На правах рукописи

БАДМАЕВ ЮРИЙ ЦЫРЕНДОРЖИЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДСТВА В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Улан-Удэ
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В. Р. Филиппова» (ФГБОУ ВО БГСХА им. В.Р. Филиппова)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ **Сергеев Юрий Антонович**

Официальные оппоненты: **Бондаренко Анатолий Михайлович,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Землеустройство и кадастры» Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»

Осмонов Орозмамат Мамасалиевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятия ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

Защита диссертации состоится «13» октября 2021 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.278.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук по адресу: 630501, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск-1, СФНЦА РАН, тел. (383) 348-46-36, e-mail: aspsibime@ngs. ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направить по указанному адресу диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале СибИМЭ СФНЦА РАН и на официальном сайте sfsca.ru.

Автореферат размещен на сайтах: www.vak.minobrnauki.gov.ru и sfsca.ru.

Автореферат разослан « » _____2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Н.Н. Назаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 процесса 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 Microsoft Office, 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 в 1 монографии, 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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дана краткая характеристика работы, определены цель и задачи исследований.

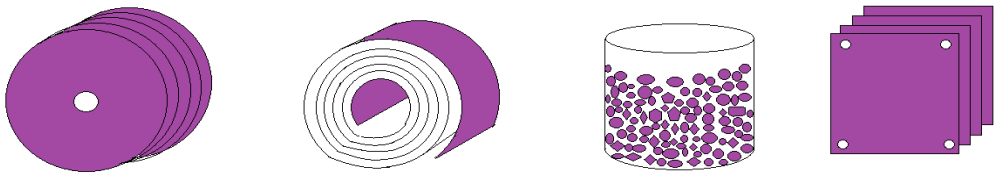
В первой главе проведен анализ образования органических отходов животноводства в условиях Республики Бурятия, пути и методов их переработки; рассмотрены основные направления существующих методов совершенствования процесса анаэробного сбраживания навоза и навозных стоков; даны конструктивные особенности метантенков; осуществлен аналитический обзор методов переработки органических стоков в метантенках с биофильтром.

Ежегодное образование органических отходов животноводства, по данным Госкомстата Реапублики Бурятия, составляет около 950 тыс. тонн, из них свиноводческие – более 320 тыс. тонн. Использование отстойников, биологических прудов и лагун, навозохранилищ и навозонакопителей ограничиваются особыми требованиями к природно-климатическим условиям Бурятии. Отсюда следует, что в данное время из наиболее перспективных направлений обеззараживания навозных стоков свиноферм является анаэробная переработка в биогазовых установках.

Одним из путей совершенствования процесса переработки навозных стоков в анаэробных условиях - это применение биофильтра, т.е. продление срока функционирования метанообразующих микроорганизмов в рабочей камере метантенка (рисунки 1 и 2).



Рисунок 1– Основные требования, характеристики и достоинства к анаэробным биофильтрам



а) дисковые б) рулонные в) засыпные г) блочные

Рисунок 2 - Конструктивные особенности жёстких анаэробных биофильтров.

Накопление метанообразующих микроорганизмов в метантенке позволит остановить процесс метанообразования на любой стадии и повторно применить биофильтр, что особенно важно при переработке навозных стоков. Это направление совершенствования процесса переработки высококонцентрированных навозных стоков, изучено недостаточно.

Во второй главе изложены результаты теоретических исследований совершенствования процесса переработки навозных стоков, разработаны динамическая и энергетическая модели биогазовой установки с биофильтром в метантенке.

Совершенствование переработки навозных стоков свиноферм направлена на накопление метанообразующих микроорганизмов в метантенке с биофильтром.

Динамическую модель функционирования метантенка с биофильтром *M (A)* представим в следующем виде (рисунок 3):

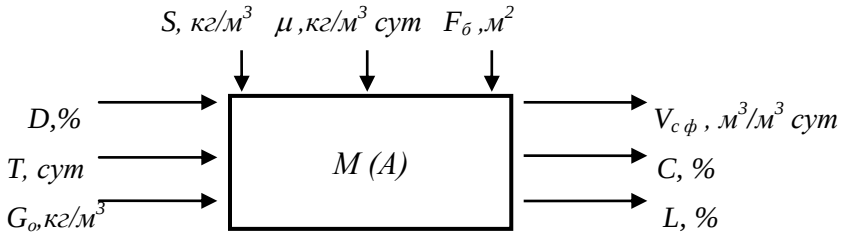


Рисунок 3 - Динамическая модель функционирования метантенка (М) с анаэробным биофильтром (А)

Входные параметры: доза *D (%),* периодичность загрузки *T(сут)* метантенка и содержание органического сухого вещества в навозном стоке G_o *(кг/м^3);* выходные параметры: скорость образования биогаза в метантенке с биофильтром $V_{сф}$*,(м^3/м^3 сут),* метаносодержание в биогазе *C (%)* и степень разложения органического вещества *L(%);* внутренние параметры: исходная концентрация органических веществ в субстрате *S(кг),* максимальная скорость роста микроорганизмов в заданном процессе ферментации μ *(кг/м^3 сут),* общая площадь поверхности носителя биофильтра $F_б$ *(м^2).*

Теоретической основой для построения математической модели процесса накопления метанообразующих микроорганизмов в биофильтрах явилась кинетическая модель Конто, которая применяется к более широкому классу органических стоков. Она описывает скорость образования биогаза V_C *(м^3/м^3 сут)* в зависимости от технологических параметров процесса переработки навозных стоков:

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

где $V_б$*(м^3/кг)* – предельный выход биогаза из органического вещества заданного состава при бесконечном времени экспозиции $\tau_ц$ *(сут);* S*(кг/м^3)* – исходная концентрация органического вещества в субстрате; μ *(кг/м^{3}сут)* – максимальная скорость роста микроорганизмов в заданном процессе переработки; k_S – кинетический параметр.

Скорость образования биогаза $V_{СФ}$ в метантенке с накопленной биомассой метанообразующих микроорганизмов в биофильтре определяем по выражению:

$$V_{СФ} = V_C + \Delta V, \qquad (2)$$

где V_C *(м^3/м^3 сут)* - скорость образования биогаза в традиционной биогазовой установке; ΔV*(м^3/м^3 сут)* – скорость образования биогаза в метантенке с биофильтром.

Отсюда следует, что ΔV может зависеть от следующих параметров:

$$\Delta V = f\,(X_{бм}, F_б, S, L, dS/d\tau_ц, \mu, \tau_ц \text{ и др.}), \qquad (3)$$

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

Тогда скорость образования биогаза в метантенке с биофильтром определяем, как:

$$\Delta V = X_{бм} \times K_б \times (\mu / S), \qquad (4)$$

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

Массу активных бактерий, накопленных на носителях лопастей биофильтра, определяем по выражению:

$$X_{бм} = F_б \times \delta \times \rho_б , \quad (6)$$

где $\delta(м/м^3)$ – накопление активной биомассы в биофильтре; $\rho_б\ (кг/м^3)$ - плотность биомассы.

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

$$F_б = F_л \times n_л = \pi\, d_ш \times l_ш \times n_л , \quad (7)$$

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 выражение (2) скорости образования биогаза с накопленной активной биомассой метанообразующих микроорганизмов в биофильтре примет вид:

$$V_{СФ} = B\frac{S}{\tau_ц}\left(1 - \frac{\kappa_S}{\mu\,\tau_ц - 1 + \kappa_S}\right) + [X_{бм} \times K_б \times (\mu / S)] \quad (8)$$

Таким образом, получим математическую модель процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях шарообразного биофильтра, характеризующуюся скоростью образования биогаза $V_{с.ф}\ (м^3/м^3\ сут)$, в следующем виде:

$$V_{СФ} = V_C + [X_{бм} \times K_б \times (\mu / S)] \quad (9)$$

По разработанной математической модели (9) и системного анализа процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях биофильтра разработана структурная модель технологии переработки навозных стоков в метантенке с биофильтром. Отсюда следует, что при накоплении метаногенной микрофлоры на носителях биофильтра, контролирующим параметром является скорость образования биогаза $V_{СФ}\ (м^3/сут)$ в единицу времени перерабатываемого сырья, который зависит от дозы загрузки метантенка $D\ (\%)$:

$$D = \frac{\rho_б \times V_{Сф}}{L \times \rho_Н \times G_О} 100^2 , \quad (10)$$

где $\rho_б, кг/м^3$ – плотность биогаза; L, % – степень разложения органического вещества; $G_о, кг/м^3\ сут$ – состав органического вещества; $\rho_Н, кг/м^3$ - плотность навозного стока.

Для оценки энергетической эффективности работы биогазовой установки *(БГУ)* с анаэробным биофильтром *(АБ)* проведен анализ тепловых потоков при переработке навозных стоков, который представлен в виде схемы (рисунок 4):

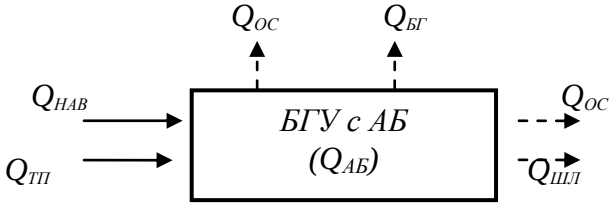


Рисунок 4 – Схема тепловых потоков биогазовой установки *(БГУ)* с анаэробным биофильтром *(АБ)*

Входную часть теплового баланса *БГУ* составляет количество энергии, заключенной в исходном навозном стоке $Q_{НАВ}$, энергия технологического процесса

метанообразования $Q_{ТП}$ и энергия активной биомассы, накопленной в анаэробном биофильтре (энергосодержание) $Q_{АБ}$, а выходная часть суммируется потерями энергии в окружающую среду через ограждающие поверхности метантенка $Q_{ОС}$, энергиями образующегося биогаза $Q_{БГ}$ и сброженного шлама $Q_{ШЛ}$ в следующем виде:

$$Q_{НАВ}+Q_{ТП}+Q_{АБ}=Q_{ОС}+Q_{БГ}+Q_{ШЛ}, \quad (11)$$

Одной из основных характеристик, определяющей товарность получаемого биогаза является энергосодержание биофильтра $Q_{АБ}$ *(МДж/м^3)*, зависящая от количества активной биомассы $X_{бм}$ *(кг/м^3)*, закрепленных на поверхностях носителей биофильтра и её 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:

$$Q_{АБ} = X_{бм} \times C_{б\,м} \times (T_{ТП} - T_{ОС}) \quad (12)$$

Эффективность получения биогаза возможна 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 представлен как:

$$Q_{VT} - \frac{Q_{ТП.} - Q_{АБ}}{\lambda} \geq 0, \quad (13)$$

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

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

$$\left.\begin{aligned} Q_{НАВ} &= G_Н \times C_Н \times (T_{ИН} - T_{ОС}) \\ Q_{ТП.} &= \frac{V_Н \times C_Н \times \rho_Н \times (T_{ТП} - T_{ИН})}{\eta} \\ Q_{АБ} &= X_{бм} \times C_{бм} \times (T_{ТП} - T_{ОС}) \\ Q_{ОС} &= \frac{k \times F_М \times \lambda_{ИЗ} \times (T_{ТП} - T_{ОС})}{\delta_{из} \times \tau_ц} \\ Q_{БГ} &= V_б \times C_б \times (T_{ТП} - T_{ОС}) \\ Q_{ШЛ} &= G_{ШЛ} \times C_{ШЛ} \times (T_{ТП} - T_{ОС}) \end{aligned}\right\}, \quad (14)$$

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

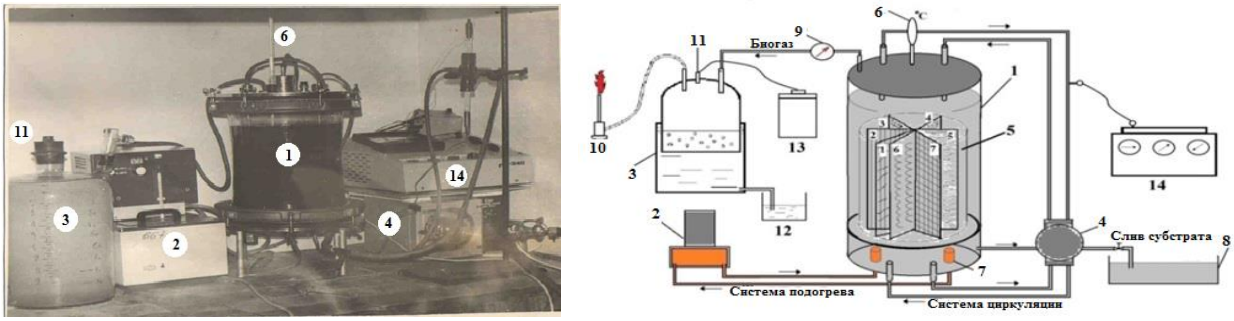
Математическая модель процесса накопления активной биомассы в анаэробном биофильтре ($У_4$) позволяет интенсифицировать процесс переработки навозных стоков, а по энергетической модели биогазовой установки определяем энергосодержание анаэробного биофильтра и эффективность производства биогаза на свинофермах.

В третьей главе приведены программа, методика и планирование экспериментальных исследований. 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.

Исследования проводили по следующей программе: 1 – исследования на лабораторной экспериментальной установке; 2 – исследования на опытно-экспериментальной биогазовой установке *(БГУ)* с биофильтром в метантенке; 3 – разработка рекомендации для крупнотоннажной переработки навозных стоков в биогазовой установке с анаэробным биофильтром *(АБ).*

На первом этапе, для обоснования наиболее эффективного конструктивного элемента шарообразного биофильтра, исследовали процесс накопления метанобразующих микроорганизмов на поверхностях твердых носителей. Для этого была создана нами лабораторная установка в институте микробиологии РАН в лаборатории академика Г.А. Заварзина (рисунок 5).



а) б)

Рисунок 5 – Общий вид (а) и технологическая схема лабораторной установки (б):
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 – сборный сосуд; 13 – хроматограф; 14 – потенциометр.

Метантенк – это цилиндрическая вертикального расположения стеклянная емкость со стальным нержавеющим плоским верхом и дном. Биофильтр представляет собой стеклянную рамку, выполненную в форме параллелепипеда и предназначенную для закрепления на ней исследуемых носителей: стеклоткань, ткань (пенька армированная полиэтиленом), сетка металлическая, флизелин, капроновая леска, капроновый шнур, сетка полихлорвиниловая. Размеры носителей (ширина, высота) *8 ×22 см.*

Загрузку метантенка продуктом переработки проводили до покрытия биофильтра. Состав сбраживаемой биомассы: на *7,0 литров(л)* водопроводной воды вносили минеральные компоненты среды Пфеннига из расчёта на *10,0 л* общего объема, микроэлементы Пфеннига, *2 л* стерилизованного свиного навоза, *1,0 л* бактериальной закваски, *50 г* ацетата натрия и *18,0г* бикарбоната натрия. Начальное значение pH соответствовало *7,0,* а общая влажность составляла *95%.*

Образование биогаза при постановке опытов контролировалось в газосборнике (с литражными делениями на боковой стороне стеклянной ёмкости), а содержание метана в биогазе определяли хроматографом ЛХМ-80.

В опытах были использованы термофильные метанообразующие микроорганизмы родов Methanotrix и Methanosarcina, а в качестве основного субстрата – ацетат натрия. Исследования проводили в термофильном режиме сбраживания *(54°С).* Перемешивание сбраживаемого субстрата осуществляли перистальтическим насосом по типу «Upflow» при скоростях циркуляции от *2* до *5* рабочего объемов в сутки. Согласно планированию эксперимента первоначальная доза загрузки составляла *1,0% (0,1 кг/л ацетата натрия),* далее к концу исследования доза была увеличена до *7,0% (0,7 кг/л)* от общего объема перерабатываемого сырья. Периодичность загрузки соответственно от *1 до 10 сут.*

В соответствии с поставленой целью исследования при планировании эксперимента количественная сторона технологического процесса переработки навозных стоков

характеризовалась скоростью образования биогаза – $У_1(V_{сф}, м^3/м^3\ сут)$, которая позволила оценить интенсивность переработки сырья, а качественная сторона процесса переработки навозных стоков - содержанием метана в биогазе – $У_2(С,\%)$ и степенью разложения органического вещества $У_3$ $(L,\%)$. При планировании эксперимента исследования проводили на двух уровнях варьирования: максимальный (+1) и минимальный (-1). С целью полного исследования приняли полный факторный эксперимент (2^2) с проведением 10 опытов. При выборе варьируемых факторов первоначально были проведены поисковые эксперименты. По их результатам и ранжированию факторов в опытах было решено варьировать тремя факторами: периодичностью загрузки метантенка - $X_1(Т,сут)$, дозой загрузки - X_2 $(Д, \%)$ и содержанием органического сухого вещества в перерабатываемом навозе - X_3 $(G_с, кг/м^3)$. Обработку экспериментальных данных проводили по методу множественной регрессии в программе STATISTIKA-8.

На основании результатов лабораторных исследований была разработана и создана экспериментальная биогазовая установка *(БГУ)* с биофильтром *(АБ)*. Программа производственной проверки *БГУ* (рисунок 6) предусматривала перечень следующих видов оценок: техническая экспертиза установки; условия проведения проверки и показатели качества работы установки; энергетическая оценка технологического процесса переработки навозных стоков. А для достижения поставленной цели решались следующие вопросы: изучение эффективности работы биофильтра с накопленными сообществами метанообразующих микроорганизмов при переработке навозных стоков свиноводства, исследование энергетического баланса биогазовой установки с биофильтром и определение образования товарной энергии.

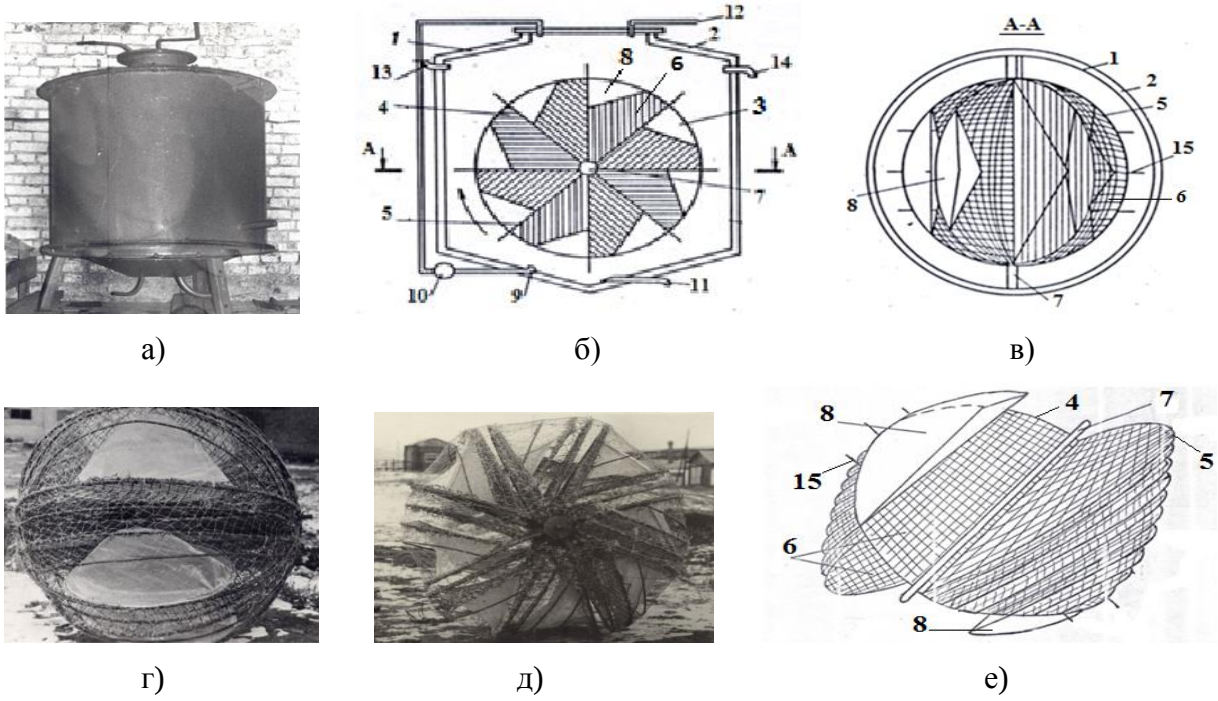


Рисунок 6 – Общий вид метантенка и биофильтра: метантенк (а) и технологическая схема (б) с сечением А-А (в), биофильтр вид спереди (г) и сбоку (д) и 1/4 часть (е): 1 - корпус метантенка; 2 – теплоизоляция; 3 – биофильтр; 4 - лопасть; 5 – жесткий каркас; 6 – сетка капроновая; 7 – вал; 8 – рабочая емкость (полимерная); 9 – штуцер; 10 – компрессор;11 – вентиль для слива; 12 – труба для отбора биогаза; 13 – труба для подачи исходной массы; 14 – труба для выгрузки сброженного субстрата; 15 – зубья.

Метантенк 1 представляет цилиндрическую ёмкость с рабочим объемом *1,0 м*^{3}, имеет конусное дно и верх. Данная форма обеспечивала накопление активного ила на дне ёмкости. В рабочей камере метантенка установлен анаэробный биофильтр 3, а в дно корпуса установлен штуцер 9 для принудительной подачи биогаза в рабочую емкость 8 лопастей и вентиль 11 для слива осадка с активным илом и для отбора части ила в системе

рециркуляции. Биофильтр 3 представляет собой форму шара жесткой конструкции, структурным элементом которого являются лопасти 4, которые представляют собой жёсткий полукруглый каркас 5, натянутый капроновой сеткой 6 с ячейкой *50 х 50 мм* и диаметром шнура *5,0 мм.* Биофильтр вращается вокруг своей оси на валу 7 с помощью выталкивающей силы образующегося биогаза, который скапливается в полимерной емкости 8. Принудительная подача биогаза в метантенк осуществляется компрессором 10, а разрушение образующейся корки на поверхности сбраживаемого навоза производится зубьями 15.

Перед запуском БГУ в работу камера сбраживания метантенка продувалась углекислым газом для создания анаэробных условий. При проведении производственной проверки доза загрузки метантенка составляла *5,2 %* от объема сбраживаемого сырья с периодичностью загрузки *7,0 сут*, влажность – *95%.* Образующийся биогаз собирался в мокром газосборнике объемом *1,0м*^{3}.

На третьем этапе была проведена математическая обработка результатов экспериментальных исследований с применением ЭВМ и типовых программ, разработаны рекомендации для больших объёмов переработки навозных стоков в биогазовой установке с анаэробным биофильтром.

В четвертой главе изложены результаты лабораторных исследований процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях, результаты производственной проверки экспериментальной биогазовой установки с анаэробным биофильтром, рекомендации для больших объёмов переработки навозных стоков с применением биофильтра и технологическая схема системы интенсивной технологии анаэробной переработки свиноводческих навозных стоков в биогаз и удобрение.

В результате проведения лабораторных опытов анаэробного сбраживания навозных стоков свиней было установлено (таблица), что процентное содержание метана в биогазе варьировало и было связано как с фазой развития метаногенной микрофлоры, так и с дозой загрузки метантенка.

Таблица - Результаты лабораторных опытов

Показатели	Ед. изм.	Номер опыта									
		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	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 составляла *0,1 кг/л (1,0%).* 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 *0,25 кг/л (2,5%)* и после фазы задержки, которая составляла двое суток, начался процесс активного метанообразования (рисунок 7). При дозе загрузки метантенка *от 0,25 до 0,4кг/л (4,0%)* содержание метана в биогазе составляла *от 42,5 до 63,4 %*, при менее *0,2 кг/л (2,0%)* - не более *30%*, а повышение дозы загрузки *до 0,5 кг/л (5,0% концентрация ацетата)* процесс метанообразования также активизировался и составил *64-68,7%*, а общее образование биогаза при периодичности загрузки реактора *7,0 сут* составил *44,2 л.* Степень разложения органического сырья *41%.*

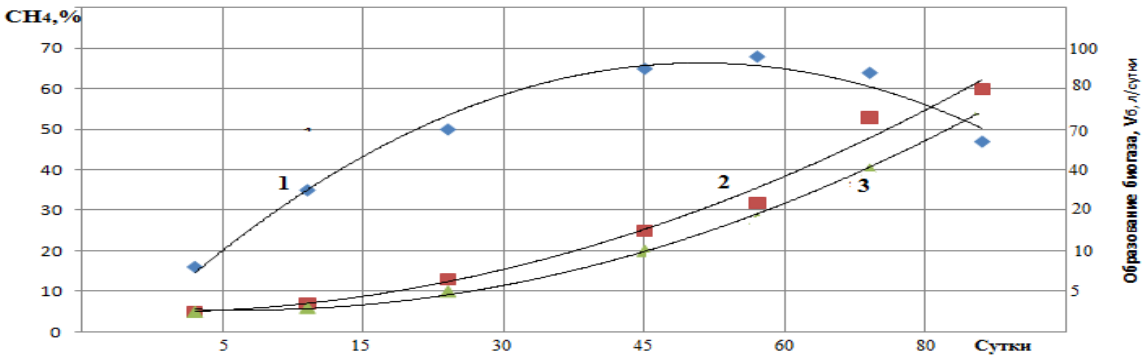
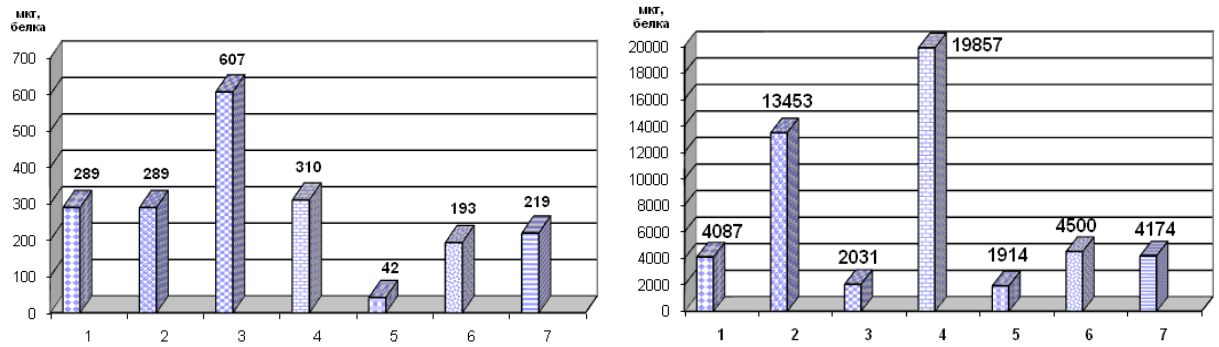


Рисунок 7- Графики образования биогаза (2 - экспериментальное, 3 - теоретическое) и метаносодержания в биогазе (1) в зависимости от времени технологического процесса сбраживания органического сырья.

Из рисунка 7 следует, что при увеличении дозы загрузки метантенка *до 0,75 кг/л (7,5%)* результаты показали, что суточное образование биогаза проходило без изменений, однако, качество его значительно снизилось, т.е. содержание метана CH_4 в биогазе к концу экспериментальных опытов соответствовало не более *45,1%.*

Экспериментальные исследования показали, что процесс колонизации макроносителей микроорганизмами происходит сравнительно медленно. Накопление микроорганизмов обеспечивает накопление массы метаногенов и увеличивает выход биогаза с рабочего объема метантенка. В начале лабораторных опытов микроорганизмы на исследуемых материалах не детектировался. После 3 месячной переработки метанообразующие микроорганизмы покрыли все испытуемые носители биофильтра,и была проведена электронная сканирующая микроскопия с целью установления доминирующих бактериальных форм в сообществе (рисунок 8).



а) б)

Рисунок 8 - Диаграмма общего количества активной биомассы (мкг), удерживаемой на поверхностях носителей биофильтра [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) массы1 г/материала.

Если рассматривать диаграмму, характеризующую количество метанообразующих микроорганизмов на единицу массы испытуемого материала, то наиболее благоприятным для накопления микроорганизмов являются флизелин и комбинированная ткань, а на стеклоткани, капроновом шнуре и полихлорвиниловой сетке содержание белка составляла *в 4,5 раза* меньше. 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 ферментатора стекловолокно армированное, ткань (пенька армированная полиэтиленом), леска, флизелин и полихлорвиниловая сеткапо своим физико-структурным характеристикам в агрессивной навозной среде являются непригодными, в сравнении с капроновыми носителями: капроновый шнур (ГОСТ 25574-83).

По результатам опытов разработаны математические модели процесса накопления метанообразующих микроорганизмов на носителях биофильтра в зависимости от: X_1 – периодичности загрузки сырья в метантенк, X_2 - дозы загрузки и X_3 – органического сухого вещества (ОСВ) в сбраживаемом субстрате:

Образование биогаза с единицы сбраживаемого субстрата

$$У_1 = 4{,}5+0{,}8x_1 +0{,}9x_2+1{,}2x_3 +0{,}7x_1^2- 0{,}9x_2^2-0{,}7x_3^2+ 0{,}5x_1x_2 + 0{,}1x_1x_3+ 0{,}3x_2x_3; \quad (15)$$

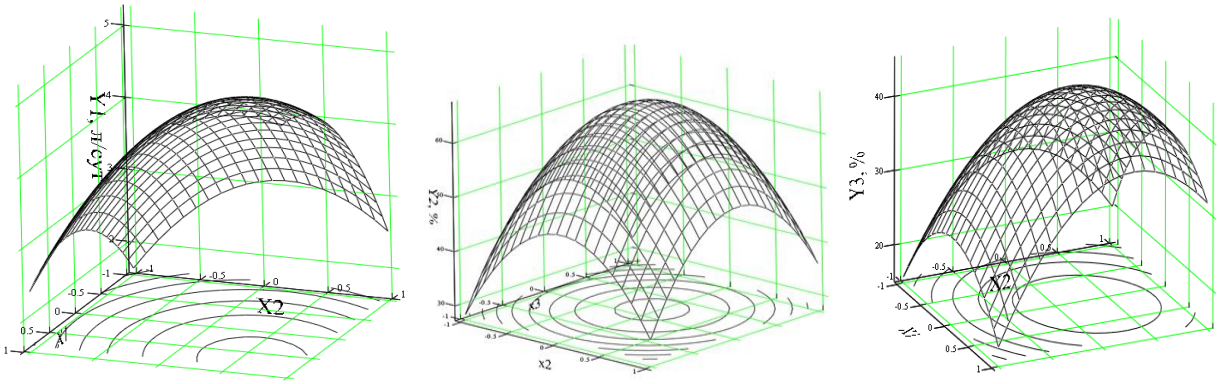
Метаносодержания в биогазе

$$У_2 = 66{,}5+ 1{,}9x_1 + 1{,}9x_2+ 1{,}9x_3 -17{,}4x_1^2 -17{,}1x_2^2 -17{,}1x_3^2- 0{,}01x_1x_2 - 0{,}01x_1x_3 +0{,}01x_2x_3; \quad (16)$$

Степени разложения органического вещества

$$У_3 = 43{,}7+ 3{,}4x_1+4{,}7x_2+ 3{,}2x_3 -10{,}2x_1^2 -12{,}1x_2^2 -10{,}9x_3^2+2{,}5x_1x_2+0{,}7x_1x_3+2{,}2x_2x_3; \quad (17)$$

Аналитические уравнения (15, 16 и 17) представлены тремя членами. Минимальная абсолютная величина регрессии X_1 (периодичность загрузки) и X_3 (органическое сухое вещество, в зависимости от влажности исходного сырья) свидетельствуют об их минимальном влиянии на процесс метаногенерации. Значительный вклад в предсказании образования биогаза принадлежит фактору X_2 – дозе загрузки субстрата в метантенк. Во всех моделях коэффициенты регрессий по абсолютной величине оказались меньше значения свободного члена B_o. Это указывает на влияние неучтенных варьируемых факторов. По результатам априорной регрессии, в наших исследованиях факторы периодичность загрузки навоза в метантенк *(Т)* и содержание органического сухого вещества перерабатываемого сырья *(G_o)* были приняты *7,0 сут. и 0,25кг/л.* Это повлияло на незначимость коэффициентов, т.е. математические модели позволили выявить значимый фактор и исследовать его влияние и взаимодействие на поведение процесса переработки навоза. Отсюда следует, что в качестве значимого фактора (рисунок 9) при оптимизации выходных значений скорости образования биогаза *$V_{сф}$($У_1$,л/л*сут)*, метаносодержания в биогазе *С($У_2$,%)* и степени разложения органического сухого вещества сбраживаемого субстрата *L ($У_3$,%)* принята доза загрузки метантенка *D=5,2% (X_2).*



а) б) в)

Рисунок 9 – Поверхности отклика, характеризующие выходные значения (а) скорости образования биогаза *$V_{сф}$($У_1$,л/л сут)* в зависимости от периодичности загрузки навоза в метантенк *Т (X_1,сут)* и дозы загрузки *D (X_2,%)*,(б) метаносодержания в биогазе *С ($У_2$,%)* - от дозы загрузки метантенка *D(X_2,%)* и содержания органического сухого вещества в перерабатываемом навозе *G_o (X_3)* и (в) степени разложения органическогосухого вещества перерабатываемого навоза *L ($У_3$,%)* в зависимости от *X_2 и X_3.*

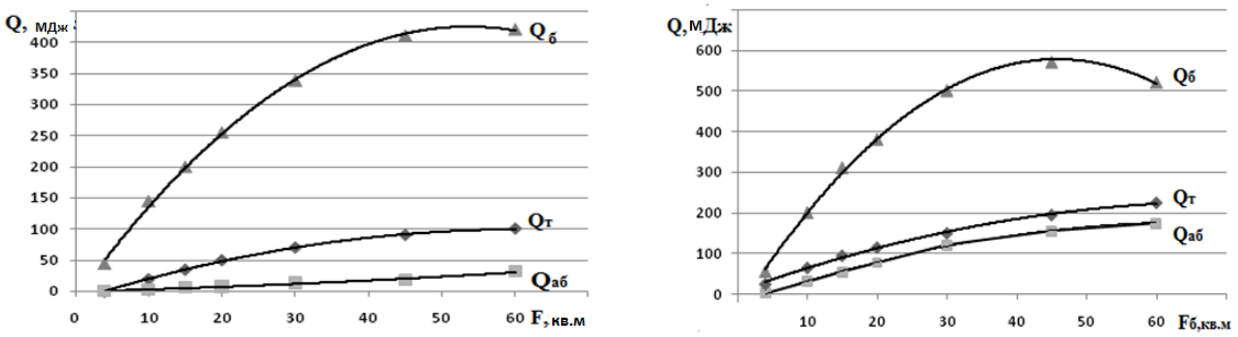
Из диаграммы следует, что оптимальными выходными значениями при накоплении метанообразующих микроорганизмов в метантенке, при проведении лабораторных исследований, являются: скорость образования биогаза *$V_{сф}$=4,5л/л*сут*, метаносодержание в биогазе *С = 66,5%* и степень разложения органического вещества переработанного навоза *L = 44,3%.*

Развитие метанообразующих микроорганизмов в метантенке контролировалась скоростью образования биогаза. После формирования и закрепления ассоциаций метаногенных сообществ на носителях анаэробного биофильтра процесс переработки

навозных стоков происходил в интенсивном режиме в течение *16 сут. Производственная проверка БГУ* позволила определить эффективность применения метантенка с биофильтром на интенсивность переработки навозных стоков в сравнении в метантенке без биофильтра, т.е. скорость образования биогаза $V_{сф}$ в метантенке с анаэробным биофильтром *на 34 % выше.*

Для оценки эффективности переработки навозных стоков в метантенке с анаэробным биофильтром, при проведении производственной проверки были определены их основные энергетические характеристики. Энергия полученного биогаза $Q_Б$ *(МДж/м*^{3}*)* характеризует энергетическую количественную сторону процесса сбраживания навозных стоков и зависит от энергосодержания биофильтра $Q_{АБ}$*(МДж/м*^{3}*)* в технологическом процессе накопления активной биомассы на носителях и метанообразования в биогазе. Энергия полученного товарного биогаза – $Q_Т$ *(МДж/м*^{3}*)* характеризует качественную сторону технологического процесса переработки навозных стоков в метантенке с биофильтром.

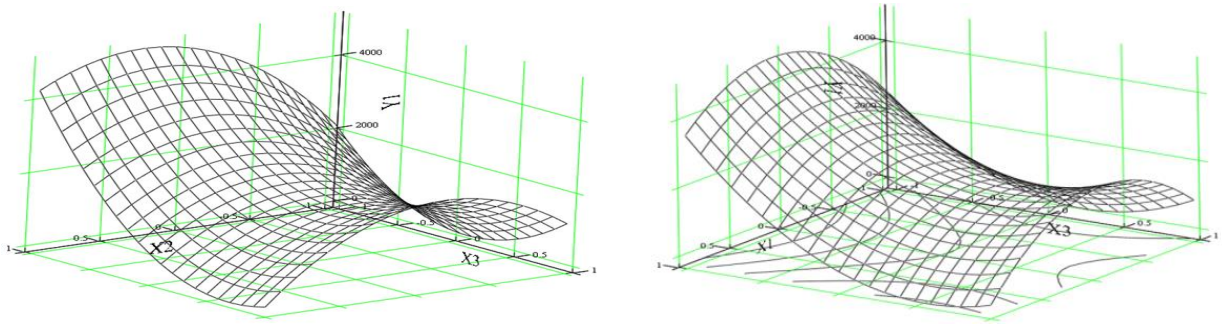
Результаты производственной проверки биогазовой установки *БГУ* позволили установить эффективность применения биофильтра с накопленными метанообразующими микроорганизмами в метантенке при переработке навозных стоков, т.е. с увеличением активной биомассы метанообразующих микроорганизмов $X_{бм}$ (рисунок 10) повышается энергосодержание анаэробного биофильтра $Q_Б$ *в 2,5 раза* и увеличивается образование энергии товарного биогаза $Q_Т$ *в 2,0 раза.*



а) б)

Рисунок 10 - Энергетические характеристики биогазовой установки с анаэробным биофильтром (а) при накоплении активной биомассы на носителях $X_{бм}$ *= 0,033 кг/м*^{3} и (б) при $X_{бм}$ *= 0,21кг/м*^{3}: $Q_Б$ – Общая энергия полученного биогаза; $Q_т$ – энергия товарного биогаза; $Q_{АБ}$ – энергосодержание активной биомассы, накопленной в анаэробном биофильтре.

По полученным результатам производственной проверки *БГУ* были оптимизированы конструктивные параметры анаэробного биофильтра, характеризующие накопления активной биомассы $X_{бм}(У_1)$ в зависимости от площади поверхности носителя (капроновый шнур) $F_бX_2)$ и количества лопастей $n_л(X_3)$, диаметра $d_б$ (X_1) и количества лопастей $n_л$ (X_3) анаэробного биофильтра, которые показаны на рисунке 11 а и б.



а) б)

Рисунок 11 – Поверхности отклика, характеризующие накопление активной биомассы $X_{бм} – У_1(кг)$ на носителях анаэробного биофильтра, (а) в зависимости от площади поверхности носителя (капроновый шнур) $F_б$ (X_2) и количества лопастей $n_л$ (X_3),(б) скорости образования биогаза$V_{сф}$ –

$У_2$ *(м^3/м^3 сут)*, в зависимости от диаметра $d_б$ *(X_1)* и количества лопастей $n_л$ *(X_3)* анаэробного биофильтра при сбраживании навозных стоков свиней в биогазовой установке.

При априорном ранжировании поверхности отклика при производственной проверке биогазовой установки, характеризующего оптимальное значение накопления активной биомассы на носителях $X_{бморт}$*=0,18 кг/м^3*, соответствуют оптимальные значения диаметра биофильтра $d_б$ *=1,0м,* количество лопастей, соответственно, $n_л$*= 8 шт* и площадь поверхности носителя (капроновый шнур) $F_б$*= 36,0 м^2*. Однако, следует отметить, что с увеличением диаметра и, соответственно, площади поверхности носителей биофильтра уменьшается степень разложения органического вещества перерабатываемого навоза *от 46,0 до 22,0%.*

В пятой главе даны технологическая схема анаэробной переработки навозных стоков свинофермы, методические рекомендации для анаэробной переработки навозных стоков в интенсивном режиме и приведены результаты технико-экономической эффективности от внедрения интенсивной технологии анаэробной переработки навозных стоков с применением биофильтра в СПК «Тамча» Селенгинского района Республики Бурятия.

В результате анализа энергетических характеристик биогазовой установки разработана технологическая схема интенсивной переработки навозных стоков. Особенностью технологической схемы является интенсивная технология переработки навозных стоков с разделением их на фракции жидкой и твердой после анаэробной переработки. Технология (рисунок 12) включает в себя ряд последовательных операций (метантенк-предсбраживатель и метантенк с биофильтром) и ее можно охарактеризовать как интенсивную, природоохранную и ресурсосберегающую. Представленная технология позволяет получить энергию в виде биогаза и ценное органическое удобрение.

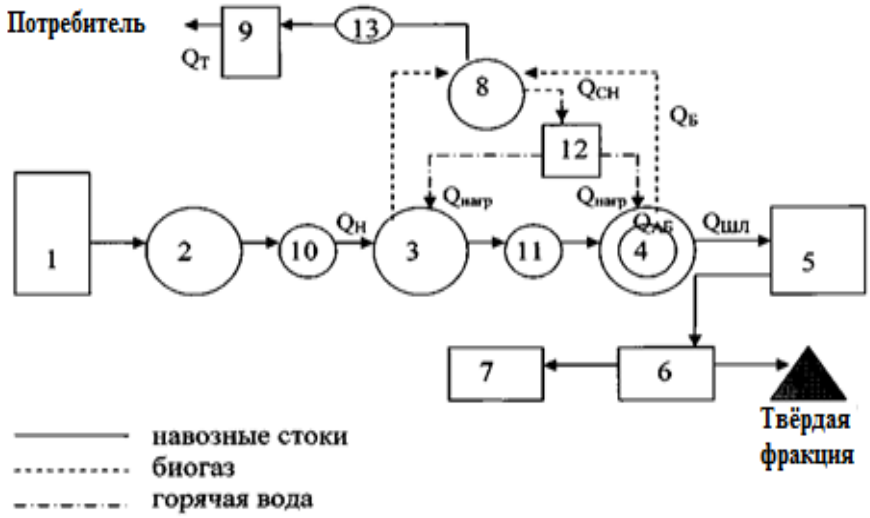


Рисунок 12-Технологическая схема системы усовершенствованной технологии переработки навозных стоков свиноферм биогазовой установке БГУ-2 с модульным расположением метантенков: 1 – свиноферма; 2 – навозосборник; 3 – метантенк – предсбраживатель; 4 – метантенк с биофильтром; 5 – отстойник; 6 – разделитель навозных стоков на фракции; 7 – пруд (навозонакопитель); 8 – мокрый газосборник; 9 – газгольдер биогаза; 10, 11 – фекальные насосы; 12 – котел на биогазе; 13 – компрессор.

На основании проведенных экспериментальных исследований переработки навозных стоков в биогазовой установке с применением анаэробного биофильтра предлагаются следующие *рекомендации производству:*

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.

Расчеты экономической эффективности от внедрения интенсивной технологии переработки навозных стоков в метантенке с биофильтром на свиноферме СПК «Тамча» Селенгинского района Республики Бурятия с содержанием животных *110 голов* составили *723,3тыс.руб/год*, а срок окупаемости капитальных вложений *1,6 года.* В основу расчета экономической эффективности положен принцип сравнения новой технологии и альтернативных вариантов переработки навозных стоков.

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 $d_ш$*=5,0мм* (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, при производственной

проверке биогазовой установки, оптимальное значение накопления активной биомассы в биофильтре соответствует $X_{бморг}=0,18$ *кг/м*^{3}, оптимальные конструктивные элементы шарообразного биофильтра: диаметр $d_б=1,0$*м*, количество 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, а 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.*

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бадмаев Ю.Ц. Эффективная переработка органических стоков в Байкальском регионе с применением анаэробного биофильтра [Текст] / Ю.Ц.Бадмаев // Вестник Крас. ГАУ. - 2009. Вып. 7(34).- С. 172-174.

2. 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.

3. Бадмаев Ю.Ц. Динамическая модель интенсификации процесса переработки навозных стоков в метантенке с анаэробным биофильтром [Текст] / Ю.Ц. Бадмаев, Ю.А. Сергеев // Вестник ВСГУТУ.- 2017.-№ 3(66).- С. 55-62.

4. Бадмаев Ю.Ц. Результаты лабораторных исследований иммобилизации метанообразующих микроорганизмов на твёрдых носителях [Текст] / Ю.Ц. Бадмаев, Ю.А. Сергеев // Вестник БГСХА им. В.Р. Филиппова.- 2017.-№ 3(43).- С.70-77.

5. Бадмаев Ю.Ц. Применение биогаза для сельскохозяйственного производства Республики Бурятия [Текст] / Ю.Ц. Бадмаев, С.Н. Кушнарев, Ю.А. Сергеев // Вестник аграрной науки Дона.- 2017.-№ 4 (40). - С. 30-34.

6. Бадмаев Ю.Ц. Методика расчёта оптимальной дозы загрузки биореактора при анаэробном сбраживании навозных стоков. / Ю.Ц. Бадмаев // Вестник Бурятского государственного университета. Сер. 9. Физика и техника. Вып. 5. – 2006.- С. 210-214.

Статьи в сборниках, журналах и других изданиях:

7. 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.

8. 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: Сб. Науч. Трудов – Изд-во С-ПГАУ, 2009. С. 227-231.

9. Бадмаев Ю.Ц. Анаэробная переработка навозных стоков животноводства // Материалы международной научно-практической конференции 2-4 июня 2010 г. – Улан-Батор: Изд-во МонгСХУ, 2010. – С. 120-124.

10. Бадмаев Ю.Ц. Теоретические исследования биогаза-биотоплива для автономных сельскохозяйственных энергопотребителей /Ю.Ц. Бадмаев, И.Б. Шагдыров // Материалы

международной научно-практической конференции «Агротуризм в России».- Улан-Удэ: Изд-во БГСХА, 2014. – С. 17-20.

11. Бадмаев Ю.Ц. Система анаэробного «бактериального фильтра» при сбраживании органических стоков животноводства / Ю.Ц. Бадмаев, И.Б. Шагдыров, С.Н. Кушнарев // Материалы международной науч.-практ. конференции, посвященной 85-летию БГСХА и 55-летию инженерного факультета 1-5 июня 2016г. - Улан-Удэ: Изд-во БГСХА, 2016. – С. 9-14.

12. Бадмаев Ю.Ц. Технологии переработки навоза и навозных стоков и методы их совершенствования / Ю.Ц. Бадмаев, Ю.А. Сергеев // Сб. научн. трудов ВСГУТУ, Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2017. - № 13.С.27-30.

13. Бадмаев Ю.Ц. Лабораторная установка для сбраживания навозных стоков с применением анаэробного биофильтра / Ю.Ц. Бадмаев, Ю.А. Сергеев // Сб. науч. трудов ВСГУТУ, Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2017. - № 13. С.30-34.

14. 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.

15. Бадмаев Ю.Ц. Производственная проверка биогазовой установки второго поколения БГУ-2 в условиях Республики Бурятия / Ю.Ц. Бадмаев // Материалы международной научно-практической конференции. – Новосибирск: СФНЦА РАН, 2019.- С. 263-267.

16. 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.

В монографиях:

17. Бадмаев Ю.Ц. Высокоинтенсивная технология анаэробной переработки органических отходов животноводства в условиях Республики Бурятия: Научно-методические рекомендации: ФГОУ ВПО «Бурятская ГСХА им. В.Р. Филиппова». – Улан-Удэ: БГСХА им. В.Р. Филиппова, 2014. – 104 с.

В авторских свидетельствах:

18. Бадмаев Ю.Ц. Аппарат для анаэробного сбраживания органических отходов животноводства, пищевой промышленности и городских стоков [Текст]: а.с. на изобретение «SU» 1599319 A1, (51) 5 C 02 F 11/04 // Бадмаев Ю.Ц., Крюков В.Р., Ковалев А.А.; заявл. 20.01.1988; опубл. 15.10.1990. Бюл. №38. – 5 с.: ил.

Подписано в печать _____. Формат 60х84 1/16
Усл. Печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ №___

Издательство БГСХА им. В.Р. Филиппова
670024, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, № 8.