноферме СПК «Тамча» Селенгинского района

Республики Бурятия с содержанием животных 110 голов составил 723,3 тыс.руб./год со сроком окупаемости капитальных вложений 1,6 года (таблица 5.1). В основу расчета экономической эффективности положен принцип сравнения новой анаэробной технологии и существующих вариантов переработки навозных стоков и складывалась из энергетических и экологических положительных эффектов.

Таблица 5.1 - Экономическая эффективность внедрения биогазовой установки (БГУ) на свиноферме содержанием 110 голов животных в СПК «Тамча» Селенгинского района Республики Бурятия

Наименование показателей	Условные обозначения	Значения показателей для варианта переработки навоза	
		базового	нового
1	2	3	4
Капиталовложения, тыс. руб.: - сооружение - оборудование - здания	 $К_с$ $К_с$ $К_з$	 184200 525500 139400	 296,95 1321,5 148,7
Годовой объем работ, т.	$Р_{год}$	6450	6450
Электроэнергия, кВт·ч/год	Эн. год	3700	10041
Товарный биогаз, $м^3$/год	$V_т$	-	78450
Капиталовложения, руб./т.	$К_т$	54,12	724,2
Реновация, руб./т.	$А_м$	2,14	5,7
Отчисления на ремонт, руб./т	$Р_м$	0,49	17,3
Транспортные расходы, руб./т.	Г	141,2	-
Эффект от предотвращения заболеваний животных, тыс. руб.	$Э_{жп}$	-	137,7
Эффект от предотвращения, загрязнения атмосферы, тыс. руб.	$Э_А$	-	29,950
Эффект от предотвращения загрязнения водоемов, тыс. руб.	$Э_{вг}$	-	248,
Эффект от получения товарного биогаза, тыс. руб.	$Э_б$	-	627,6
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	$Э_{год}$	-	723,300
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	$Т_{ок}$	-	1,6

5.2. Методические рекомендации производству при переработке навозных стоков в биогазовой установке (БГУ) с анаэробным биофильтром (АБ)

Основные преимущества, по сравнению с известными аналогами, заключаются в том, что установка БГУ основана на применении метантенков 2-го поколения по модульному 2-х ступенчатому варианту переработки навозных стоков. Применение биогазовой установки дает возможность сэкономить тепловые потери за счет предложенной формы метантенка, снизить энергозатраты на перемешивание, уменьшить габариты оборудования за счет увеличения скорости образования биогаза, обеспечить более полную минерализацию исходного сырья, благодаря высокой удельной поверхности контакта, накопленных метанообразующих микроорганизмов в биофильтре с перерабатываемым сырьем. Постоянное медленное перемещение лопастей биофильтра с накопленными микроорганизмами обеспечивает скорость образования биогаза с единицы рабочего объема метантенка.

На основании проведенных экспериментальных исследований накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях лопастей биофильтра предлагаются следующие методические рекомендации производству для крупнотоннажной анаэробной переработки навозных стоков в интенсивном режиме:

1. При разработке и создании анаэробных биофильтров в качестве конструктивных элементов наиболее пригодным является капроновый шнур.

2. При применении анаэробных фильтров следует строго учитывать негативный эффект избыточного накопления метанообразующих микроорганизмов в метантенке, которая может изменить характеристику массообмена, т.е. этот эффект должен быть сведен к минимуму.

3. Следует строго контролировать температурный режим, потому что при значительном повышении температуры происходит гибель метанообразующих микроорганизмов.

4. Проникновение следов кислорода в метантенк приводит к увеличению окислительно-восстановительного потенциала среды, окислительным процессам, прекращению метанообразования и созданию отрицательных давлений в рабочей камере метантенка.

5. Наиболее оптимальная доза загрузки метантенка исходным сырем, при накоплении метанообразующих микроорганизмов на носителях лопастей анаэробного биофильтра, должна соответствовать*5,2 %* от общего объема перерабатываемого навоза.

Перспективы дальнейшей разработки темыпредусматривает изучение накопления метанообразующих микроорганизмов в анэробных биофильтрах при модульном 4-х ступенчатом расположении метантенков в биогазовой установке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ состояния вопроса совершенствования процесса анаэробного сбраживания отходов животноводства показал, что существующие установки не обеспечивают переработку навозных стоков в более короткие сроки с наименьшими затратами. В связи с этим, одним из перспективных направлений решения данной проблемы является разработка интенсивной технологии переработки навозных стоков свиноферм в биогазовой установке с применением биофильтра.

2. Разработанная математическая модель процесса переработки навозных стоков свиноферм в метантенке с биофильтром позволяет установить увеличение скорости образования биогаза в зависимости от содержания органического вещества G_o*(кг/м*^{3}*сут)* в перерабатываемом навозе, периодичности *T(сут)* и дозы загрузки *D(%)* метантенка. По полученной математической модели процесса накопления метанообразующих микроорганизмов в биофильтре разработана структурная модель совершенствования технологии переработки навозных стоков свиноферм в метантенке, учитывающая энергобиологические (ЭБС), технические (ТС) и энерготехнологические средства (ЭТС).

3. Методика расчёта процесса накопления метанообразующих микроорганизмов позволяет определить интенсивность накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях биофильтра при оптимальной дозе загрузки $D = 5{,}2\%$ от объема перерабатываемого сырья и периодичности загрузки метантенка $T=7{,}0$ *сут.* В качестве конструктивного элемента-носителя метанообразующих микроорганизмов анаэробного биофильтра при проведении лабораторных исследований был установлен капроновый шнур диаметром $d_ш=5{,}0$*мм* (ГОСТ 25574-83) и получены его структурные характеристики накопления метанообразующих микроорганизмов в зависимости от поверхности *193 мкг белка/см*^{2} и массы носителя *4500 мкг белка/г*.

4. В результате реализации многофакторного лабораторного эксперимента получены регрессионные модели оптимизации скорости образования биогаза $V_{сф}$= *4,5 л/л сут* метаносодержание в биогазе *C = 66,5%* и степень разложения органического вещества *L = 44,3%.* При априорном ранжировании поверхности отклика оптимальное значение накопления активной биомассы в биофильтре соответствует $X_{бморт}$=*0,18 кг/м*^{3}, оптимальные конструктивные элементы шарообразного биофильтра: диаметра $d_б$= *1,0м*, количества лопастей $n_л$ = *8,0 шт* и площадь поверхности носителей $F_б$ = *36,4 м*^{2}. Установлено, что с увеличением площади носителей биофильтра уменьшается степень разложения *(L)* органического вещества перерабатываемого навоза *от 46,% до 22,0 %,* т.е. это связано с уменьшением пропускной способности биофильтра перерабатываемого сырья. Уточнено, что скорость образования биогаза в метантенке с анаэробным биофильтром $V_{сф}$ на *34 % выше,* чем в метантенке без биофильтра.

5. Разработанная технологическая схема переработки навозных стоков свиноферм с применением в метантенке биофильтра позволяет существенно уменьшить затраты энергетических ресурсов, т.е. с увеличением метанообразующих микроорганизмов на носителях лопастей повышается энергосодержание биофильтра $Q_Б$ *в 2,5 раза* и увеличивается товарная энергия биогаза $Q_Т$ *в 2,0 раза.*Годовой экономический эффект от внедрения анаэробной переработки навозных стоков в биогазовой установке *(БГУ)* в СПК «Тамча» Селенгинского района Республики Бурятия составил *723,3 тыс. руб/год*, а срок окупаемости капитальных вложений *1,6 года.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Граневский и др. – 2-е изд., перераб. и доп./об – М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. Аксенов В.И. Роль безотходных технологий в решении проблемы охраны водных ресурсов / В.И. Аксенов, А.П. Ловов, И.Т.Романов. М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1987. – 50 с., Библиогр.: 20 назв.
3. Алексеев В.И. и Бычков М.Н. Метантенк: СССР а.с. №1382825. Опубл. М.Н. Бычков 23.03.1988. Бюл.№11.
4. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника: Учеб.пособие./ Г.Н. Алексеев – М.: Высшая школа, 1980. – 552 с., ил.
5. Алешкин В.Р. Механизация животноводства. 2-е изд., перераб. и доп. /В.Р. Алешкин, П.М. Рощин– М.: Колос, 1993. – 319 с.
6. Андреев В.А. Использование навоза свиней на удобрение/ В.А.Андреев, М.Н.Новиков, С.М.Лунин – М.: Росагропромиздат, 1990.-94с. ил.
7. Аппарат для анаэробного сбраживания органических отходов животноводства, пищевой промышленности и городских стоков» [Текст]: пат.1599319 на изобретение, Рос. Федерация: МПК 6С02F 3/28 /Бадмаев Ю.Ц., Крюков В.Р., Ковалев А.А.; заявл. 20.01.1988; опубл. 10.09.1990. Бюл. № 15. – 5 с.: ил.
8. Баадер В. Биогаз: Теория и практика. (Пер с нем.. и предисловие М.И. Серебряного.)/ В.Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер– М.: Колос, 1992. – 148 с., ил.
9. Бабаянц А.Б. Интенсификация термофильного метанового брожения при производстве кормового концентрата витамина В-12 / А.Б. Бабаянц,Е.С. Панцхава, Я.А. Ханухаев, Прикл. биохим. микроб., 1976, №12, С. 250-264 А.с. 1599319 СССР.

10. Бадмаев Ю.Ц. Аналитический обзор методов переработки органических отходов в метантенках с анаэробным биофильтром / Ю.Ц. Бадмаев, В.А. Тайшин, А.А.Ковалев / Энергосберегающие и природоохранные технологии (встреча на Байкале): материалы IIМеждународной научно-практической конференции 20-25 августа 2003 г. - Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. – С. 362-366.
11. Бадмаев Ю.Ц. Высокоинтенсивная технология анаэробной переработки органических отходов животноводства в условиях Республики Бурятия: Научно-методические рекомендации [Текст] / Ю.Ц. Бадмаев – Улан-Удэ: Изд-во БГСХА им. В.Р. Филиппова, 2014. – 104 с.
12. Бадмаев Ю.Ц. Динамическая модель интенсификации процесса переработки навозных стоков в метантенке с анаэробным биофильтром[Текст] / Ю.Ц.Бадмаев, Ю.А.Сергеев // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологии и управления.- 2017.-№ 3(66).С. 55-62.
13. Бадмаев Ю.Ц. Интенсивная технология анаэробной переработки органических стоков в Байкальском регионе / Ю.Ц.Бадмаев // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р.Филиппова.- 2009. - № 3(16). С.157-160.
14. Бадмаев Ю.Ц. Исследование процесса иммобилизации метанообразующих микроорганизмов на микро – и макроносителях / Ю.Ц. Бадмаев, В.Р. Крюков, А.А. Ковалев, В.А. Тайшин/ Экологическая безопасность, сохранение окружающей среды и устойчивое развитие регионов Сибири и Забайкалья: Материалы всероссийской научно-практической конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2002. – С. 220 – 223.
15. 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.

16. Бадмаев Ю.Ц. Методика расчёта оптимальной дозы загрузки биореактора при анаэробном сбраживании навозных стоков / Ю.Ц. Бадмаев// Вестник Бурятского университета. Сер. 9. Физика и техника. Вып. 5 – Улан-Удэ. Изд-во Бурятского гос. ун-та, 2006. С. 210-214.
17. Бадмаев Ю.Ц. Методы интенсификации процесса анаэробного сбраживания навоза и их анализ /Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса Забайкалья: /Ю.Ц. Бадмаев, А.А. Ковалев, Материалы научно-практической конференции 4-6 февраля 2003 г. – Улан-Удэ: Изд-во БГСХА, 2003. – С. 20-24.
18. Бадмаев Ю.Ц. Теоретические исследования биогаза-биотоплива для автономных сельскохозяйственных энергопотребителей/ Ю.Ц. Бадмаев, И.Б.Шагдыров, А.Ю.Бадмаев /Материалы международной научно-практической конференции. Улан-Батор: Изд-во Монг. СХУ, 2015. – С.15-19.
19. Бадмаев Ю.Ц. Технологии переработки навоза и навозных стоков и методы их совершенствования/ Ю.Ц.Бадмаев, Ю.А.Сергеев // Сб. трудов Восточно-Сибирского государственного университета технологии и управления. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, - 2017. - № 13.С. 27-30.
20. Бадмаев Ю.Ц. Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов / Ю.Ц. Бадмаев, В.А. Тайшин, В.Г. Содномбалов// Проблемы устойчивого развития регионов в XXI веке (Материалы II международного симпозиума 30 сентября – 2 октября 2002 г.).– Биробиджан, 2002. – С. 131-132.
21. Бадмаев Ю.Ц. Проблемы энергообеспечения животноводства Восточной Сибири [Анаэробная переработка отходов животноводства в биогаз и удобрение] Ю.Ц. Бадмаев,В.А. Тайшин,

А.А. Ковалев // Энергообеспечение и энергосбережение в сел.хозве. – М., 2003. ч. 1. – С. 197-200.

22. Бадмаев Ю.Ц. Результаты лабораторных исследований иммобилизации метанообразующих микроорганизмов на твёрдых носителях [Текст] / Ю.Ц.Бадмаев, Ю.А.Сергеев // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р.Филиппова.- 2017.-№ 3(43). С. 70-77.
23. Бадмаев Ю.Ц. Экологобезопасная технология обеспечения энергией в условиях этнического природопользования / Ю.Ц. Бадмаев // Опыт и традиции этнического природопользования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (чтения памяти профессора С.Б. Помишина) 17-19 сентября 2003 г.– Улан-Удэ: Изд-во БГСХА, 2003. – С. 67-69.
24. Бадмаев Ю. Ц. Эффективная переработка органических стоков в Байкальском регионе с применением анаэробного биофильтра / Ю. Ц. Бадмаев // Вестник Крас. ГАУ. Вып. 7(34) – Красноярск. Изд-во Крас. ГАУ, 2009.- С.172-174.
25. Бадмаев Ю. Ц.,. Эффективность производства биогаза для предприятий АПК Байкальского региона. / Ю.Ц. Бадмаев, А.А. Ковалев, М.В. Федоров // Энергетический вестник Санкт-Петербургского ГАУ. Сборн. Научн. Трудов – Изд-во С-ПГАУ, 2009. - С. 227-231.
26. Бадмаев Ю.Ц. Применение биогаза для сельскохозяйственного производства Республики Бурятия / Ю.Ц. Бадмаев, С.Н. Кушнарёв, Ю.А. Сергеев // Вестник аграрной науки Дона / Зерноград.- 2017.- №4 (40). С. 30-34.
27. Бадмаев Ю.Ц. Технико-экономическая эффективность применения биогаза в условиях Республики Бурятия / Ю.Ц.Бадмаев, Ю.А.Сергеев // Сб. науч. трудов ВСГУТУ / Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. - № 14. С. 52-57.

28. Бадмаев Ю.Ц. К вопросу о тенденции развития биоэнергетических технологий в аграрном образовании [Текст] / Ю.Ц. Бадмаев, Н.С. Хусаев // Вестник дальневосточного регионального учебно-методического центра.- Владивосток, 2020.-№ 31.- С. 121-124.
29. Байкал как участок мирового природного наследия: результаты и перспективы международного сотрудничества. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 137с.
30. А.с. № 1305134 Метантенк / И.Г. Баржалов и О.П. Смирнов:- Опубл. в бюлл. №15 23.04.1987 г.
31. Батуева Д.Ж. Проблемы и перспективы развития АПК Байкальского региона в период реформирования экономики /Д.Ж. Батуева // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса Забайкалья: Материалы научн.-практ. конф. 4-6 февраля 2003 г. – Улан-Удэ: Изд-во БГСХА, 2003. – С. 268-272.
32. Биогаз – 85. Проблемы и решения: Материалы сов. – фин. симпоз. 4-6 февраля 1985 г. – Москва, Хельсинки, 1985. – 279 с.
33. Биомассы как источник энергии. Пер с нем. / Под ред. С. Соуфера, О. Заборски. – М.: Мир, 1985. – 368 с., ил.
34. Биотехнология сельскому хозяйству / А.Г. Лобанок, М.В. Залашко, Н.И. Анисимова и др. Под ред. А.Г. Лобанка. – Мн.: Ураджай, 1988. – 199 с.
35. 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. Олеськин, В.Д. Самуилов. – М.: Наук.думка, 1989. – 152 с., ил.
36. Бурга Г. Биогаз на основе возобновляемого сырья: Сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии [Электронный ресурс] \ Г.Бурга, Р.Криста, В.Петер. – Германия: Спец. агенство возобновляемых ресурсов (FNR), 2010.-118с.-Режим доступа:http||www.twirpx.com/file/443824/.-10.05.2014.

37. Бурятия в цифрах: Краткий статистический сборник №1, 01-01-13 / Бурятстат – Улан-Удэ , 2015 – 90 с.
38. Варфоломеев С.Д. Биотехнология: Кинетические основы микробиологических процессов: Учеб.пособие для биол. и хим. вузов./ С.Д. Варфоломеев, С.В. Калюжный– М.: Высш. шк., 1990. – 296 с., ил.
39. Васильев Ю.С. Экология использования возобновляющихся энергоисточников. /Ю.С. Васильев, Н.И. Хрисанов – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 343 с.
40. Веденев А.Г. Руководство по биогазовым технологиям [Текст] / А.Г.Веденев, Т.А.Веденева. Бишкек: ДЭМИ, 2011.-84с..
41. Веденятин Г.В. Общая методика экспериментального исследования обработка данных./Г.В. Веденятин– М.: Колос, 1973. – 199 с., ил.
42. Виестур У.Э. Системы ферментации. /У.Э. Виестур, А.М. Кузнецов, В.В. Савенков– Рига: Занатне, 1986. – 174 с.
43. Виестур У.Э Биотехнология: биологические аспекты, технология, аппаратура./У.Э Виестур, И.А. Шмите, А.В. Жилевич – Рига: Занатне, 1987г. –263 с.
44. Вознесенский В.А. Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях./В.А. Вознесенский– М.: Статистика, 1974. – 192 с.
45. Возобновляемые источники энергии для устойчивого развития Байкальского региона: Материалы 2-ой международной научной конференции, Улан-Удэ 21-22 июня 2004 / Под ред. В.Т. Тайсаевой. Улан-Удэ: Изд-во БГСХА, 2005. - 172 с.
46. Воловенко О.С. Метановое сбраживание свиного навоза./ О.С. Воловенко – Труды / Днепропетр. СХИ, 1979, г. 42. – с. 112-117.
47. ВороновЮ.В. Примеры расчетов биологических фильтров и станции биофильтрации: Учебн. пособие./Ю.В Воронов, В.П. Саломеев – М., 1983. – 83 с., ил. 20 см.

48. Вращающийся полый спиральный биофильтр: ГДР Пат №2919221. Опубл. 1980.
49. Гальперин М.В. Экологические основы природопользования. – М.: Форум-2003. – 296 с.
50. Ганжурова Т.Н. Состояние окружающей среды в Республике Бурятия. О реализации федеральных целевых программ по охране окружающей среды 1995-2010гг. / Экологическая безопасность, сохранение окружающей среды и устойчивое развитие регионов Сибири и Забайкалья: Материалы всероссийской научно-практической конференции./ Т.Н. Ганжурова – Улан-Удэ, 2002. – С. 61-68.
51. Гвоздев Н.В. Интенсификация работы метантенков / Автореф. дисс. на соиск. уч. степ.канд. техн. наук (05.23.04)./Н.В. Гвоздев – М., 1983. – 20 с. граф.
52. Гвоздяк П.И Иммобилизованные клетки в биотехнологии. /П.И Гвоздяк, Пущино, 1987. – С. 56-61.
53. Гидродинамика газо-жидкостных смесей в трубах / В.А. Мамаев, Г.Э. Одинария, Н.И.Семенов, А.А. Точигин. – М.: Недра, 1969.–208 с.
54. Гидравлика и гидравлические машины / З.В. Ловкис, В.Е. Бердышев, Э.В. Костюченко, В.В. Дейнега. – М.: Колос, 1985. – 303 с., ил.
55. Гребник В.И. Интенсификация процесса метанового брожения птичьего помета / В.И Гребник, В.И. Марченко /Тезисы докладов совещания «Биогаз-878». – Рига, 1987. – 34с.
56. Гриднев П.И. Исследование процесса и обоснование параметров технологического оборудования для переработки навоза КРС в анаэробны условиях: Автореф. дисс. на соиск. учен.степен. канд. технич. наук / П.И. Гриднев – М., 1982. 15 с. - /ВАСХНИЛ/ /ВИЭСХ/.

57. Доумчариева Ж.Е. Расчёт скорости выхода технологического процесса сбраживания органического субстрата // Ж.Е.Доумчариева, Ж.Н.Нуржигитова, М.А.Байжарикова, Е.М.Бейшен/ Молодой учёный. 2017.- №4.1.- С.39-41.

58. Друзьянова В.П. Динамическая и математическая модели процесса анаэробного сбраживания навоза крупного рогатого скота / В.П.Друзьянова, Ю.А.Сергеев // Вестник Бур. ГСХА №3(40): г.Улан-Удэ, июль-сентябрь 2015- С.32-35.

59. Друзьянова В.П. Обоснование параметров перемешивающего устройства в биогазовой установке для малых животноводческих хозяйств [Текст] / В.П.Друзьянова, Е.Н.Кобякова // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р.Филиппова.-2014.-№4(49).- С.13-19.

60. Дубровский В.С. Анаэробная переработка навозных стоков на свиноводческих комплексах с получение биогаза. /В.С. Дубровский /Автореф. дисс. на соиск. учен.степен. канд. техн. наук. / Латв с/х акад. Елгава, 1987, 18 с., ил. – Библиогр.: 16 назв.

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

62. Дубровский В.С. Переработка свинонавозной жижи в анаэробных условиях в совхозе «ОРГЕ». /В.С Дубровский. – PadomjnLatvijasLauksaimnieciba, 1985, №5, С. 23-24. – Латыш.

63. Дурдыбаев С.Д. Опыт производства и использования биогаза / Энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 2-ой международной научно-практической конференции (3-5 октября 2000 года, Москва – ВИЭСХ). К 70-летию ВИЭСХ, часть 2./С.Д. Дурдыбаев, Я. Йонаш – М.: ВИЭСХ, 2000. – 544 с.

64. Ермоленко В. Технология подготовки навозных стоков к использованию. Свиноводство./ В. Ермоленко, Н. Нарышкин, Линник, И. Шкодкин – 1989, №2. – С. 33-35.
65. Евтеев В.К. Оценка биогаза как топлива // Пути повышения эффективности электротепловых процессов в сельскохозяйственном производстве Восточной Сибири: Сб. научных трудов. / В.К. Евтеев – Иркутск: ИСХИ, 1989. – С. 36-40.
66. Евтеев В.К., Имитационное моделирование энерговыделения при анаэробном сбраживании птичьего помета // Пути повышения эффективности электротепловых процессов в сельскохозяйственном производстве Восточной Сибири: Сб. научных трудов. /В.К. Евтеев, В.Ю. Просвирин – Иркутск: ИСХИ, 1989. – С. 40-48.
67. Ермоленков А. Показатели работы биоэнергетической установки /А. Ермоленков, В.Н. Павличенко, Г.Е. Мовселов, В.К. Маслич / Мех.и ил. с/хоз-ва. – 1987. - №11. – С.62-63.
68. Жданов Л.А. Исследование по интенсификации процесса биологической очистки сточных вод животноводческих комплексов: Автореф. дисс. на соиск. учен.степен. канд. техн. наук. / Л.А. Жданов– Л., 1978. – 24 с., табл.
69. Захарченко, А.Н. Роль биогазовой технологии в современных системах ведения сельского хозяйства [Текст] / А.Н.Захарченко, А.И.Руфаи // Вестник: Техника и технологии агропромышленного комплекса.-2005.- Вып.4(14).- С.39-41.
70. Зацепин С.С. Влияние различных способов предобработки навоза КРС на интенсивность его метанового сбраживания / Тезисы докладов совещания. «Биогаз-87»./ С.С. Зацепин, В.И. Скляр, С.В. Калюжный, С.Д. Варфоломеев, Пузанков А.Г. – Рига, 1987. – с. 47.
71. Зуев В.А. Зависимость pH навоза от внешних факторов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. /В.А. Зуев, П.И. Гриднев – 1979, №11, С. 45-46.

72. Зуев В.А. и др. Устройство для анаэробного сбраживания органической массы: А.С. № 785231 (СССР) Опубл. в Б.И.; 45. 1980,В.А. Зуев .
73. Иванов П.И. Метод оценки составляющих энергетического баланса при культивировании микроорганизмов в лабораторных биореакторах // Известие АН Латв. ССР./ П.И. Иванов, У.Э. Виестур, Ю.Э. Швинка Л.А. Бабурин – 1984, №3, С. 91-95.
74. Иммобилизованные клетки и ферменты. Методы под ред. Д.Вудворда. – М., 1988. – 215 с.
75. Калюжный С.В. Биогаз: проблемы и решения // Биотехнология т. 21. / С.В. Калюжный, А.Е. Пузанков, С.Д. Варфоломеев – М., 1988. – 180 с.
76. Кадарков В.В. Основы массопередачи. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учеб.пособие для вузов / В.В. Кадарков – М.: Высшая школа, 1972. – 496 с.
77. Селов К. Получение биогаза из птичьего помета при различных влажностях субстрата // Тезисы докладов вещания Биогаз-87./ К. Селов, М.Г. Чопанов – Рига, 1987. – 60с.
78. Ковалев А.А. Установка для биогаза // Сельский механизатор./А.А. Ковалев– 1986, №8, С.39-41.
79. Ковалев А.А. Использование отходов животноводства для получения биогаза //Научн. труды ВИЭСХ. т.64. Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственной производстве. / А.А. Ковалев, П.И. Гриднев – М., 1985, С 107-114.
80. Ковалев А.А. Научные основы построения и расчета технологических линий производства биогаза / А.А.Ковалёв // Энергетика и электромеханизация сельского хозяйства (Научные труды, т.84). М.: ВИЭСХ, 2000. – 328 с.

81. Ковалев А.А. Результаты исследований экспериментальной биогазовой установки / А.А Ковалев, В.П. Лосяков // Мех.и эл. с/хоз-ва.– 1987, №11, С. 60-62.
82. Ковалев А.А. Эффективность производства биогаза на животноводческих фермах / А.А. Ковалев // Техника в сельском хозяйстве, 2001, /№3, С. 29-33.
83. Ковалёв Д.А. Совершенствование технологии очитски навозных стоков свинокомплексов: Автореф. дисс. на соиск. учен.степен. канд. технич. наук./ Д.А.Ковалёв – М., 2004. 20 с. - /ГНУ ВИЭСХ/.
84. Ковалев Н.Г. Проектирование систем утилизации навоза на комплексах / Н.Г. Ковалев, И.К. Глазков – М.: Агропромиздат, 1989. – 160 с., ил.
85. Коршунов А.П. Методические основы экономической оценки возобновляемых источников энергии /А.П. Коршунов // Техника в сельском хозяйстве.– 1994, №1 С. 5-8.
86. Ласков В.Г. Тепловой баланс процесса анаэробной переработки овечьего навоза / В.Г. Ласков // Промышленная технология овцеводства.– Ставрополь, 1985. С. 124-128
87. Лауринавичюс. В.А. Иммобилизация ферментов на носителях, активированных ионами металлов: Аавореф. дисс. на соиск. учен.степ. канд. биолог. наук /03.06.04/ В.А. Лауринавичюс. - Минск, 1978, 22 с., граф.
88. Левчикова М.В. Технико-экономическая оценка сезонных режимов работы биоэнергетических установок / М.В. Левчикова, Г.О. Кулиева //Науч. тр. ВИЭСХа, 1985, т. 64, С. 119-124.
89. Лосяков В.П. Устройство и режимы работы экспериментального газгольдера /для хранения биогаза/ В.П. Лосяков //Науч.-техн. бюллетень по электрификации сельск. хоз-ва. Вып 2(54) 1985. – С. 83-85.

90. Лосяков В.П. Экспериментальные исследования обеззараживания навоза термофильным брожением/В.П. Лосяков // Науч.-техн. бюллетень по электрификации сел.хоз-ва. Вып. 1. 1972. – С. 49-53.
91. Малыхин, В.В. Математическое моделирование [Текст]: учеб.пособие/ В.В.Малых.- Москва: Изд-во УРАО, 1998.-160с.
92. Марченко В.И. Фактор интенсификации процесса анаэробного сбраживания помета: Тезисы докладов республ. конференции. / В.И. Марченко – Кишинев, 1988. С. 48-52.
93. Материал для изготовления биологического фильтра: США, Пат. №4221657. Опубл. 09.09.1980.
94. Мельник Р.А. Исследование химико-технологических основ интенсификации процесса метанового сбраживания / Р.А. Мельник, И.И. Евдокименко, В.И. Бородин, А.Г. Пузанков // Тезисы докладов конференции «Исследование, проектирование строительства систем сооружений метанового сбраживания навоза». – Таллин, 1982. С. 52-56.
95. Мельник Р.А. Биогазовые технологии – экология, энергетика, агрохимия, рентабельность и эффективность/ Р.А. Мельник, И.И. Евдокименко, В.И. Бородин, А.Г. Пузанков /Энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 2-й международной научн.-практ. конференции (3-5 октября 2000 года, Москва – ВИЭСХ). к 70-летию ВИЭСХ часть 2.– М.: ВИЭСХ, 2000, 544 с.
96. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов /С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Колос, 1980, - 168 с. ил.
97. Методика определения оптимальной дозы загрузки метантенка /Ковалев А.А., Гриднев П.И., Шрамков В.И., Лосяков В.П. // Научно-техн. бюллетень по электрификации сел.хоз-ва, ВИЭСХ. Вып. 2(43), С. 58-61.

98. Миндубаев А.З. Метаногенез: биохимия, технология, применение/ А. З. Миндубаев, Д. Е.Белостоцкий, С. Т. Минзанова и др. // Учен. за п. КГУ, Сер. естест. н. – 2010. – Т. 152. – Кн. 2. – С. 178-191.
99. Налимов В.В. Теория эксперимента. /В.В Налимов – М.: Наука, 1971, - 207 с.
100. Некрасов В.Г. Выбор оптимальной конструкции биогазовых реакторов /В.Г. Некрасов /Мех.и электр. сельск. хоз-ва. 1987, №11, С. 57-59.
101. Ножевникова А.Н. Поиски микробиологических путей интенсификации процесса метаногенеза на отходах животноводства / А.Н. Ножевникова, Р.А. Мельник, Т.Г. Ягодина. // Биология термофильных микроорганизмов. –Москва, 1986. – С. 244-248.
102. Ножевникова А.Н. Метаногенные микробные сообщества в охране окружающей среды: автореферат дисс. доктора биологических наук 03.00.07 / Рос.академия наук. Ин-т микробиологии.-Москва, 1994.-83с.: ил. РГБ ОД, 994-1/2097-4.
103. Оловянников В.И. Вращающийся биофильтр: СССР. А.С. №1432014. Опубл. в бюлл. №39 23.10.1988/ В.И.Оловянников.
104. Осмонов О.М. Технико-экономическая оценка биогазовых установок [Текст]/О.М. Осмонов, А.А.Ковалёв // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 5-ой Междунар. научн.-техн. конф., (16-17 мая 2006 г., г.Москва, ГНУ ВИЭСХ): в 5 ч. Ч. 2. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2006.- С.267-272.
105. Осмонов О.М. Экономическая оценка использования биоэнергетической установки [Текст]/ О.М.Осмонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2012.-№1.-С.32.
106. О составе и свойствах навоза, получаемого на свинокомплексах / Ковалев Н., Матяш И., Смирнов П. и др. // Свиноводство, 1981, №10, С. 3-33.

107. Органические удобрения в интенсивность земледелии / Под ред. В.Г. Минеева. – М.: Колос, 1984. – 303 с.
108. Остроумов С.А. Введение в биохимическую экологию. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 176с.
109. Палкин Г.Г. Безотходная утилизация свиного навоза /Г.Г. Палкин, И.Е. Волков / Степные просторы, 1987, №6, С. 45-46.
110. Панин В.И. Справочник по теплотехнике в сельск. хоз-ве. / В.И. Панин – М.: Россельхозиздат , 1979. – 333 с.
111. Панцхава Е.С. Биоконверсия солнечной энергии в газообразное топливо (биогаз) при термальных условиях /Е.С. Панцхава // Биология термофильных микроорганизмов. /– М., 1986. С. 74-87.
112. Панцхава Е.С. Твердофазная метаногенерация высококонцентрированных отходов сельскохозяйственного производства и городов: Тезисы докладов республиканской конференции. /Е.С. Панцхава – Кишинев, 1988, С. 5-9.
113. Передня В.И. Определение влажности навозной смеси //Механизация и электрификация сельск. хоз-ва. /В.И. Передняя, С.П. Захаревич – Минск. – 1979. – Вып. 22. – С. 137-140.
114. Переработка жидкого навоза в метантенках / Ковалев Н., Дурдыбаев С, Ионаш Я. //Свиноводство. – 1985, №6. С. 22-23.
115. Переработка жидкого навоза в вермикомпост и кормовые добавки (Великобритания) // Э.И. НПО в агропром. производстве. Сер. 2. Земледелие, растениеводство, плодоовощное хозяйство, защита растений. Вып 1. – 1989. 15с.
116. Повышение эффективности анаэробной переработки навоза / Р.А. Мельник, В.И. Бородин, А.Г. Пузанков и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985, №11. С. 6-8.
117. Полякова Е.Я. Анаэробное сбраживание осадка свиного навоза / Е.Я. Полякова, В.Н. Павличенко, И.И. Кузьменко – Докл. ВАСХНИЛ, 1981, №3. С. 31-33.

118. Просвирнин В.Ю. Ресурсосберегающая природоохранная технология утилизации птичьего помета. Автореф. дис. канд. техн. наук. / В.Ю. Просвирнин – Иркутск, 1991. – 194 с.
119. Пузанков А.Г. Метод биологической обработки сельскохозяйственных отходов /А.Г. Пузанков / Мех и эл. сельского хоз-ва. – 1987. №11.
120. Пузанков А.Г Обеззараживание стоков животноводческих комплексов. / А.Г. Пузанков, Г.А. Мхитарян, И.Д. Гришаев – М.: Агропромиздат, 1986. – 175 с., ил.
121. Рудик В.Ф. Анаэробная биоконверсия отходов животноводства: Тезисы докладов республиканской конференции./В.Ф. Рудик, С.П. Ротару – Кишинев, 1988. – С. 25-26.
122. Руководящий документ. Испытание сельскохозяйственной техники. Установки для метанового сбраживания навоза. Программа и методы испытаний. РД. 10.20.1-87. – 1987. – 217 с.
123. Рухленко А.П. Расчет влажности навоза при гидросмыве. – В кн.: Механизация сельскохозяйственного производства в Сев. Зауралье. / А.П. Рухленко – Новосибирск. - 1984. С. 98-100.
124. Сельское хозяйство РБ. Статистический сборник, №10-07-16. Бурятстат –Улан-Удэ 2005. – 157 с.
125. Сидоренко О.Д. Биологические технологии утилизации отходов животноводства. /О.Д. Сидоренко, Е.В. Церданцев – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 75 с.
126. Синицын А.П. Иммобилизованные клетки микроорганизмов. / А.П. Синицын, Е.И. Райнина, В.И. Лозинский, С.Д. Спасов – М.: Издательство МГУ, МГУ, 1994. – 288 с.
127. Справочник инженера - механика сельскохозяйственного производства. – М.: Информагротехник, 1995. – 576 с.
128. Статистическое моделирование и прогнозирование: Учеб.пос. / Под ред. А.Н. Гранберга. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 383 с., ил.

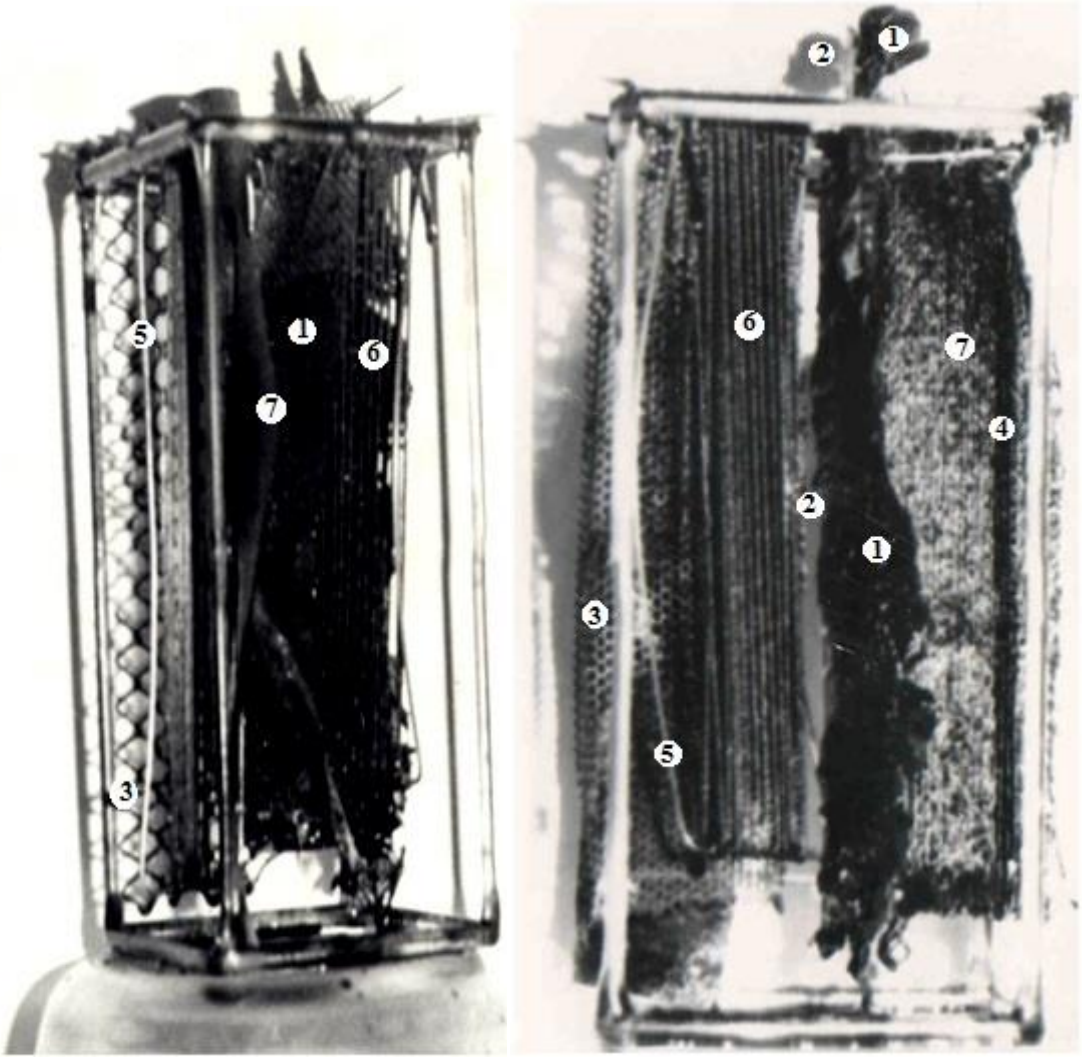
129. Статистический сборник «Охрана окружающей среды в Республике Бурятия в 2004 году» Сборник №06-02-08 / Бурятстат. – Улан-Удэ, 2005. – 58с.
130. Степанова В.Э. Возобновляемые источники энергии на сельскохозяйственных предприятиях. /В.Э. Степанова – М.: Агропромиздат, 1989. – 112 с., ил.
131. Тайшин В.А. Проблемы энергообеспечения животноводства Восточной Сибири [Анаэробная переработка отходов животноводства в биогаз и удобрение]. // Энергообеспечение и энергосбережение в сел.хоз-ве. /В.А. Тайшин, Ю.Ц. Бадмаев, А.А. Ковалев – М., 2003. ч. 1. – С. 197-200.
132. Тайшин В.А. Проблемы энергообеспения в номадном животноводстве / Народы Центральной Азии в XXI веке: Материалы междунар. научн.-практ. конференции. Улан-Удэ-Улаан-Баатор, 2002./ В.А. Тайшин, Ю.Ц. Бадмаев, В.Г. Содномбалов – С. 117-123.
133. Тайшин В.А. Проблемы энергообеспечения в животноводстве / Ежемесяч. информац. бюлл. МСХ и П Респ. Бурятия, №12, дек. 2002. /В.А. Тайшин, Ю.Ц. Бадмаев, В.Г. Соднамбалов – С. 39-40.
134. Тайшин В.А. Разработка системы энергосамообеспечения на основе высокоэффективной анаэробной переработки органических отходов животноводства в условиях Сибири // Каталог научно-технических разработок и инновационных проектов Республики Бурятия. / В.А. Тайшин, Ю.Ц. Бадмаев. – Изд-во «Бэлиг» - Улан-Удэ, 2004. С. 85.
135. Тайшин В.А. Разработка технологии производства высокоэффективных и экологически безопасных органических удобрений и кормовых добавок с заданными свойствами. /В.А. Тайшин, Ю.Ц. Бадмаев // Каталог научно-технических разработок и инновационных проектов Республики Бурятия. – Изд-во «Бэлиг» - Улан-Удэ, 2004. с. 60.

136. Тривен М. Д. Иммобилизованные ферменты: Вводный курс и применение в биотехнологии / Пер с англ. Е.Б. Майзеля: Под ред. И.Б. Березина./ М. Д. Тривен – М.: Мир, 1983. – 213 с., ил. 20 см.
137. Установка для анаэробной обработки отходов: США Пат. №4372856. Опубл. 08.02.1983.
138. Устройство для получения биогаза из селькохозяйственных отходов: Австрия Пат №369782. Опубл. 25.01.1983.
139. Шрамков В.И. Устройство для анаэробного сбражинваия органической массы: СССР а.с. №966039. / В.И. Шрамков, А.И. Гриднев, А.А. Ковалев, В.П. Лосяков / Опубл. в БИ №38. 1982.
140. Федеральный закон «Об охране озера Байкал» // Официальный вестник Госкомэкологии России, № 10, М.: 1999.
141. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» // Официальный вестник Госкомэкологии России, № 1-2. М.: 1999.
142. Яковлев С.В. Биологические фильтры 2-е изд., перераб. и доп. / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов – М.: Стройиздат., 1982. – 120 с., ил. – (Охрана окруж. среды).
143. KirschE.J.,SykesR.M. AnaerobicdigestioninbiologicalWastetreatment. Progr. Jnd. Microbiol. 9,1971, S. 155-236.
144. KotzeJ.F.,Thid P.G., Hatting W.H.J. Anaerobic digestion II. The characteristics and control of anaerobic digestion. Water research, 3(7), 1969, S. 459-493.
145. Ljunggren H., Petre F. Metangas from stallningens Microbiologi rapport fr. Institution for Microbiologic, Nr. 7, Uppsala, 1976.

Приложение А

Анаэробный биофильтр с исследуемыми макроносителями:

1 - стеклоткань, 2 -ткань (пенька армированная полиэтиленом), 3 - сетка металлическая, 4 - флизелин, 5 -леска капроновая, 6 – шнур капроновый, 7 - сетка полихлорвиниловая

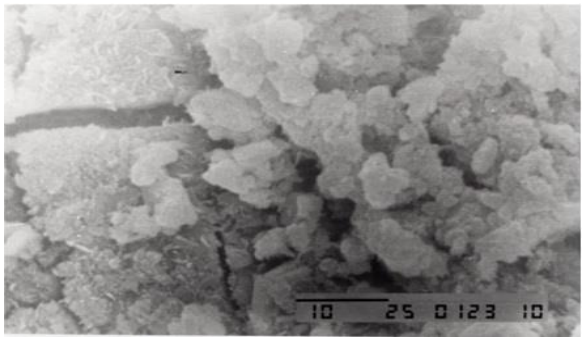


Вид А **Вид Б**

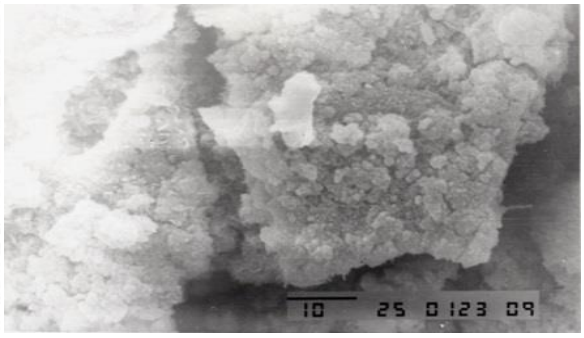
Приложение Б

Электронно-сканированная микроскопия

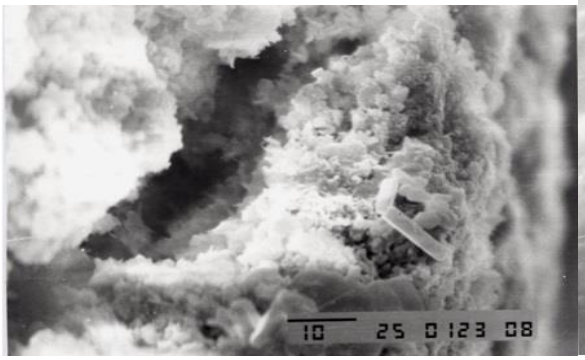
накопления метанообразующих микроорганизмов на поверхностях исследуемых носителей анаэробного биофильтра



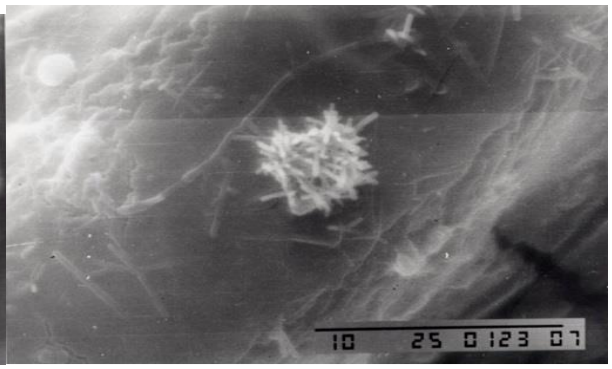
А) Стеклоткань



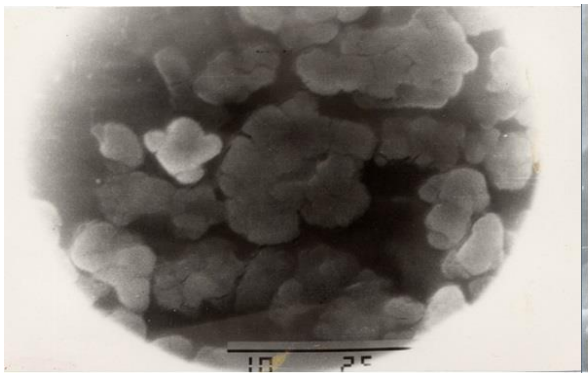
Б) Ткань - пенька армированная полиэтиленом



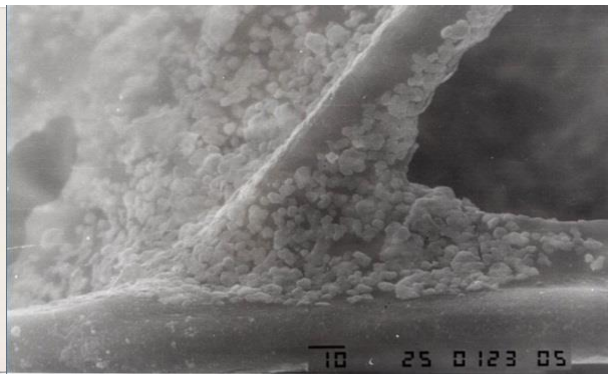
В) Сетка металлическая



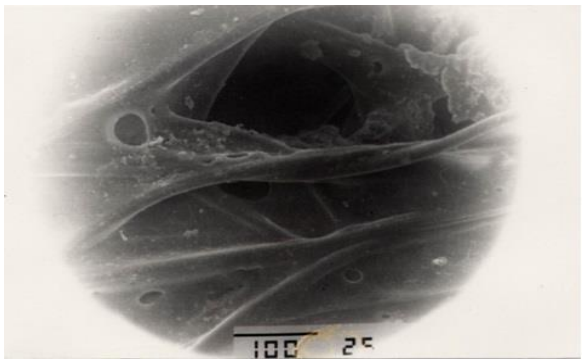
Г) Флизелин



Д) Леска капроновая



Е) Шнур капроновый



Ж) Сетка полихлорвиниловая

Приложение В

СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ

ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1599319

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Аппарат для анаэробного сбраживания органических отходов животноводства, пищевой промышленности и городских стоков"

Автор (авторы): Бадмаев Юрий Цырендоржиевич, Крюков Виктор Романович и Ковалев Александр Андреевич

Заявитель: ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Заявка № 4472386 Приоритет изобретения 21 июня 1988г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

15 июня 1990г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза СССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

к авторскому свидетельству № 1599319

СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

(19) SU (11) 1599319 A1

(51)5 C 02 F 3/28, 11/04

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ ПРИ ГКНТ СССР

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1

(21) 4472386/23-26
(22) 21.06.88
(46) 15.10.90. Бюл. № 38
(71) Всесоюзный научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства
(72) Ю.Ц. Бадмаев, В.Р. Крюков и А.А. Ковалёв
(53) 628.336(088.8)
(56) Заявка Великобритании № 2073166, кл. C 02 F 3/28, 1981.

(54) АППАРАТ ДЛЯ АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА, ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ГОРОДСКИХ СТОКОВ

(57) Изобретение относится к анаэробной биологической очистке сточных вод методом анаэробной биофильтрации. Целью изобретения является повышение эффективности процесса метаногенеза за счет интенсификации перемешивания фаз. Лопасти-мешалки выполнены в виде жесткого каркаса с натянутым на него сетчатым биологически стойким материалом, который имеет развитую ворсистую поверхность (многослойная капроновая сеть), пригодную для иммобилизации микроорганизмов, осуществляющих процесс метаногенеза. Изобретение дает возможность уменьшить тепловые потери, затраты энергии на перемешивание и габариты аппарата, а также обеспечить более полную минерализацию исходного субстрата. 3 ил.

2

Изобретение относится к анаэробной биологической очистке сточных вод методом анаэробной биофильтрации и может быть использовано в технологии утилизации жидких отходов животноводства, пищевой промышленности и городских стоков.

Цель изобретения - повышение эффективности процесса метаногенеза за счет интенсификации перемешивания фаз.

На фиг. 1 изображен аппарат для анаэробного сбраживания, продольный разрез; на фиг. 2 - разрез А-А на фиг. 1; на фиг. 3 - лопасти биофильтра, аксонометрическая проекция.

Аппарат для скоростного анаэробного сбраживания органических отходов (фиг. 1) представляет цилиндрический корпус (реактор) 1, высота которого равна диаметру, имеет конусное дно. Данная форма обеспечивает накопление активного ила на дне аппарата. Корпус имеет теплоизоляционную прослойку 2. Внутри реактора 1 расположено иммобилизационное устройство 3. Структурным элементом устройства 3 является лопасть 4. Лопасть 4 представляет собой натянутую на жесткий каркас 5 капроновую сеть 6 с ячейкой 20x20 мм и диаметром 3-4 мм (линии морские капроновые ГОСТ 25574-83). Устройство 3 вращается вокруг своей оси на валу 7 с помощью выталкивающей силы образующегося биогаза, ко-

(19) SU (11) 1599319 A1

Продолжение описания изобретения к авторскому свидетельству № 1599319

торый скапливается в емкости 8, выполненной из полимерного материала. В дно корпуса введен штуцер 9 для принудительной подачи газа (биогаза) в рабочую емкость 8 лопастей. Принудительная подача биогаза осуществляется компрессором 10. В днище корпуса 1 имеется вентиль 11 для слива осадка с активным илом и для отбора части ила в системе рециркуляции. Труба 12 служит для отвода образующегося биогаза, труба 13 - для подачи исходной массы и ввода активного ила (система рециркуляции), труба 14 - для удаления сброженного субстрата, зубья 15 - для разрушения корки на поверхности сбраживаемой массы.

Устройство работает следующим образом.

Реактор 1 заполняется через трубу 13 жидкой фракцией из навоза крупного рогатого скота до полного погружения иммобилизационного устройства 3. Далее реактор продувается азотом или углекислым газом через штуцер 9 для создания анаэробных условий. Для ускорения процесса метаногенеза в сбраживаемую жидкость можно внести специальные закваски метаногенных сообществ микроорганизмов или активный ил метантенков.

Развитие метаногенной микрофлоры внутри реактора контролируется по выделению биогаза. После формирования и закрепления ассоциаций метаногенных сообществ на поверхности иммобилизационного устройства в реактор подается основной сбраживаемый субстрат.

Первоначально медленное перемешивание лопастей 4 обеспечивается принудительной подачей газа (N_2, CO_2 или биогаза) через штуцер 9. Далее по мере адаптации метаногенного сообщества к сбраживаемому субстрату и развития мощной биопленки на поверхности иммобилизационного устройства 3 осуществляется высокоэффективное сбраживание. Увеличение скорости метаногенеза приводит к более интенсивному перемешиванию без принудительной подачи газа.

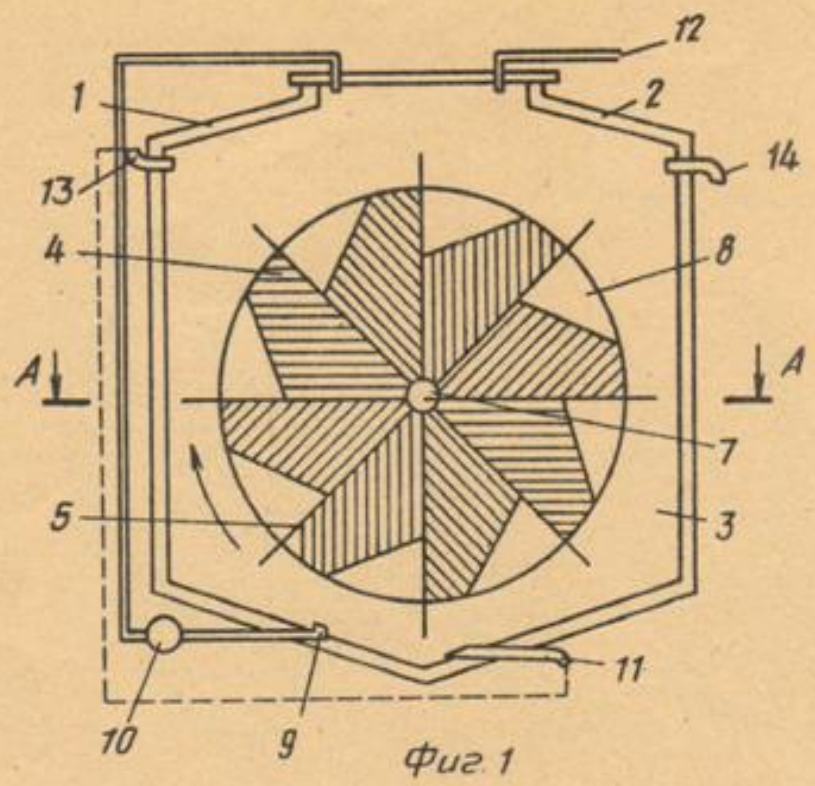
Изобретение обеспечивает накопление активной биомассы метаногенных ассоциаций на поверхности лопастей в виде биопленки. Биопленка имеет высокую удельную поверхность контакта с субстратом, что интенсифицирует процесс анаэробного сбраживания и увеличивает выход биогаза с единицы рабочего объема реактора. Закрепленная на поверхности лопастей метаногенная ассоциация характеризуется устойчивостью к вымыванию и различным физиологическим стрессам. Аппарат дает возможность сэкономить тепловые потери за счет предлагаемой формы реактора, снизить энергозатраты на перемешивание, уменьшить габариты аппарата за счет увеличения скорости метаногенеза, обеспечить более полную минерализацию исходного субстрата. Постоянное перемещение лопастей с иммобилизационными микроорганизмами обеспечивает десорбцию избыточной бактериальной массы с их поверхностей, что приводит к накоплению осадка метаногенных ассоциаций в нижней части устройства. Осадок используют для активизации процесса деструкции свежего субстрата в системе рециркуляции, что также увеличивает выход биогаза с единицы рабочего объема.

Формула изобретения

Аппарат для анаэробного сбраживания органических отходов животноводства, пищевой промышленности и городских стоков, содержащий корпус, трубы подачи исходного осадка и вывода биогаза и сброженного продукта, перемешивающее устройство с лопастями, *отличающийся* тем, что, с целью повышения эффективности процесса метаногенеза за счет интенсификации перемешивания фаз и минерализации осадка, лопасти выполнены из жесткого каркаса и закрепленной на нем капроновой сети и снабжены зубьями для разрушения поверхностной корки, при этом корпус выполнен с коническим днищем и снабжен штуцером подачи биогаза, сообщенным с трубой отвода биогаза, и системой рециркуляции активного ила.

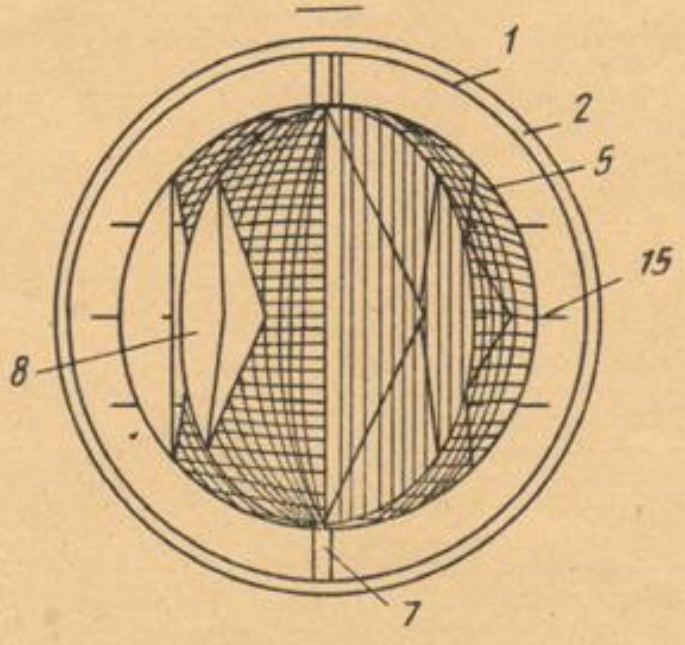
Продолжение описания изобретения к авторскому свидетельству № 1599319

1599319



Фиг. 1

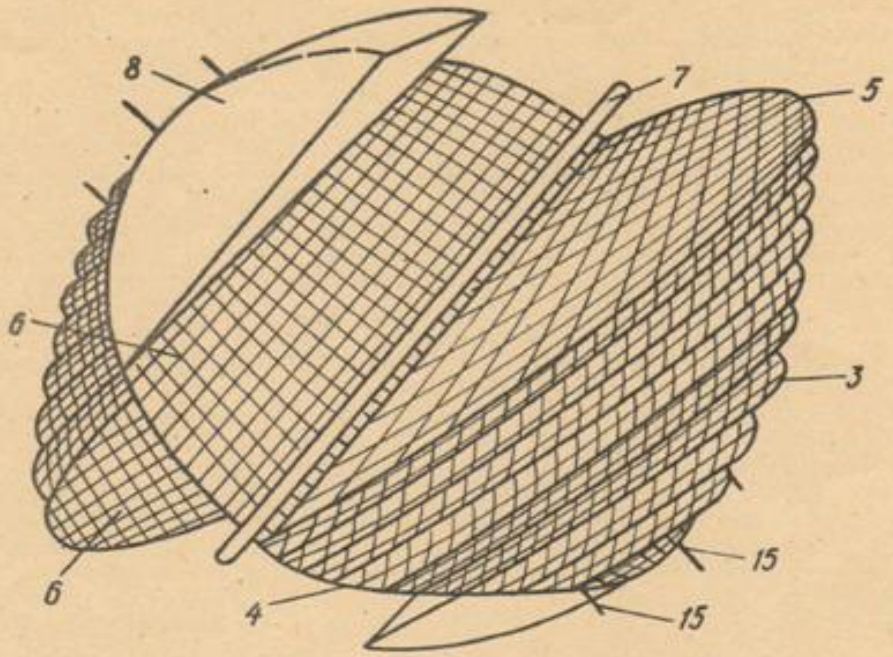
А - А



Фиг. 2

Продолжение описания изобретения к авторскому свидетельству № 1599319

1599319



Фиг.3

Составитель Л. Суханова
Редактор Н. Киитулинец Техред Л.Сердюкова Корректор Л. Пожо

Заказ 3117 Тираж 800 Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР
113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101

Приложение Г

«Буряад Республикын
«Сэлэнгын аймагай» гэhэн муниципальна
байгууламжын
Захиргаан

Администрация
муниципального образования
«Селенгинский район»
Республики Бурятия

671160, Республики Бурятия,
Селенгинский район, г. Гусиноозерск,
ул. Пушкина, д. 12,
тел. (30145) 42-3-79, факс 41-2-87
http://admselenga.ru
E-mail: admsel@icm.buryatia.ru

20.09. 20 17 № 01.04-01-1269
На №_____от «__»_____20 г.

АКТ-СПРАВКА

на практическое внедрение результатов научно-исследовательской работы старшего преподавателя Бурятской ГСХА имени В.Р.Филиппова Бадмаева Юрия Цырендоржиевича

Селенгинский район Республики Бурятии расположен в природоохранной зоне дельты реки Селенга и бассейна Гусиного озера Байкальской природной территории, к которому предъявляют особые экологические требования в ведении сельскохозяйственной деятельности. В связи с этим, в период с 2001 года по 2017 год Бадмаев Ю.Ц. ведёт целенаправленную и активную работу по совершенствованию и внедрению экологобезопасной технологии анаэробной переработки навоза и навозных стоков животноводства в частности СПК и фермерских хозяйствах района.

Результаты практического применения исследований Ю.Ц.Бадмаева по использованию биотоплива-газа для энергообеспечения автономных потребителей в отдалённых хозяйствах вносит значительный вклад в решении энергетических и экологических проблем АПК Селенгинского района РБ. И, в настоящее время, две биоэнергетические установки с объёмом метантенков 1,0 куб.м установлены и действуют в ООО СПК «Тамча» и фермерском хозяйстве «Мункуев».

За многолетний и добросовестный труд в системе агропромышленного комплекса и активное участие в общественной жизни трудового коллектива и в связи с днём работников АПК РФ Бадмаев Ю.Ц. награждён Почётной грамотой Республиканского комитета профсоюза работников агропромышленного комплекса Республики Бурятия.

Первый заместитель главы
МО «Селенгинский район» С.Д.Гармаев

Приложение Д

Общество с ограниченной ответственностью
СПК «Тамча» Селенгинского района Республики Бурятия
(ООО «Тамча»)

671294 с.Гусиное Озеро, ул. Ранжурова, 10 ☎ +79025648050 Факс +79833398994 E-mail arkmynkyev@tamcha.ru

от 25 декабря 2015 года

АКТ – СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящей акт-справкой удостоверяем, что результаты теоретических и экспериментальных исследований старшего преподавателя ФГБОУ ВО Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р.Филиппова Бадмаева Юрия Цырендоржиевича по разработке технологий и технических средств для анаэробной переработки органических отходов животноводства внедрены в ООО СПК «Тамча» Селенгинского района РБ.

Результаты исследований были использованы при разработке проектно-технической документации биоэнергетических установок для анаэробной переработки навозных стоков свиней в сельскохозяйственном производственном кооперативе «Тамча» и в создании модульной 2-х ступенчатой малогабаритной установки с общим объёмом метантенков 2,5 куб.м в местности «Нариин-Горьхон» с отсутствием централизованного электроснабжения.

Положительные результаты практического применения исследований Бадмаева Ю.Ц. по использованию биогаза для электрообеспечения локальных потребителей в отдалённых местностях вносят значительный вклад в решении энергетических и экологических проблем в сельскохозяйственном производстве СПК и могут быть рекомендованы для широкого внедрения в Республике Бурятии.

Директор ООО СПК «Тамча»
Селенгинского района Республики Бурятия _____ Мункуев А.Р.

Приложение Е

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БУРЯТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ ИМЕНИ В.Р.ФИЛИППОВА»

исх. № 01-1030
"14" июня 2018 г.

670024, г. Улан - Удэ, ул. Пушкина, 8
☎ тел. 44 – 21-33
Факс (301-2) 44-21-33
E-mail bgsha@bgsha.ru

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы старшего преподавателя Бадмаева Юрия Цырендоржиевича в учебный процесс кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» инженерного факультета ФГБОУ ВО «Бурятской ГСХА имени В.Р.Филиппова»

Настоящей справкой удостоверяем, что результаты научно-исследовательской работы «Совершенствование технологии анаэробной переработки навозных стоков свиноводства в условиях Республики Бурятия» старшего преподавателя Бадмаева Ю.Ц. используются в учебном процессе на кафедре «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» для проведения лекционных и лабораторно-практических занятий с обучающимися по направлению подготовки «Агроинженерия», по дисциплинам «Техническая биоэнергетика» и «Возобновляемые источники энергии в сельском хозяйстве». Методика инженерного расчета технологической линии анаэробной переработки навоза и методика эксплуатации биоэнергетических установок используются при проектировании выпускной квалификационной работы с обучающимися инженерного факультета.

За многолетний добросовестный труд, большой вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов агропромышленного комплекса Республики Бурятия и в связи с 55-летием со дня образования инженерного факультета Бадмаев Ю.Ц. награждён Благодарственным письмом Народного Хурала Республики Бурятия.

Справка дана для предъявления в диссертационный совет Д 999.157.03 при ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный технологический университет технологий и управления»

Проректор по учебной работе
БГСХА к.б.н., доцент _____ Николаева Н.А.
Декан инженерного факультета
д. т.н., профессор _____ Лабаров Д.Б.
Заведующий кафедрой «ЭиАСХ»
к.т.н., доцент _____ Балданов М.Б.

Приложение Ж

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
ДЕПАРТАМЕНТ КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БУРЯТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ В.Р.ФИЛИППОВА»

исх. № 01-182
«14» февраля 2006г
670024, г. Улан - Удэ, ул. Пушкина, 8
тел. 44 – 26-11
Факс (301-2) 44-21-33
E-mail bgsha@bgsha.ru

«Утверждаю»
1ый проректор по учебной работе
БГСХА им. В.Р. Филиппова
д.в.н., профессор
_____ В.Д. Раднатаров

Акт
внедрения научной разработки кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» «Система высокоинтенсивной анаэробной переработки навоза в условиях Республики Бурятия» в учебный процесс на инженерном факультете БГСХА им. В.Р. Филиппова

Настоящий акт составлен в том, что результаты научной разработки профессора Ковалева А.А. и старшего преподавателя Бадмаева Ю.Ц. и макет Биоэнергетической установки с иммобилизационным устройством (анаэробный биофильтр), используются в учебном процессе на кафедре «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» для проведения лекционных, лабораторных и практических занятий со студентами специальностей: 311300 – Механизация сельского хозяйства», 311400 – «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», по дисциплинами «Механизация технологических процессов в животноводстве» и «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии в сельском хозяйстве». Методика расчета технологической линии переработки навоза и методика испытаний биогазовой установки используются при курсовом и дипломном проектировании студентами 4 и 5 курса инженерного факультета.

Декан инженерного факультета, и.о. профессора — **Ц.Ц. Дамбаев**

Зав.кафедрой «ЭАс/х», доцент — **Н.С. Хусаев**

Ст.преподаватель кафедры «ЭАс/х» — **Ю.Ц. Бадмаев**

Приложение К

Свинокомплекс Николаевский

Республика Бурятия *тел (246) 53-4-32*
Тарбагатайский район *факс (3012) 44-39-27*
Тарбагатайский район
Пос Николаевский

«Утверждаю»
Директор ЗАО «Свиноводческого комплекса «Николаевский» Республики Бурятия
_____Ширеторов А.А.

АКТ

от 12.01.2006 г.

внедрения научной разработки ГНУ Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства «Высокоинтенсивная технология анаэробной переработки свиного навоза в условиях Республики Бурятия».

Мы, нижеподписавшиеся гл. инженер Щепунов В.А., гл.зоотехник Цынгунов А.Н. и ведущий инженер Бадмаев Ю.Ц. составили настоящий акт о том, что научная разработка Бадмаева Юрия Цырендоржиевича принята к внедрению на ЗАО «Свиноводческом комплексе «Николаевский» Тарбагатайского района Республики Бурятия.

Принятие федерального закона «Об охране озера Байкал» накладывает серьезные экологические ограничения на хозяйственную деятельность свиноводческого комплекса, т.е. его расположение в природоохранной зоне предъявляют повышенные требования к проблеме переработки навозных стоков и вывозки их в места хранения.

Представленная технология характеризуется как ресурсосберегающей, природоохранной и экологически безопасной. Применение анаэробного биофильтра в биореакторе решает проблему переработки навозных стоков в высокоинтенсивном режиме и в более короткие сроки. Также данная технология позволяет получать энергию в виде биогаза, ценное высококачественное органическое удобрение и технически обеззараженную оборотную воду.

Экономический эффект от внедрения высокоинтенсивной технологии анаэробной переработки свиного навоза на ЗАО «Свиноводческом комплексе «Николаевский Республики Бурятия составил свыше 181750 руб./год с годовой программой 4000 свиней.

Главный инженер **Щепунов В.А.**

Главный зоотехник **Цынгунов А.М.**

Ведущий инженер **Бадмаев Ю.Ц.**

Приложение Л

Таблица П.Л.1 - Результаты моделирования энергетических характеристик биогазовой установки (БГУ) при накоплении метанообразующих микроорганизмов $X_{бм}$ = 0,033 кг/м^{2}на носителях анаэробного биофильтра

Площадь поверхности АБ, Fаб, м²	Энергетические характеристики, кДж		
	Энергосодержание АБ $Q_{аб}$	Энергия биогаза $Q_б$	Товарная энергия $Q_Т$
5	0,291	8,010	3,115
7	0,692	12,307	5,204
10	1,47	23,016	9,846
12	2,164	37,409	13,337
15	5,745	60,502	26,215
17	3,542	72,329	31,604
19	5,393	220,400	33,241
21	7,178	264,307	35,418
25	9,014	309,612	37,911
28	10,809	325,201	45,549
30	13,113	333,04	67,450
34	15,004	345,734	84,722
37	16,188	357,941	97,430
40	18,040	366,119	102,096
50	19,804	387,55	121,116
60	21,612	401,440	136,504

Таблица П.Л.2 - Результаты моделирования энергетических характеристик БГУ при накоплении метанообразующих микроорганизмов $X_{бм}$ = 0,077кг/м^2 на носителях анаэробного биофильтра

Площадь поверхности АБ, Fаб, м²	Энергетические характеристики БГУ, кДж		
	Энергосодержание АБ $Q_{аб}$	Энергия биогаза $Q_б$	Товарная энергия $Q_Т$
5	0,757	14,764	8,016
7	1,509	28,421	14,042
10	2,003	67,502	33,101
12	4,501	76,314	36,018
15	5,012	98,112	40,130
17	7,620	112,340	49,186
19	10,792	231,18	57,301
21	14,121	272,312	61,514
25	18,274	311,740	67,111
28	21,740	399,104	71,413
30	25,681	358,81	88,601
34	28,042	370,04	106,510
37	32,680	395,154	133,342
40	36,412	420,081	157,214
50	39,621	431,126	174,747
60	43,862	453,413	204,516

Таблица П.Л.3 - Результаты моделирования энергетических характеристик БГУ при накоплении метанообразующих микроорганизмов $X_{бм}$ = 0,12 кг/м^2 на носителях анаэробного биофильтра

Площадь поверхности АБ, Fаб, м²	Энергетические характеристики БГУ, кДж		
	Энергосодержание АБ $Q_{аб}$	Энергия биогаза $Q_б$	Товарная энергия $Q_Т$
5	1,514	25,602	12,031
7	2,916	51,314	23,159
10	5,521	99,901	48,506
12	8,945	124,520	52,079
15	11,640	159,712	69,504
17	14,209	145,640	62,213
19	21,150	251,108	91,707
21	28,735	286,203	103,608
25	36,901	325,556	112,414
28	43,312	369,908	120,340
30	50,486	388,612	130,120
34	57,304	413,720	148,214
37	64,813	429,105	155,904
40	72,504	455,214	188,115
50	79,967	477,612	215,007
60	86,016	504,042	248,604

Таблица П.Л.4 - Результаты моделирования энергетических характеристик БГУ при накоплении метанообразующих микроорганизмов $X_{бм}$ = 0,16 кг/м^2 на носителях анаэробного биофильтра

Площадь поверхности АБ, Fаб, м²	Энергетические характеристики БГУ, кДж		
	Энергосодержание АБ $Q_{аб}$	Энергия биогаза $Q_б$	Товарная энергия $Q_Т$
5	2,765	39,113	14,221
7	4,312	75,316	38,313
10	8,304	101,420	46,820
12	13,024	121,300	58,330
15	17,005	137,762	61,645
17	21,940	178,415	76,509
19	32,421	278,156	93,439
21	43,132	301,518	110,223
25	54,934	368,230	124,320
28	64,243	397,478	134,451
30	75,856	411,240	141,620
34	86,531	425,446	152,301
37	97,234	431,324	160,722
40	108,640	472,530	201,540
50	118,442	504,621	229,042
60	129,561	532,603	261,531

Таблица П.Л.5 - Результаты моделирования энергетических характеристик БГУ при накоплении метанообразующих микроорганизмов $X_{бм}$ = 0,21 кг/м^2 на носителях анаэробного биофильтра

Площадь поверхности АБ, Fаб, м²	Энергетические характеристики БГУ, кДж		
	Энергосодержание АБ $Q_{аб}$	Энергия биогаза $Q_б$	Товарная энергия $Q_Т$
5	2,304	58,672	26,345
7	5,940	78,326	31,214
10	11,156	99,800	42,341
12	17,630	125,421	53,420
15	24,110	146,930	71,112
17	28,721	211,531	91,002
19	43,006	301,405	100,906
21	57,234	363,330	118,318
25	72,620	388,504	130,421
28	86,729	409,307	148,633
30	100,002	423,473	159,424
34	116,545	458,212	188,634
37	129,230	470,708	209,315
40	144,123	501,337	234,651
50	158,944	529,847	248,118
60	172,250	554,119	267,213