

На правах рукописи



ЕДИСЕЕВ ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА УТИЛИЗАЦИИ СВИНОГО НАВОЗА ПУТЁМ
ПРИМЕНЕНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЖИДКОСТИ ЭФФЛЮЕНТА**

Специальность 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» (ФГАОУ ВО СВФУ им. М.К. Аммосова).

Научный руководитель: **Друзьянова Варвара Петровна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бондаренко Анатолий Михайлович,**
доктор технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт- филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде, профессор кафедры физика, механика и землеустройство

Фиापшев Амур Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», заведующий кафедры энергообеспечение предприятий

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ)

Защита состоится «1» декабря 2026 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.031.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: <http://rgatu.ru/>, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.gisnauka.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Юхин Иван Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Совершенствование и повышение эффективности переработки животноводческих отходов в агропромышленном комплексе Республики Саха (Якутия) является важным фактором обеспечения экологической безопасности северных территорий, ресурсосбережения и повышения качества жизни населения. В условиях распространения вечной мерзлоты, развития сельскохозяйственного производства и ужесточения природоохранных требований возрастает необходимость во внедрении технологий, сочетающих эффективную утилизацию навоза с минимальным расходом энергии и площадей для хранения отходов. Традиционные методы сбора и обезвреживания отходов, реализуемые преимущественно вручную в крестьянско-фермерских и личных подсобных хозяйствах, характеризуются высокой трудоемкостью, недостаточной экологической эффективностью и отсутствием решений для полной утилизации агрессивных отходов, в частности свиного навоза. В этой связи совершенствование биогазовой технологии анаэробной переработки навоза, предусматривающее разделение эффлюента на фракции и рециркуляцию жидкой части для разбавления свежего сырья, обеспечивающее интенсификацию разложения субстрата за счет активной колонии психрофильных бактерий, сокращение объема жидких отходов и улучшение качества биогаза, приобретает высокую научную и практическую актуальность.

Степень разработанности темы. Научные основы переработки и утилизации отходов в виде навоза от сельскохозяйственных животных и применение полученных продуктов отражены в работах Апажева А.К., Баадера В., Бадмаева Ю.Ц., Бондаренко А.М., Васильева Ф.А., Васильевой А.С., Гайфуллина И.Х., Головки А.Н., Гюнтер Л.И., Друзьяновой В.П., Зиганшина Б.Г., Ильина С.Н., Лимаренко Н.В., Осмонова О.М., Панцхава Е.С., Петрова Н.В., Савватеевой И.А., Спиридоновой А.В., Успенского И.А., Фиалова А.Г. и др.

Связь работы с научными программами и темами. Диссертационная работа выполнена в рамках выполнения НИР ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) программы «У.М.Н.И.К».

Цель исследования – разработка оригинального безотходного способа утилизации свиного навоза на основе биогазовой технологии, обеспечивающего минимизацию объемов жидкого удобрения и интенсификацию процесса анаэробного разложения в психрофильном режиме за счет введения в сбрасываемый субстрат жидкого эффлюента с активной колонией метаногенных бактерий.

Для достижения цели поставлены и сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Уточнить производительность накопительной психрофильной

биогазовой технологии переработки свиного навоза.

2.Обосновать замкнутый и безотходный способ утилизации свиного навоза на основе накопительной психрофильной биогазовой технологии и предложить его экономико-математическую модель.

3.Разработать динамическую модель нового способа утилизации свиного навоза, описывающую эффективность использования рециркуляционной жидкости эффлюента.

4.Дать технико-экономическое обоснование безотходному, замкнутому и энергосберегающему способу утилизации свиного навоза.

Объект исследования – технологический процесс анаэробной утилизации свиного навоза с получением биогаза, эффлюента, органоминерального гуминового удобрения (ОМГУ) и структурирующей добавки для асфальтобетона (СДА).

Предмет исследования – зависимости, раскрывающие процесс интенсификации параметров анаэробной переработки при разжижении свиного навоза рециркуляционной жидкостью от разделения эффлюента.

Научная новизна работы:

1.Разработана экономико-математическая модель эффективности нового способа утилизации свиного навоза на основе производственно-технологических и энергетических затрат.

2.Разработана динамическая модель, раскрывающая кинетику анаэробного разложения, когда навоз разбавляется рециркуляционной жидкостью от разделения эффлюента, вносящей в свежий отход активную колонию метанообразующих микроорганизмов.

Новизна, изобретательский уровень и промышленная применимость предложенных технических решений подтверждены Евразийским патентом на изобретение № 053350, патентом на изобретение РФ №2839275, свидетельствами о государственной регистрации базы данных №2025621821 РФ и программы для ЭВМ №2024661576.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретически обоснованы и экспериментально проверены новые подходы к процессу утилизации свиного навоза, доказывающие эффективность разбавления свежего навоза жидким рециркулятом эффлюента для анаэробной переработки в метантенке. Получены теоретические зависимости, позволяющие снизить расход технически чистой воды и заменить его жидким рециркулятом эффлюента.

Практическая ценность заключается в: применении доступного оборудования, упрощающего его эксплуатацию, обслуживание и ремонт; практическом подходе к вопросу использования альтернативной электроэнергии; исключении применения ассенизаторов для вывоза жидкого навоза; экономии технически чистой воды; возможности создания замкнутого

безотходного и ресурсосберегающего производства, заключающегося в утилизации вредного отхода без вывоза за пределы свиноводческого предприятия.

Методология и методы исследования. Исследования осуществлены на основе общих положений проведения научно-исследовательских работ, использовались методы системного анализа, математического моделирования и методики планирования экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ интенсификации анаэробного разложения субстрата, базирующийся на использовании жидкого рециркулята эффлюента, позволяющий создать замкнутое безотходное производство с получением новых дополнительных продуктов в виде ОМГУ и СДА.

2. Модель эффективности предлагаемого нового безотходного способа утилизации свиного навоза на основе учета производственно-технологических и энергетических затрат.

3. Динамическая модель, раскрывающая кинетику эффективной анаэробной утилизации субстрата и образования качественного биогаза, когда процесс ускорен внесением активной метаногенной колонией.

Реализация результатов исследования. Результаты работы подтверждаются актами внедрения в ООО «Хатасский свинокомплекс» (с. Хатассы, ГО «город Якутск», Республика Саха (Якутия)), ЗАО «Гордормостстрой» (г. Якутск, ГО «город Якутск», Республика Саха (Якутия)), СППК «Урдэл» (с. Булгунняхтах, Хангаласский район, Республика Саха (Якутия)), а также справкой об использовании материалов диссертационной работы в учебном процессе ФГАОУ ВО СВФУ.

Степень достоверности результатов исследований подтверждается:

– достаточным объемом теоретических исследований, проведенными экспериментами с использованием разработанных и существующих методических рекомендаций, нормативно-технической документации и современного оборудования;

– сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, проверкой результатов в лабораторных исследованиях и производственных условиях с внедрением полученных результатов исследований в производство.

Личный вклад соискателя состоит в обосновании зависимостей, раскрывающих процесс интенсификации параметров анаэробной переработки при разжижении свиного навоза рециркуляционной жидкостью эффлюента, непосредственном участии на всех этапах разработки, при проведении экспериментальных исследований в производственных условиях ООО «Хатасский свинокомплекс» (с. Хатассы, ГО «город Якутск», Республика Саха (Якутия)), ЗАО «Гордормостстрой» (г. Якутск, ГО «город Якутск», Республика

Саха (Якутия)), СППК «Урдэл» (с. Булгунняхтах, Хангаласский район, Республика Саха (Якутия)).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и получили положительную оценку на международных и всероссийских конференциях: «Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития» (Благовещенск, Россия, 2022,2025), «Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК» (Иркутск, Россия, 2022), «Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года» (Якутск, Россия, 2022), « Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее» (Красноярск, Россия, 2023), Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки, Улан-Удэ, 03–07 февраля 2025, XXVIII Международный научно-практический форум «Аграрная наука – сельскохозяйственному производству СНГ и BRICS» (Новосибирск, Россия, 2026).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ, 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных РФ, 1 патент РФ на изобретение и 1 Евразийский патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 156 наименований, в том числе 13 – иностранном языке и приложений. Общий объем работы составляет 150 страниц машинописного текста, включает 29 рисунков и 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, изложена степень её разработанности, представлены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимости, представлены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов исследований.

В первой главе «Анализ современного состояние вопроса и задачи исследования» изложены характеристики животноводческих отходов. Рассмотрены способы утилизации свиного навоза. Дана информация о свиноводческих предприятиях Центральной Якутии, об отсутствии в них способа переработки и утилизации отходов. Отмечено, что для обеззараживания и обезвреживания свиного навоза, исключения его резкого запаха наиболее подходит анаэробный способ переработки.

Во второй главе «Теоретическое обоснование процесса анаэробного сбраживания» описан предлагаемый новый способ утилизации свиного навоза с получением эффлюента, биогаза и качественного удобрения, насыщенного гуминовыми кислотами (ОМГУ) и СДА – отмечается, что, начиная со второго

цикла работы линии свежий навоз разбавляется рециркуляционной жидкостью от выжимки эффлюента. В качестве основы для предлагаемой новой линии выбрана накопительная психрофильная биогазовая технология Друзьяновой В.П., адаптированная под условия холодного климата. Переработку предлагается проводить в 5 этапов: запуск метантенка на субстрате, разведенном на воде; сбор и генерация биогаза в электроэнергию; запуск линии на субстрате, приготовленном на рециркуляционной жидкой фракции эффлюента; экстракция твердой фазы эффлюента 0,5-1,0% раствором гидроксида калия в щелочном реакторе для насыщения гуминовыми кислотами; разделение сепаратором щелочного экстракта на ОМГУ (жидкая фракция) и СДА (твердая фракция) (рисунок 1).



Рисунок 1 – Блок-схема предлагаемого способа утилизации свиного навоза (ОМГУ – органоминеральное гуминовое удобрение, СДА – структурирующая добавка для асфальтобетона).

Сопутствующим продуктом технологической линии является биогаз – дополнительный источник энергии. В целях снижения энергозатрат необходимых для работы сепаратора биогаз можно преобразовать в альтернативную электроэнергию. Поэтому эффективность новой технологической линии оценим, приняв за основу производственно-технологические и энергетические затраты ($\mathcal{E}_3$).

Эффективность использования альтернативной электроэнергии будет достигнута только при снижении энергетических затрат на ее производство:

$$\mathcal{E}_3 = \sum(Q_{A\mathcal{E}} + H \cdot K_i) \rightarrow \min \quad (1)$$

где, $Q_{A\mathcal{E}}$ – себестоимость альтернативной электроэнергии, получаемой из биогаза, руб.; H – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; K_i – общие расходы на производство альтернативной электроэнергии, руб.

Савватеевой И.А. исследована и обоснована технология производства электроэнергии из биогаза, производимого в накопительном психрофильном

режиме. Она отмечает, что в психрофильном режиме биогаз получается высокого качества – в составе метана более 80% и биогаз не требует дополнительной очистки. Установлено, что устойчивую работу газового генератора на таком биогазе можно обеспечить путём подбора и обоснования диаметра жиклера газового генератора $d_{ж}$, который обеспечивает беспрепятственный проход биотоплива в камеру сгорания газогенератора:

$$d_{ж} = f(B_{сг}, P_{сбр}) \geq [d_{жд}], \quad (2)$$

где, $B_{сг}$ – качество биогаза; $P_{сбр}$ – режим работы биогазовой установки.

Известно, что качество биогаза $B_{сг}$, определяется соотношением в нем метана и углекислого газа. В качестве моторного топлива допустимо использовать биогаз с содержанием метана более 80%. Данное и более высокое содержание метана в биогазе достигается при утилизации предварительно качественно подготовленного по составу сбраживаемого сырья (ССС) и обеспечении наиболее оптимальных условий переработки в биогазовой установке путём управления значимыми факторами (УПФ)

$$B_{сг} = f(ССС, УПФ) \geq [B_{сг}], \quad (3)$$

где СССР – состав сбраживаемого сырья. Для эффективного разложения сбраживаемого сырья в метантенке, оно должно быть максимально измельчено и разбавлено водой до влажности 92-93%, представлять из себя гомогенизированную смесь. Процесс утилизации можно значительно интенсифицировать, если свежий навоз разбавлять жидкостью, уже содержащей колонию метаногенных бактерий; УПФ – наиболее значимые, управляющие процессом анаэробной утилизации факторы: вид и влажность сырья, скорость образования метаногенных бактерий и их концентрация в сбраживаемом субстрате; требуемый запас биогаза, W_a , который преобразуется в электрическую энергию

$$W_a = f(t_{об}, W_{нав}) \geq [W_a], \quad (4)$$

где, $[W_a]$ – допустимый запас биогаза в баллонах, m^3 ; $t_{об}$ – время работы оборудования на альтернативной электроэнергии, ч; $W_{нав}$ – объем утилизируемого свиного навоза, m^3 .

Требуемое количество альтернативной электроэнергии (биогазовой электроэнергии) для обеспечения работы газового генератора в общем зависит от следующих величин

$$\left. \begin{aligned} G &= f(d_{ж}; N_e) \rightarrow \max \\ W_a &= f(t_{об}; W_{нав}) \rightarrow \max \\ B_{сг} &= f(ССС; УПФ) \rightarrow \max \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где, G – мощность газового генератора, кВт. В свою очередь, G зависит от $d_{ж}$ – диаметра жиклера для подачи биогаза в камеру сгорания генератора, мм; N_e – полная мощность газогенератора, кВтА.

Эффективность предлагаемого нового способа утилизации свиного навоза с получением 4-х продуктов – эффлюента, биогаза, ОМГУ и СДА, можно оценить следующей экономико-математической моделью, в основе которой находится процесс производства и применения альтернативной электроэнергии из биогаза:

$$C = \frac{\partial_z}{A} = \frac{\sum \partial_{zi}}{A} \rightarrow \min, \quad (6)$$

Таким образом, себестоимость нового дополнительного продукта – ОМГУ из свиного навоза, будет зависеть от наличия оптимального запаса биогаза в баллонах $W_{ББ}, \text{м}^3$; его качества $B_{СГ}$; часового расхода биогаза сепаратором $W_{ч}, \text{м}^3/\text{ч}$; времени работы сепаратора, $\tau, \text{ч}$, объема рециркуляционной жидкости эффлюента с содержанием жизнеспособной колонии метаногенных психрофильных бактерий, $V_P, \text{м}^3$ и постоянной положительной температуры помещения, $T_{Пом}, ^\circ\text{C}$ где расположен метантенк

$$C = f(W_{ББ}, B_{СГ}, W_{ч}, \tau, V_P, T_{Пом}) \quad (7)$$

Известно, что из метантенка объемом в 1 м^3 выгружается 530 кг эффлюента, а с 1 м^3 биогаза вырабатывается около $2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии.

Для математического описания данного процесса, необходимо предложить модель, отражающую процесс ввода рециркуляционной жидкости эффлюента в сбраживаемый свежий навоз. За основу взята система дифференциальных уравнений, составленная Друзьяновой В.П. для психрофильного накопительного режима сбраживания

$$\frac{dT}{d\tau} = (\mu - \tilde{\mu})T \quad (8)$$

$$\frac{dS}{d\tau} = \tau_{j_s}T - V - \tilde{V} \quad (9)$$

$$\frac{dP}{d\tau} = \tau_{j_p}T - M + \tilde{M} \quad (10)$$

где, T - концентрация биомассы, $\text{кг}/\text{м}^3$; S - концентрация субстрата, $\text{кг}/\text{м}^3$; P - концентрация продукта (биогаза), $\text{м}^3/\text{м}^3$; μ - удельная скорость роста биомассы, сут^{-1} ; $\tilde{\mu}$ - удельная скорость метаболизма, сут^{-1} ; j_s, j_p - удельные скорости разложения субстрата и образования продукта, сут^{-1} ; $V, \tilde{V}, M, \tilde{M}$ - скорости различных стадий процесса.

Следует отметить, что система уравнений (8, 9, 10) составлена для стационарного сбраживаемого субстрата, поэтому требует переработки путем введения динамических коэффициентов, учитывающих использование рециркуляционной жидкости эффлюента.

Скорость образования метаногенов опишется следующей формулой:

$$\frac{T_{уд}}{\tau_{уд}} = (\mu - \tilde{\mu})T_0 - bT_0 - \frac{Q}{V}T_0 + \frac{Q_R}{V}T_R \quad (11)$$

где T_0 - концентрация метаногенов в исходном навозе, кг/м³; Q – подача свежего субстрата за 1 цикл, м³/сут; Q_R - расход рециркуляционной жидкости от эффлюента, м³/сут; τ – период разложения субстрата, сут; μ - удельная скорость роста метаногенов, сут⁻¹; $\tilde{\mu}$ - удельная скорость метаболизма, сут⁻¹; V – объем метантенка, м³; b – скорость отмирания метаногенных бактерий, сут⁻¹; $\frac{Q}{V}T_0$ – выражение выноса метаногенов с эффлюентом, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{сут}}$; $\frac{Q_R}{V}T_R$ – выражение поступления метаногенов с рециркулятом, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{сут}}$;

Динамика субстрата, подготовленного на рециркуляте, выразится в виде:

$$\frac{S_{уд}}{\tau_{уд}} = -kST - \frac{Q}{V}S + \frac{Q_R}{V}S_R \quad (12)$$

где S – состав субстрата, кг/м³; Q_R – колония метаногенов, м³/сут; $-kST$ – выражение потребления субстрата метаногенами, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{сут}}$; $\frac{Q}{V}S$ – выражение выноса субстрата при выгрузке метантенка, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{сут}}$; $\frac{Q_R}{V}S_R$ – выражение содержания метаногенов во вводимом субстрате, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{сут}}$;

Динамика выхода биогаза включает стадии его появления, устойчивого образования и накопления:

$$\frac{P_{уд}}{\tau_{уд}} = Y\mu T - \frac{Q}{V}P \quad (13)$$

где P – величина выхода биогаза м³/м³; $Y\mu T$ - выражение скорости образования биогаза, сут⁻¹; $\frac{Q}{V}P$ – выражение скорости отвода биогаза из метантенка, сут⁻¹.

Приняв значения величин из научных источников, справочников, а также используя экспериментальные результаты, математически определены параметры предлагаемого способа.

При этом, $\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K+S}$ – скорость роста метаногенов; $\mu_{\max}$ - максимальная скорость роста метаногенов равная (0,12 сут⁻¹); $K=0,4$ кг/м³ – константа полунасыщения для свиного навоза; k – скорость потребления субстрата метаногенами (0,12 м³/кг·сут); Y – выход биогаза с 1000 кг субстрата (30,00 м³/кг); Q – подача свежего субстрата за 1 цикл (0,048 м³/сут); b – скорость отмирания метаногенных бактерий (0,025 сут⁻¹) Q_R - расход рециркуляционной жидкости от эффлюента (0,016 м³/сут); V - объем метантенка (1,5 м³); $T_R = 0,6$ кг/м³ - концентрация метаногенов в рециркуляционной жидкости эффлюента; $S_R = 20$ кг/м³ - концентрация субстрата в рециркуляционной жидкости эффлюента.

Для решения уравнений (11), (12), (13) применен метод Эйлера с заданными начальными условиями:

$$y_{n+1} = y_n + h \frac{y_{уд}}{\tau_{уд}} \quad (14)$$

где, y_{n+1} – новое значение переменной; y_n - текущее значение переменной;

h – шаг интегрирования (1,0 сут);

$\frac{Y_{уд}}{\tau_{уд}}$ – удельный рост колонии метаногенов, содержание органических

веществ в сбраживаемом субстрате и выход биогаза за заданный промежуток времени.

Для колонии метаногенов:

$$T_1 = T_0 + h \frac{T_{уд}}{\tau_{уд}}, \text{ кг/м}^3 \quad (15)$$

Для сбраживаемого субстрата:

$$S_1 = S_0 + h \frac{T_{уд}}{\tau_{уд}}, \text{ кг/м}^3 \quad (16)$$

Для появления, образования и накопления биогаза:

$$P_1 = P_0 + h \frac{T_{уд}}{\tau_{уд}}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (17)$$

Начальные условия, когда ($\tau=0$): $T_0=0,2 \text{ кг/м}^3$ – концентрация метаногенов в свежем субстрате; $S_0=67,0 \text{ кг/м}^3$ – концентрация органических веществ в субстрате; $P_0=0 \text{ м}^3/\text{м}^3$ – биогаз отсутствует в начале процесса.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных» представлена методика исследований, состоящая из шести этапов:

Первый этап: для натурных исследований отобран навоз от хряков Хатасского свиногомплекса, и запущена лабораторная установка (БГУ). БГУ работает в накопительном психрофильном режиме при температуре помещения 16...18 °С. Свежий свиной навоз разжижается водой до влажности 92-93 % загружается в рабочий объем метантенка (1), что составляет порядка 2/3 от его общего объема. Создаются анаэробные условия для развития метаногенных бактерий. Процесс анаэробного разложения отслеживается накоплением биогаза в газгольдере (4). Горючий биогаз – показатель установившегося процесса анаэробной утилизации навоза. Разработана технологическая линия для ООО «Хатасский свиногомплекс» на основании полученных результатов лабораторных исследований.

Второй этап. Запуск пилотной технологической линии, в которой вместо сепаратора использована центрифуга. Линия запущена на водном субстрате, а после периода полного сбраживания процесс провели на субстрате, разбавленном рециркуляционной жидкостью эффлюента.

Третий этап. Запуск пилотной предлагаемой линии на субстрате на рециркуляционной жидкой фракции эффлюента.

Технологическая схема линии показана на рисунке 2.

Четвертый этап. Биогаз преобразуется через газогенератор в альтернативную электрическую энергию, на которой запускается в работу сепаратор для разделения эффлюента на жидкую и твердую фракции.

Пятый этап. Твердая масса эффлюента подвергается воздействию 0,5-1,0 % раствора гидроксида калия в щелочном реакторе.

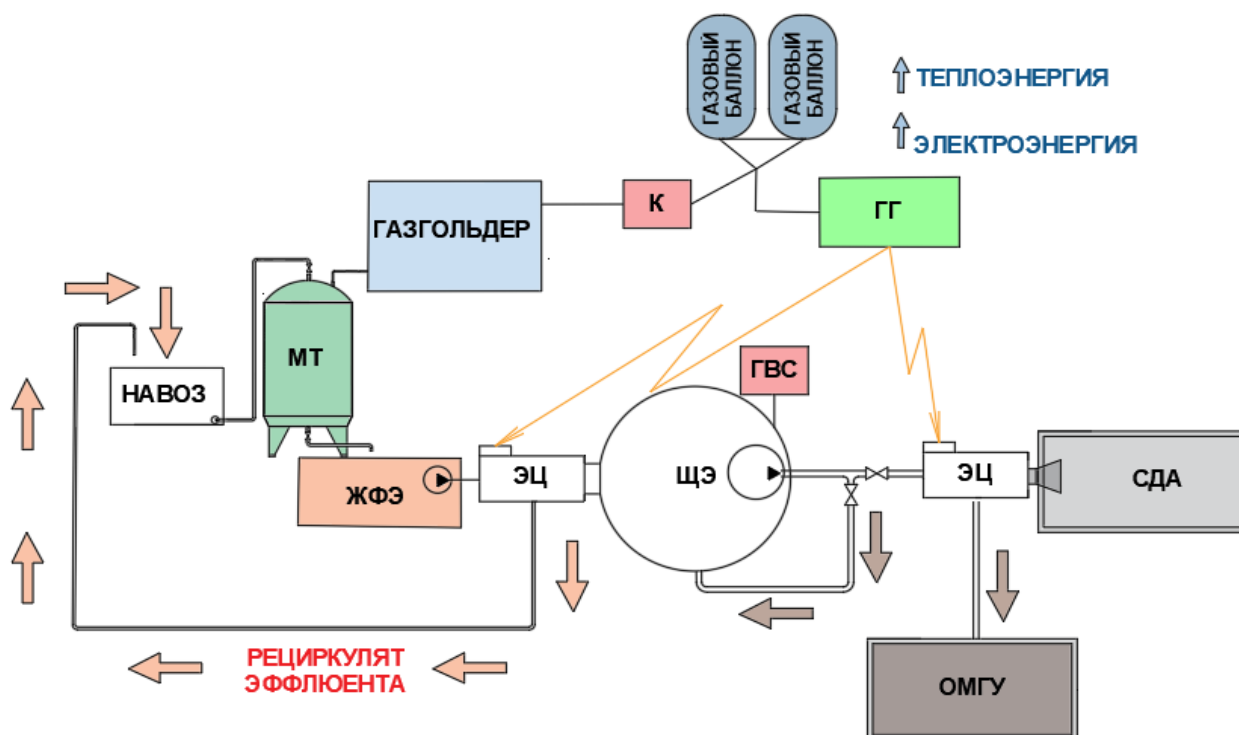


Рисунок 2 – Технологическая схема пилотной предлагаемой линии: ГВС – горячая вода из системы водоснабжения; ГБ – метановые газовые баллоны; ГГ – газовый генератор; ЖФЭ – емкость для сбора эффлюента из метантенка; К – компрессор; МТ – накопительный метантенк; НАВОЗ – емкость для подготовки субстрата свиного навоза ОМГУ – органоминеральное гуминовое удобрение; СДА – емкость для сбора сырья для структурирующей добавки для асфальтобетона; ЩЭ – реактор для щелочной экстракции гуминовых веществ; погружные насосы для перекачивания субстрата, эффлюента и щелочного экстракта; ЭЦ- электрическая центрифуга.

Шестой этап: Щелочной экстракт разделяется на ОМГУ (жидкая фракция) и СДА (твердая фракция). Определяются характеристики ОМГУ и СДА.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» изложены результаты экспериментальных исследований.

Результаты первого этапа. Масса утилизируемого субстрата - 30 кг. Температура сбраживания 16...18 °С. Биогаз появился на 6 сутки, горение начал поддерживать на 11 сутки. Всего накоплено 0,91 м³ (0,03 м³/кг). Общий период сбраживания составил 26 суток.

В результате проведенных исследований обоснован выход биогаза в зависимости от периода сбраживания и изучен его состав (рисунок 3, таблица 1).

Состав полученного биогаза проанализирован в лаборатории (таблица 1).

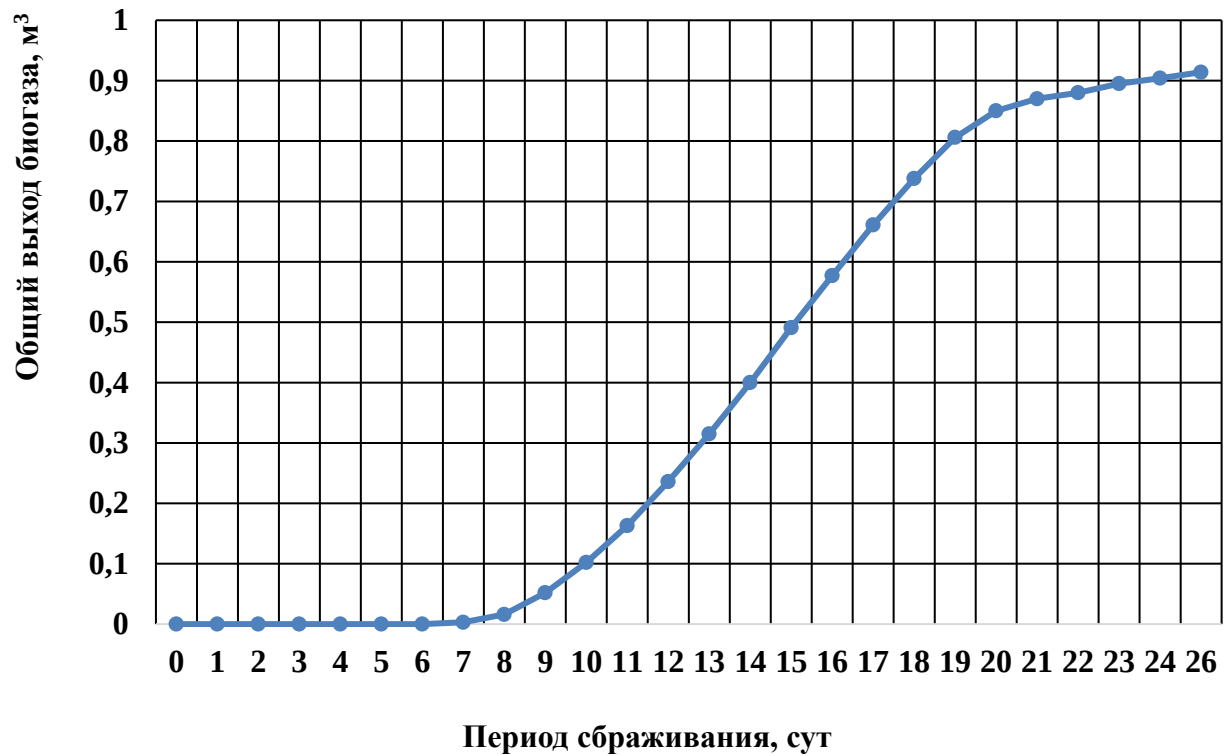


Рисунок 3 – График общего выхода биогаза с лабораторной БГУ (субстрат на воде)

Таблица 1 – Состав биогаза

№	Компонент	Концентрация	Ед. изм.
1	O ₂ (кислород)	11,85	мол. %
2	CO ₂ (углекислый газ)	0,61	мол. %
3	CH ₄ (метан)	87,54	мол. %

Как видно с таблицы 1, в составе биогаза метана (CH₄) более 80-ти %, что свидетельствует о высоком качестве, гарантирующего устойчивую работу газогенератора для преобразования биогаза в электроэнергию. Таким образом, с 1 кг субстрата свиного навоза влажностью 92-93% в среднем образуется 0,030 м³ биогаза. Исследован состав эффлюента – вредных элементов не содержится, имеются фосфор и калий в достаточных объемах.

Результаты второго этапа. При запуске линии на субстрате, разбавленном водой, биогаз появился на 7-ой день. На 12-тый день он качественно поддерживал процесс горения, что свидетельствует об образовании внутри метантенка устойчивого режима анаэробного разложения. На 26 день работы процесс метанообразования резко снизился, что послужило сигналом приостановки процесса переработки, проведено опорожнение эффлюента из метантенка (рисунок 4).



Рисунок 4 – Общий выход биогаза в пилотной линии (субстрат на воде)

Общий объем выхода биогаза составил 19,86 м³ или в среднем 0,76 м³/сут.

Результаты третьего этапа. При разжижении свежего навоза рециркулятом эффлюента, биогаз появился на третьи сутки. Уже на 6 сутки он устойчиво горит. За 21 сутки работы метантенка общий объем выхода биогаза составил 23,46 м³ (1,12 м³/сут), что в 1,47 раз превышает объем биогаза, полученного от переработки субстрата на воде. Рециркулят значительно увеличивает скорость разложения свиного субстрата, что подтверждается появлением горючего биотоплива за 6 суток. В сравнении с процессом, протекавшим при начальном запуске линии, применение рециркулята для разжижения свежего навоза повышает скорость образования биогаза в 2,3 раза (рисунок 5).

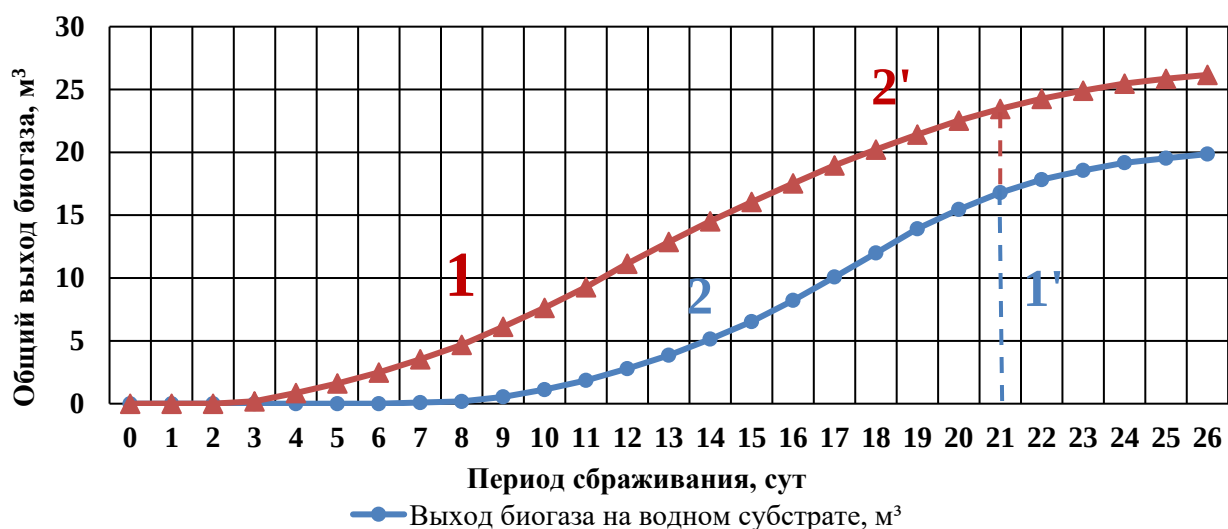


Рисунок 5 – Общий выход биогаза при добавлении рециркулята жидкой фракции эффлюента, содержащего психрофильную метаногенную микрофлору: 1 – субстрат свиного навоза, приготовленный на воде; 2 – субстрат свиного навоза, приготовленный на рециркуляте; 1' – точка опорожнения эффлюента на воде; 2' – точка опорожнения эффлюента на рециркуляте.

Итоги сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Параметры процесса анаэробного сбраживания

№	Показатели	Субстрат на воде	Субстрат на рециркуляте
1	Продолжительность сбраживания, сут	26	21
2	Температура сбраживания, °С	16-18	16-18
3	Влажность свежего навоза, %	88-89	88-89
4	Влажность субстрата, %	92-93	92-93
5	Влажность эффлюента, %	94-95	94-95
6	Период разложения субстрата, сут	7	3
7	Появление горючего биогаза, сут	12	6
8	Общий объем биогаза, м ³	19,86	23,46
9	Суточный выход биогаза, м ³ /сут	0,76	1,12
10	Период биометаногенеза, сут	20	19

Обоснована адекватность разработанной математической модели. Эмпирическое значение F-критерия Фишера равна 316,77, а критическое значение F-критерия Фишера для $k_1=1$, $k_2=n-2=21-2=19$, $\alpha=0,05$ равна $F_{\text{крит}}=4,38$.

Таким образом обосновано, что экспериментальные данные по выходу биогаза согласуются с теоретическим расчетом и подтверждают адекватность разработанной математической модели (рисунок 6).

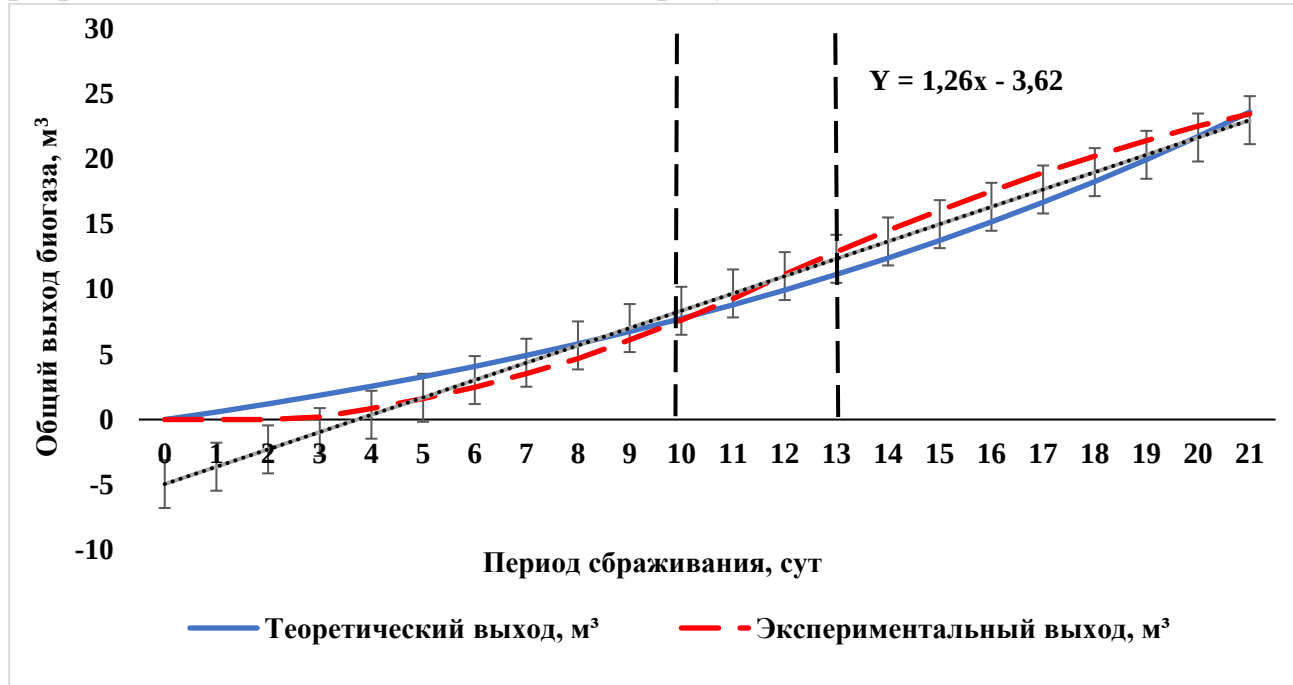


Рисунок 6 – Сравнение теоретических и экспериментальных результатов

В свинокомплексе «Хатасский» содержится от 70-75 голов хряков. В сутки образуют порядка 800 кг навоза, который вмещается в метантенк объемом 1,5 м³. Установлено, что эффективное разложение навоза в психрофильном накопительном режиме проходит за 21 день. Соответственно для переработки

навоза в 800 кг/сут необходима линия, содержащая 21 метантенк с объемами в $1,5 \text{ м}^3$. Технологическая схема предлагаемой линии приведена на рисунке 7.

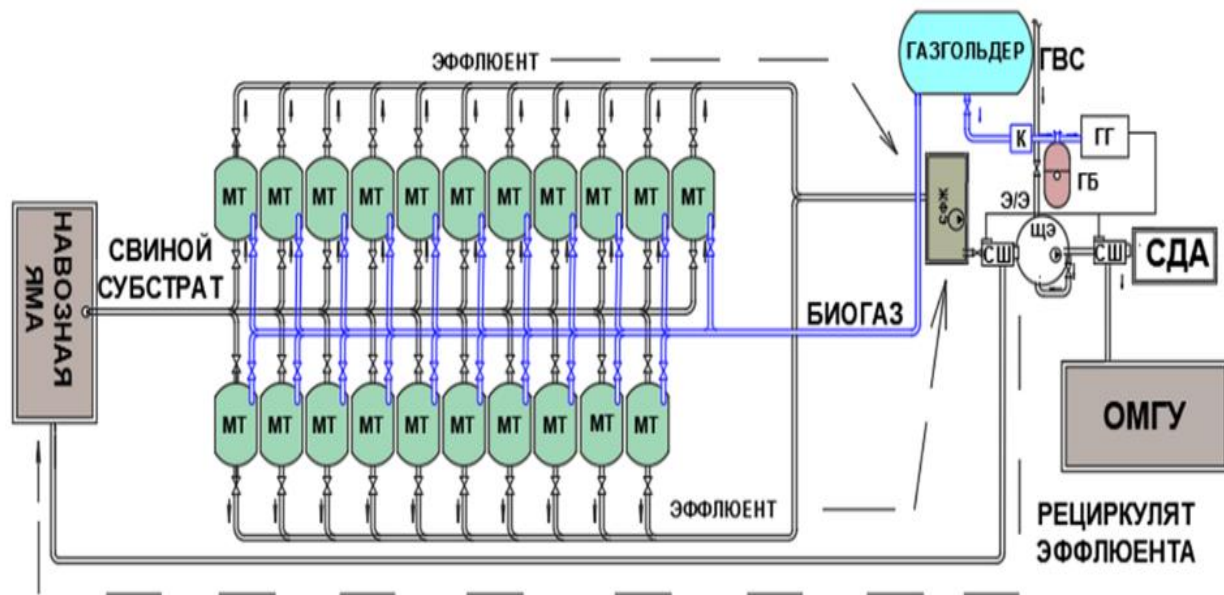


Рисунок 7 – Технологическая схема нового способа утилизации свиного навоза на основе биогазовой технологии: ГВС – горячая вода из системы водоснабжения; ГБ – метановые газовые баллоны; ГГ – газовый генератор; ЖФЭ – емкость для сбора эфлюента из метантенка; К – компрессор; МТ – накопительный метантенк; НАВОЗНАЯ ЯМА – навозная яма или емкость для подготовки субстрата свиного навоза; ОМГУ – органоминеральное гуминовое удобрение; СДА – емкость для сбора сырья для структурирующей добавки для асфальтобетона; СШ – шнековый сепаратор; ЩЭ – реактор для щелочной экстракции гуминовых веществ; погружные насосы для перекачивания субстрата, эфлюента и щелочного экстракта.

Таким образом, применение рециркулята не только экономит воду, но и ускоряет процесс разложения субстрата свиного навоза.

Результаты четвертого этапа. Установлено, что за 1 цикл полной работы 21 метантенка объемами $1,5 \text{ м}^3$ накопится 35 баллон биогаза от субстрата на воде и 41 баллон биогаза от субстрата на рециркуляте. Биогаз из баллонов подается в газогенератор марки «REG GG14-380-S» и преобразуется в альтернативное электричество, на котором запускается шнековый сепаратор Bauer 3.2-520 со шпальтовым ситом с ячейками 0,25 мм, мощностью электродвигателя 5,5 кВт и производительностью до $5-15 \text{ м}^3/\text{ч}$ и фекальный насос Fancy 100WQ50-7-2.2/2 мощностью 2,2 кВт. Данная система из сепаратора и насоса разделяет эфлюент на жидкую и твердую фракции и за час работы потребляют $4,18-4,62 \text{ м}^3$ биогаза. Соответственно, от утилизации 800 кг навоза образуется в среднем $22-37 \text{ м}^3$ биогаза, эквивалентного $44-74 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ электроэнергии. Таким образом, ожидаемого количества альтернативной электроэнергии будет более чем достаточно для обеспечения бесперебойной работы шнекового сепаратора и фекального насоса.

Далее приводятся параметры сепаратора и насоса при разделении эффлюента. Установлено, что для сепарации 800 кг эффлюента влажностью 94-95% требуется 0,49 м³ биогаза, что эквивалентно 0,97 кВт·ч электроэнергии. В результате разделения образуется 695 кг жидкого рециркулята и 105 кг твердого остатка. Удельный расход биогаза на переработку 1 тонны эффлюента составляет 0,61 м³.

Результаты пятого этапа. Твёрдая фракция эффлюента массой 105 кг и влажностью 65-70% подвергается щелочной экстракции в течение 4 ч. Для щелочной экстракции используется 425 кг однопроцентного раствора гидроксида калия.

Результаты шестого этапа. Щелочной экстракт разделяется на жидкую фракцию – ОМГУ (на удобрение получено положительное заключение от специализированной лаборатории) и твёрдую фракцию – сырьё для СДА. Далее также приводятся параметры сепаратора и насоса при разделении щелочного экстракта. Установлено, что для сепарации 530 кг щелочного экстракта влажностью 94-95% нужно затратить 0,35 м³ биогаза, эквивалентной 0,69 кВт·ч электроэнергии. После разделения получаем 443 кг ОМГУ с влажностью 97-98% и 87 кг сырья для СДА с влажностью 70-75%. Удельный расход биогаза на переработку 1 тонны щелочного экстракта составляет 0,66 м³.

В результате разделения щелочного экстракта получается два продукта – ОМГУ и СДА. В свою очередь, СДА – новый продукт, который предлагается применять в качестве модификатора асфальтобетонных смесей для сооружения площадок под хранение навоза.

В пятой главе «Экономическая эффективность применения технологической линии по утилизации свиного навоза» проведен расчет экономической эффективности предлагаемого способа утилизации. Капитальные затраты на изготовление технологической линии по безотходной утилизации свиного навоза составляют 7 393 600,00 рублей. Ожидаемые приведенные затраты составят 9 303,95 руб./т., при этом годовой доход от реализации всех товарных продуктов составит 8 357 300,4 руб./год. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологической линии по безотходному способу утилизации свиного навоза достигает 6 603 906,26 руб./год при сроках окупаемости менее двух лет. Рассчитанный срок окупаемости капитальных вложений составляет 1,12 год (около 13,44 месяца).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уточнены параметры накопительной психрофильной биогазовой технологии анаэробной переработки - с 1 кг субстрата свиного навоза, разбавленного водой до влажности 92-93%, образуется порядка 0,030 м³ биогаза с содержанием метана более 80%; период полного разложения составляет в среднем 26 дней.

2. Обоснован новый способ утилизации, позволяющий создать замкнутую, безотходную и ресурсосберегающую переработку бесподстилочного свиного навоза с получением 4 видов товарных продуктов – жидкого эффлюента, биогаза, органоминерального гуминового удобрения (ОМГУ) и структурирующей добавки для асфальтобетона (СДА). ОМГУ и СДА – новые продукты. На СДА получены Евразийский патент на изобретение №053350 и патент РФ на изобретение №2839275.

Усовершенствован процесс приготовления сбраживаемого субстрата путем разведения свежего навоза рециркуляционной жидкостью эффлюента, содержащего колонию активных метаногенных бактерий. При этом, скорость образования биогаза повышается в 2,3 раза; суточный выход биогаза увеличивается в среднем в 1,47 раз; период наиболее полного разложения субстрата сокращается с 26 дней до 21 дня, т.е. в 1,23 раза по сравнению с традиционной биогазовой технологией. Агрессивный отход не покидает пределов комплекса и утилизируется непосредственно в свиноводческом помещении.

При сепарации 1 т эффлюента получается 129 – 134 кг твердой фракции с влажностью 65-70% и 866-871 кг жидкой фракции эффлюента, обсемененной метаногенными бактериями (рециркулята). При этом сепаратор затрачивает ~ 1,22 кВт·ч электроэнергии эквивалентной 0,61 м³ биогаза.

Из 1 т жидкого эффлюента при щелочной экстракции получается более 550 кг органоминерального гуминового удобрения и более 109 кг сырья для структурирующей добавки для асфальтобетона.

Установлено, что для щелочной экстракции в 100 кг твердожидкого эффлюента следует вводить ~ 405 кг раствора 1,0%-го гидроксида калия и далее гомогенизировать экстракт в течении 4 ч.

3. Динамическая модель, раскрывает кинетику анаэробного разложения в психрофильном накопительном режиме сбраживания, с учетом этапов появления, продуцирования и метаболизма колонии психрофильных метаногенных бактерий, вводимых в свежий навоз с рециркуляционной жидкостью эффлюента. Доказано, что ее введение увеличивает среднесуточный выход биогаза с 0,95 м³/т до 1,4 м³/т со стабилизацией выхода на 8-9 сутки.

4. Рассчитана технико-экономическая эффективность разработанного нового способа утилизации: при капиталовложениях 7393600,00 руб. для утилизации около 300 т свиного навоза срок окупаемости составит 1,12 года (13,44 месяца), что свидетельствует о высокой экономической целесообразности и эффективности предлагаемого технического решения.

Рекомендации производству

Разработанный новый способ может использоваться для организации безотходной, ресурсосберегающей и замкнутой утилизации бесподстилочного свиного навоза на фермерских хозяйствах, ведущих деятельность в условиях Крайнего Севера.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие разработки темы будут направлены на повышение эффективности обеспечения экологической безопасности прифермских наземных навозохранилищ из монолитного асфальтобетона изготовленных с применением СДА

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях рекомендованных ВАК РФ

1. О.С. Едисеев. Разработка состава асфальтобетона для устройства площадки хранения твёрдых отходов животноводства [Электрон. ресурс]. Едисеев О.С., Друзьянова В.П. // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 2.

2. О.С. Едисеев. Технология переработки свиного эффлюента с получением нового продукта в виде структурирующей добавки асфальтобетона. Едисеев О.С., Друзьянова В.П. // Дальневосточный аграрный вестник – научное периодическое издание АПК Дальнего Востока. – 2025 – №2.

3. О.С. Едисеев. Обоснование экономико-математической модели эффективности предлагаемой технологической линии на основе биогазовой технологии. Едисеев О.С., Друзьянова В.П. // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления – научно-технический журнал – 2025 - №2

4. О.С. Едисеев. Динамическая модель процесса анаэробной утилизации субстрата, разжиженного рециркуляционной жидкостью эффлюента Едисеев О.С., Друзьянова В.П., Петров Н.В., Хитерхеева Н.С. // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 6.

В патентах и свидетельствах о государственной регистрации базы данных и программы для ЭВМ:

5. Евразийский патент на изобретение №053350, Способ получения модификатора для дорожного битума из отходов животноводства: №202592858: заявл: 30.10.2025: опубл: 07.05.2026 / Анисимов Е.В., Данилова С.Н., Друзьянова В.П., Едисеев О.С., Едисеева Е.В., Филиппов Д.В.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

6. Патент на изобретение №2839275 Российская Федерация. Способ утилизации отходов животноводства для получения модифицирующей добавки для дорожного битума/О.С. Едисеев, В.П. Друзьянова, С.Н. Данилова № 2024138807: заявл. 23.12.2024: опубл. 29.04.2025

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2025621821 Российская Федерация. Битумные вяжущие со структурирующей добавкой на основе переработанных твёрдых отходов свиноводства: 2025621228: заявл. 31.03.2025: опубл. 23.04.2025/ О.С. Едисеев; заявитель и правообладатель

Едисеев Олег Сергеевич.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661576 Российская Федерация. «Программа для вычисления гранулометрического состава грунтов «Грансостав»»: № 2024660502: заявл. 13.05.2024: опубл. 20.05.2024 / О. С. Едисеев; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Заказ №1721 подписано в печать 29.09.2026 г.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический
университет*

имени П.А. Костычева»

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1

*Отпечатано в издательстве учебной литературы и учебно-методических
пособий ФГБОУ ВО РГАТУ*

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1