

На правах рукописи



ЕГОРОВА ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
МЕТАНТЕНКА МАЛОГО ОБЪЕМА С
ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ
ДЛЯ УСЛОВИЙ РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)**

Специальность 05.20.01 – технологии и средства механизации
сельского хозяйства
(по техническим наукам)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Благовещенск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Якутская государственная сельскохозяйственная академия»

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Друзьянова Варвара Петровна

Официальные оппоненты: Осмонов Орозмамат Мамасалиевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, профессор

Васильев Филипп Александрович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», кафедра технического обеспечения АПК, доцент

Ведущая организация Азово-Черноморский инженерный институт - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрный университет»

Защита состоится «16» июня 2017 года в 9-00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.027.01 на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет», 675005, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Политехническая, д. 86, корпус 12, ауд. 82, тел./факс 8 (4162) 49-10-44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет» <http://www.dalga.ru/>

Автореферат разослан « ____ » апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Якименко Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Истощение запасов нефти и традиционных энергоресурсов, рост цен на них и обострение экологических проблем обусловили глобальный интерес к разработке и использованию биогазовой технологии для получения механической, тепловой, электрической энергий и биоудобрений. Биогазовая технология может быть использована для переработки многих видов органических отходов, навоза, сточных вод, отходов сельскохозяйственных культур улучшая при этом экологическую обстановку местности. Согласно статистическим данным на 1.08.2013 г. на территории Республики Саха (Якутия) ежегодный прирост биомассы в виде отходов животноводства составляет 2554416 т. В Якутии в виду климатических и территориальных условий затруднительна переработка производимого агропромышленного отхода. Отсутствие технологий по переработке навоза является одной из существенных причин увеличения заболеваемости сельских жителей онкологическими болезнями желудочно-кишечного тракта, дизентерией и инфекционными гепатитами. Исходя из вышеперечисленного, необходимо отказаться от практики вывоза неподготовленного навоза, получаемого в стойловый период на поля, принять меры по его обеззараживанию и переработке с целью снижения антропогенной нагрузки на экосистему и получения органически чистого удобрения и биогаза, а также необходимо проводить исследования, направленные на решение данной проблемы.

Работа выполнена в рамках следующих конкурсов и Грантов: конкурса академической мобильности для молодежи ученых и специалистов Республики Саха (Якутия) на участие в научных мероприятиях, проводимых за пределами Республики Саха (Якутия) в 2013-2014 гг.; Гранта для молодых ученых и аспирантов Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления 2014 г.; Гранта ректора Северо-Восточного Федерального университета имени М.К. Аммосова 2015 г.; гранта на обучение за рубежом на 2015-2016 уч. год по программе Erasmus Mundus Iamonet RU на базе университета Хойенхайм в Институте агротехники и биотоплива (Германия).

Степень разработанности темы. Вопросами исследований способов и технических средств по переработке органических отходов животноводства занимались Ильин С.Н., Костромин Д.В., Ковалев А.А., Милюков В.А., Lemmer A, Биркин С.М., Земсков В.И., Бондаренко А.М., Евтеев В.К., Васильев Ф.А., Осмонов О.М., Трахунова И. А., Чернышев А.А., Друзьянова В.П., Ожигов В.П., Некрасов В.Г., Кадысева А.А., Кудряшева А.В., Т. Yohaness, G. Zeeman, Баадер Б, Н. Naegele, Марченко Б.Д., Суслов Д.Ю. и другие. Анализ теоретических исследований позволяет утверждать, что процесс анаэробного сбраживания органических отходов, а также количественный выход целевых продуктов в виде удобрения и биогаза зависят в большей степени от опти-

мального подбора температурного режима, состава сырья, наличия перемешивающего устройства.

Научная гипотеза. Ускорение процесса сбраживания субстрата, позволяющего интенсифицировать производство биогаза, возможно путем обеспечения своевременного распределения колоний метаногенных микроорганизмов путем применения механического перемешивания и создания благоприятных условий для их жизнедеятельности в метантенке биоэнергетической установки.

Цель исследования: Обоснование параметров метантенка малого объема с перемешивающим устройством, обеспечивающего повышение эффективности переработки навоза крупного рогатого скота для условий Республики Саха (Якутия).

На основе поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследований:**

1. Провести анализ функционирования анаэробных технологий и технических средств производства органических удобрений и биогаза на основе навоза крупного рогатого скота.

2. Изучить математические модели, описывающие процесс анаэробного сбраживания и разработать модель процесса перемешивания субстрата механической мешалкой в метантенке биоэнергетической установки.

3. Обосновать оптимальные режимные и конструктивные параметры метантенка малого объема с перемешивающим устройством.

4. Провести оценку экономической эффективности применения метантенка малого объема с перемешивающим устройством в условиях Республики Саха (Якутия).

Объектом исследования является технологический процесс анаэробного сбраживания бесподстилочного навоза крупного рогатого скота в биоэнергетической установке.

Предмет исследования – закономерности механического возмущения в сбраживаемом субстрате в метантенке биоэнергетической установки.

Научная новизна. Обоснована эффективность переработки отходов животноводства в горизонтальном метантенке малого объема с перемешивающим устройством, работающего в мезофильном режиме. При этом выявлено, что наиболее предпочтительным является горизонтальное расположение вала перемешивающего устройства, когда лопасти мешалки расположены вертикально.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработана математическая модель процесса перемешивания в метантенке биоэнергетической установки согласно мощности затрачиваемой на перемешивание субстрата.

Установлен менее энергозатратный температурный диапазон при использовании мезофильного режима сбраживания, находящийся в пределах 32...34 °С.

Определено оптимальное количество перемешивающих суточных воздействий на сбраживаемый субстрат в метантенке малого объема позволяющее получать максимальный выход биогаза при минимальных энергозатратах.

Обосновано эффективное расположение вала, перемешивающего устройства в горизонтальном метантенке с целью получения однородности субстрата в метантенке, поддержания заданной температуры по всему объему метантенка и максимального выхода биогаза.

Рассчитаны значения коэффициентов лобового сопротивления c_x для сбраживаемого бесподстилочного навоза крупного рогатого скота с влажностями 92%, 94%, 96% и 98%. Величина c_x позволяет задать и подобрать оптимальные конструктивные размеры мешалок.

Методы исследований. В процессе работы проведены аналитические и экспериментальные исследования с использованием методов моделирования, оптимизации и математической статистики с применением ЭВМ. Исследования проводились в соответствии с действующими и разработанными методиками. Разработана и применена методика лабораторного исследования интенсивности анаэробного разложения перерабатываемого органического отхода при использовании различных расположений механической лопастной мешалки.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель процесса перемешивания субстрата в малом метантенке биоэнергетической установки;
- методика обоснования по подбору оптимального температурного диапазона, эффективного расположения вала перемешивающего устройства и рационального количества перемешивающих суточных воздействий на сбраживаемый субстрат в мезофильном режиме работы биоэнергетической установки;
- результаты экспериментальных исследований процесса анаэробного сбраживания, позволяющие разработать технологию энергоэффективного мезофильного сбраживания бесподстилочного навоза в биоэнергетической установке малого объема с горизонтальным валом перемешивающего устройства.

Степень достоверности и апробации результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается достаточным объемом экспериментальных исследований с использованием современных средств измерения, высокой степенью сходимости теоретических и экспериментальных данных и результатов сравнительных испытаний. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-практических конференциях: ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления», Конференция преподавателей и аспирантов посвященная 20-летию образования ВСГТУ-ВСГУТУ, (Улан-Удэ, ВСГУТУ, 2014); Международной научно-практической конфе-

ренции молодых учёных «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (Иркутск, ИрГСХА, 2014); Международной научно-практической конференции 10th European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences (Штуттгарт, Университет Хойенхайм, 2015); Научно-практической конференции участников обменной программы Erasmus Mundus 2015-2016 уч. года (Штуттгарт, Университет Хойенхайм, 2016); Научной конференции преподавателей и аспирантов ВСГТУ-ВСГУТУ, ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления» (Улан-Удэ, ВСГУТУ, 2016).

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, лабораторные установки используются в учебном процессе в лаборатории «Альтернативные источники энергии» при проведении лекционных и лабораторно-практических занятий на автодорожном факультете СВФУ им. М.К. Аммосова. Смонтирована пилотная производственная установка с метантенком в 1 м³ в животноводческом комплексе СЖПК «Кэскил», Республики Саха (Якутия).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 6 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 патента на изобретения и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографического списка и приложений. Она изложена на 159 страницах, включает 29 таблиц, 34 рисунка, 21 приложение. Список литературы включает 130 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована ее научная новизна, приведены методы исследования и положения, выносимые на защиту, приведено краткое изложение работы.

В первой главе проведен обзор и анализ анаэробных технологий по производству удобрения и биогаза на основе полужидкого навоза и технических средств для их реализации. Существующие анаэробные технологии энергоемки и металлоемки, разнообразны по конструкции, и в основном подходят для применения в больших животноводческих комплексах.

Основной вклад в изучение процесса анаэробного сбраживания внесли следующие зарубежные и отечественные ученые: В. Баадер, М. Беккер, В. Бишофсбергер, Д. Блумберг, Я. Вртовшек, Н. Дихтл, В. Дубровскис, К. Зейфрид, Г. Зупанчич, Б. Крауткремер, Н. Леттинг, Б. Линке, В. Маслич, С. Някоу, Е.С. Панцхава, А.А. Ковалев, В.П. Павличенко, К. Розенвинкель, Р.А. Амерханов, Т.Я. Андрихин, П.И. Гриднев, В.П. Лосяков, А.Г. Пузанков, А.М. Бондаренко, И.Д. Гришаев, Л.И. Гюнтер, Г.А. Заварзин, В.И. Земсков, Н.Г. Ковалев, Р.А. Мельник, В.К. Евтеев, Ф.А. Васильев, О.М. Осмонов, Д. Шмак, В.М. Шрамков, Марченко В.И. и др.

Изучены установки для переработки отходов, имеющиеся в агропромышленном комплексе России и за рубежом, обоснована возможность развития применения биогазовой технологии в Республике Саха (Якутия).

В условиях Якутии, где преобладают частные животноводческие хозяйства с малым поголовьем животных, на наш взгляд, подходят биоустановки с малыми метантенками. Они занимают малые площади скотопомещений и всегда имеется возможность увеличения их количества, т.е. модульное внедрение. Для повышения эффективности биоустановок, вследствие расслоения перерабатываемого субстрата и метанового сообщества бактерий внутри установок, следует предусматривать перемешивающие устройства.

В биоустановках применяют следующие системы перемешивания: гидравлический; механический; барботажный; комбинированный. Наиболее простыми в эксплуатации, обслуживании и изготовлении в условиях сельской местности являются механические перемешивающие устройства. Данные устройства классифицируются на следующие виды: шнековые, лопастные (скребковые), якорные, рамные, листовые и пропеллерные. Исходя из условий распространенности и легкости обслуживания, для применения в метантенках выбраны лопастные мешалки.

Метантенк можно расположить либо в стоящем положении (вертикально) либо в лежащем (горизонтально). Вертикальные метантенки в основном имеют круглую форму поперечного сечения. Исследованиями зарубежных и отечественных ученых установлено, что по сравнению с горизонтальным расположением, вертикальные имеют преимущество в том, что более компактны, имеют более выгодное соотношение площади поверхности к объему, когда уменьшаются затраты материалов и теплопотери. При горизонтальном расположении огромное преимущество в том, что достигается хороший эффект перемешивания, благодаря вертикально направленным лопастям мешалки при вращении которых образуется тангенциальное течение поднимающее осевший слой субстрата и разрушение образовавшейся корки. Исходя из вышесказанного, нами выбран горизонтальный метантенк.

В соответствии с поставленной целью исследований и принятой рабочей гипотезой сформулированы задачи исследований.

Во второй главе изучены математические модели, описывающие процесс анаэробного разложения органического субстрата и определены основные факторы, влияющие на выход биогаза:

$$V_B = f(W, V_c, t, V_{EC}, \tau, \sigma, V_M, n, S, z, \alpha, k), \quad (1)$$

где W – влажность, %; V_c – объем сырья, m^3 , t – температура перерабатываемого сырья, °C; V_{ec} – доза ежесуточной загрузки сырья, кг; τ – период выдержки, сут; σ – время гомогенизации перемешиваемой среды, ч.; V_M – объем метантенка, m^3 ; n – частота вращения перемешивающего устройства, об/мин; S – площадь лопасти мешалки, m^2 ; z – количество лопастей, шт.; α – расположения мешалки; k – периодичность перемешивания, раз/сут.

Однако, в изученных работах описываются модели химических реакций и кинематических зависимостей выхода биогаза, не учтены процесс своевременного и равномерного распределения субстрата, содержащего как новообразованные метаногенные микроорганизмы, так и продукты их жизнедеятельности, недостаточно описан и раскрыт процесс массопереноса.

Согласно третьему уравнению работы Друзьяновой В.П. модель процесса сбраживания навоза крупного рогатого скота в анаэробной среде имеет следующий вид:

$$\frac{dP}{dt} = \tau j_P T - M - \bar{M}; \quad (2)$$

где T , P – концентрации сбраживаемого навоза и продукта метаболизма, кг/т; τ – продолжительность анаэробного сбраживания, сут.; j_P – удельные скорости образования продукта метаболизма, сут⁻¹; M и \bar{M} скорости массообмена субстрата и продуктов метаболизма при переходе из одной фазы в другую, кг/т·сут.

Данная модель учитывает зависимость образования продукта метаболизма от скорости массообмена субстрата и скорости продуктов метаболизма, как основные факторы, интенсивно воздействующие на процесс эффективной деструкции органического вещества навоза.

Таким образом можно говорить, что выход биогаза определяется перемешиванием субстрата:

$$V_B = \int (N_{\text{ПЕР}}) \quad (3)$$

В настоящее время требуемая мощность перемешивания субстрата не выявлена. Однако, в своей работе Друзьянова В.П. учитывает процесс спонтанного (естественного) перемешивания и обосновывает, что скорость биогазовых пузырей и их диаметры имеют малые величины и недостаточны для обеспечения оптимального перемешивания сбраживаемого субстрата.

Исходя из этого нами предложена следующая модель для описания мощности механического перемешивания в метантенке биоэнергетической установки:

$$N_{\text{П}} = N_{\text{М}} + N_{\text{СП}} \quad (4)$$

где $N_{\text{М}}$ – мощность, затрачиваемая на перемешивание, кВт; $N_{\text{СП}}$ – мощность спонтанного перемешивания, кВт.

Классическая методика расчета мощности перемешивания оперирует методами теории геометрического подобия мешалок и может быть рассчитана по формулам:

$$N_{\text{М}} = K_n \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5; \quad (5)$$

где K_n – критерий мощности; ρ – плотность перемешиваемой среды, кг/м³; n – частота вращения мешалки, об/с; d – диаметр мешалки, м.

$$\frac{N}{\mu \cdot n^2 \cdot d^3} = C \cdot Re_{\text{ц}}^{\alpha} \cdot Fr_{\text{ц}}^{\beta} \cdot \Gamma_1^{\gamma} \dots z_1 \cdot z_2, \quad (6)$$

где C – коэффициент, зависящий от типа мешалки; $Re_{\text{ц}}$ – центробежный критерий Рейнольдса; ρ – плотность субстрата, кг/м³; $Fr_{\text{ц}}$ – центробежный критерий Фруда; Γ_1 – критерий Гартмана; z_1 , z_2 – критерии геометрии мешалки.

рий Фруда; g – ускорение свободного падения, м/с²; Γ_1, Γ_2 – симплексы геометрического подобия; C, α, β, c – коэффициенты мощности и симплексов подобия; z_1, z_2 – число лопастей и отражающих устройств в установке.

Но поскольку мешалка находится в «живой» среде, то необходимо учитывать более точные конструктивные параметры мешалок, свойства перерабатываемого субстрата и их оптимальные значения для наиболее эффективной работы мешалки.

Мы предлагаем величину мощности, затрачиваемую на перемешивание, рассчитать на основании закона гидродинамики, при котором перемешивание сводится к внешнему обтеканию тел потоком жидкости. При движении в вязкой среде мешалки любой формы преодолевают силу F , которая является результирующей двух возникающих сил – силы лобового сопротивления F_X (гидродинамического сопротивления) и подъемную силу F_y , которая направлена перпендикулярно потоку жидкости.

Мощность, необходимая для массообмена в метантенке, сообщается субстрату посредством вращения мешалки (N_M), имеющей несколько лопастей:

$$N_M = (\omega \cdot M_{кр}) \cdot z_l \quad (7)$$

где ω – угловая скорость вращения мешалки, с⁻¹; $M_{кр}$ – крутящий момент на валу мешалки, Н·м; z_l – количество лопастей.

Крутящий момент на валу мешалки рассчитывается как произведение силы гидродинамического сопротивления вращению F_X на плечо этой силы:

$$M_{кр} = z_x \cdot F_x \quad (8)$$

В свою очередь, сила сопротивления вращению на одной лопасти:

$$F_x = C_x \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}; \quad (9)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления лопасти; S – объем лопасти, м³; ρ – плотность перемешиваемой среды, кг/м³.

Зная, что эффективность перемешивания достигается площадью лопасти, характеризующей размер лопасти, направленной перпендикулярно к направлению движения получим:

$$F_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} ab; \quad (10)$$

где a – ширина лопасти, м; b – высота лопасти, м.

Рассмотрим лопасть как множество сечений с постоянной толщиной и высотой (Z), на которые действует сила сопротивления, движущаяся с постоянной скоростью $v = \omega Z$ в вязкой среде субстрата и получим уравнение:

$$dF_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} adZ; \quad (11)$$

Решая данное уравнение получим:

$$F_x = \int_0^b C_x \frac{\rho v^2}{2} a dZ = \int_0^b \frac{C_x \rho (\omega Z)^2 a dZ}{2} = \frac{C_x \rho \omega^2 a}{2} \int_0^b Z^2 dZ = \frac{C_x \rho \omega^2 a b^3}{6}; \quad (12)$$

Выведем плечо действия силы Z_x :

$$\begin{aligned} Z_x &= \frac{\int_0^b Z dF_x}{F_x} = \frac{\int_0^b \frac{C_x \rho (\omega Z)^2 a b Z}{2}}{F_x} = \frac{C_x \rho \omega^2 a}{2} \frac{\int_0^b Z^3 dZ}{F_x} = \\ &= \frac{\frac{C_x \rho \omega^2 a b^4}{2 \cdot 4}}{\frac{C_x \rho \omega^2 a b^3}{6}} = \frac{\frac{C_x \rho \omega^2 a b^4}{8}}{\frac{C_x \rho \omega^2 a b^3}{6}} = \frac{b \cdot 6}{8} = \frac{3b}{4} \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, принимаем значение плеча:

$$Z_x = \frac{3b}{4} \quad (14)$$

С учетом полученного значения плеча, определим крутящий момент по формуле:

$$M_{кр} = F_x \cdot \frac{3b}{4} = \frac{C_x \rho \omega^2 a b^3}{6} \cdot \frac{3b}{4} = \frac{C_x \rho \omega^2 a b^4}{8}; \quad (15)$$

Определим мощность, необходимую на перемешивание субстрата внутри метантенка и с учетом необходимого количества лопастей получим следующую формулу:

$$N_M = (M_{кр} \cdot \omega) \cdot Z_L = \left(\frac{C_x \rho \omega^3 a b^4}{8} \right) \cdot Z_L; \quad (16)$$

где M_c - крутящий момент, возникающий на валу мешалки, Н·м; ω – угловая скорость вращения лопасти мешалки, с⁻¹; C_x – коэффициент лобового сопротивления; ρ – плотность субстрата, кг/м³; Z_L – количество лопастей, ед.; a – высота лопасти, м; b – высота лопасти, м.

Коэффициент лобового сопротивления лопасти C_x зависит от числа Рейнольдса:

$$C_x = f(Re) \quad (17)$$

Значение коэффициента лобового сопротивления лопасти C_x необходимо определить экспериментальным путем, поскольку плотность и динамическая вязкость зависит от температуры сбраживаемого субстрата.

В третьей главе, «Методика исследования» представлена методика исследований, состоящая из следующих этапов:

Этап 1. Обоснование наименее затратного отрезка температур в мезофильном режиме работы биоустановок. Исследования проведены на базе университета Хойенхайм в Институте агротехники и биотоплива (Германия). Использованы 15 горизонтальных лабораторных установок объемами 0,02м³ каждая (рис. 1). Температуры сбраживания: 25° С; 33° С и 40° С в течении 60 дней одновременно с возможным отклонением ±1° С.



Рисунок 1- **Внешний вид лабораторных установок.** Объемы метантенков - 17 л.1 - цилиндр объемом 0,02 м³; 2 - водяная рубашка 3- водяной котел 4 - патрубков для загрузки сырья; 5 - выгрузочный патрубок 6 - электрический привод с частотой вращения 60 об/мин; 7 - гибкие газовые трубы d=8мм.; 8 – газгольдер; 9 - водяной фильтр; 10 - сенсоры для определения объема CH₄, CO₂ и H₂S, а также датчики температуры и давления.

2 этап. Исследования проведены в лаборатории якутской государственной сельскохозяйственной академии. Изготовлен лабораторный стенд (рис.2-I), состоящий из четырех метантенков. Были использованы четыре баллона цилиндрической формы объемами 0,02 м³ (1), установленные на опоры (2). Данные цилиндрические баллоны повторяют общую конструкцию запатентованного метантенка, который был взят за основу. В установках поддерживалась ранее выбранная рабочая температура в 33⁰ С. Влажность загружаемого навоза крупного рогатого скота составляет 93-95%. Для отслеживания температуры субстрата внутри баллонов были установлены термодатчики, которые через терморегулятор (4) приводили в действие нагревательную ленту (3).

В трех лабораторных установках предусмотрены перемешивающие устройства (рис 2-II, поз. а, б, в). Одна контрольная установка без перемешивающего устройства (рис.2-II, поз. г).

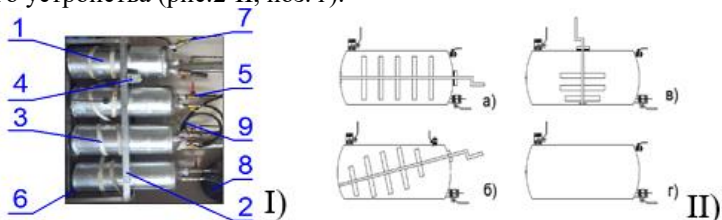


Рисунок 2 – **Лабораторный стенд. I) Общий вид** 1 – емкость для рабочего субстрата; 2 – опора; 3 – нагревательная лента; 4 – терморегулятор; 5 – патрубок для загрузки рабочего субстрата; 6 – патрубок для разгрузки отработанного субстрата; 7 – патрубок для вывода биогаза; 8 – газгольдер (автомобильная шина); 9 – соединительные шланги.

II) Виды расположения мешалок а) с горизонтальным перемешивающим устройством; б) с перемешивающим устройством, расположенным под углом 30⁰; в) с вертикальным перемешивающим устройством; г) без перемешивающего устройства.

3 этап. Определение оптимального режима перемешивания субстрата в метантенке с помощью лопастной механической мешалки. Сборочный стенд изображен на рис. 1. Исследования проведены на базе университета Хойенхайм в Институте агротехники и биотоплива (Германия). Применено пятнадцать горизонтальных метантенков объемами 0,02м³. Рассмотрены 6 режимов перемешивания: спонтанное (естественное), непрерывное (каждые 5 мин. перемешивания и 5 мин. простоя), 2 раза в сутки по 10 мин., 4 раза в сутки по 10 мин., 8 раз в сутки по 10 мин., 24 раза в сутки по 10 мин. Режим сбраживания мезофильный (33⁰С). Влажность субстрата в пределах 92-95%, рН в пределах 7,21-7,66. Продолжительность эксперимента для каждого режима составила 30 дней.

4 этап. Для определения коэффициента лобового сопротивления (c_x) провели лабораторные исследования по определению динамической вязкости (μ) навоза. Для этого использовали сосуд высотой 0,7 м., который был заполнен навозом с влажностями 92, 94, 96, 98 % и температурой 33⁰ С, равной температуре сбраживаемого субстрата в метантенке. Для определения μ в сосуд опускали стальные шарики различных диаметров (d=10,11,12 мм). Диаметры шаров измерялись штангенциркулем. Оборудование и инструменты: весы, термометр, сосуд высотой 0,7 м., штангенциркуль, стальные шарики, секундомер.

Для проведения производственных экспериментов изготовлена пилотная горизонтальная биогазовая установка. Установка изготовлена согласно ГОСТ Р 53790-2010. Соблюдены условия изготовления, к которым относятся: водо- газонепроницаемость, наличие загрузочного и выгрузочного отверстия, теплоизоляция, минимальная площадь поверхности и наличие контрольно-измерительных приборов (рис. 3).

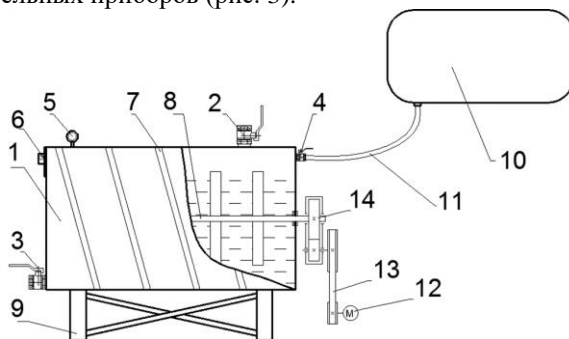


Рисунок 3 - **Общий вид пилотной горизонтальной биогазовой установки:** 1 – метантенк; 2 – патрубок для загрузки свежего субстрата; 3 – патрубок для разгрузки отработанного субстрата; 4 – патрубок для отвода биогаза; 5 – датчик давления; 6 – терморегулятор; 7 – нагревательная лента; 8 – механическая мешалка; 9 – опора; 10 – газгольдер; 11 - соединительный шланг; 12 – двигатель; 13 – ременная передача; 14 – цилиндрический редуктор.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований по четырем этапам.

Результаты I этапа. По обоснованию оптимальной температуры сбраживания построен график по выходу биогаза (рис.4).

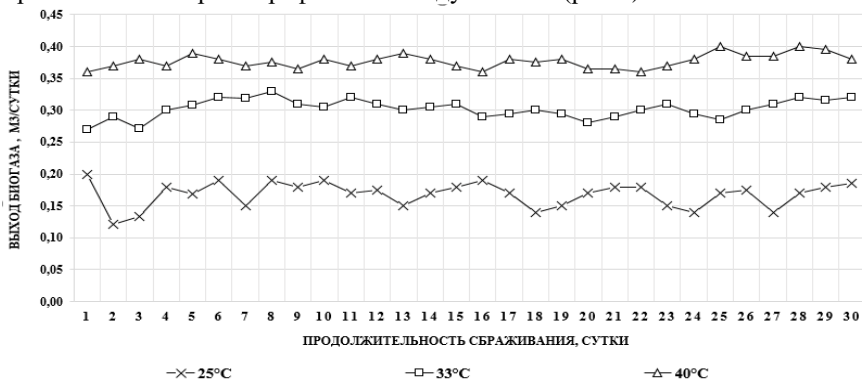


Рисунок 4 - Выход биогаза из лабораторных установок в зависимости от температуры, м³/кг СОВ сутки

Как видно с графика, выход биогаза во всех установках протекал по-разному. Наиболее высокий показатель достигнут при температуре 40°C - 0,38 м³/кг СОВ в сутки. При температуре 33°C средний выход биогаза составил 0,30 м³/кг СОВ в сутки. При температуре 25°C - 0,17 м³/кг СОВ.

Соответственно, выход биогаза при 40°C больше в 1,6 раз, чем при температуре 32°C; и больше в 2,9 раз, чем при температуре 24°C. Однако, энергозатраты для поддержания постоянной температуры при 40°C больше в 1,8 раз, чем при температуре 24°C; и больше в 1,4 раза, чем при температуре 33°C. На графике (рис. 5) представлена энергоэффективность каждого температурного режима.

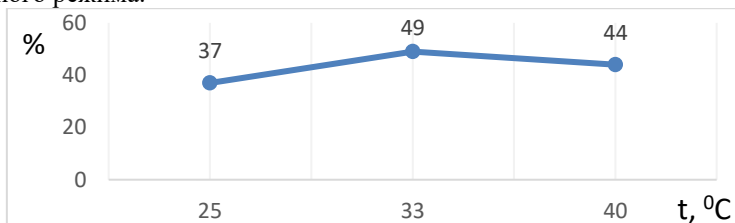


Рисунок 5 - Энергоэффективность температур в мезофильном режиме работы биоэнергетической установки

Результаты II этапа: выявлено, что наиболее эффективным расположением вала перемешивающего устройства является горизонтальное расположение вала, где лопасти расположены вертикально, что подтверждается

объемами выработанного биогаза: с вертикальным перемешивающим устройством – $0,14\text{ м}^3/\text{кг СОВ}$ в сутки, с горизонтальным перемешивающим устройством - $0,30\text{ м}^3/\text{кг СОВ}$ в сутки, с перемешивающим устройством, расположенным под уклоном 30° - $0,20\text{ м}^3/\text{кг СОВ}$ в сутки, без перемешивающего устройства – $0,12\text{ м}^3/\text{кг СОВ}$ в сутки (рис. 6).



Рисунок 6 - Выход биогаза из лабораторных установок с различной установкой перемешивающего устройства, $\text{м}^3/\text{кг СОВ}$ в сутки

Как видно по результатам, при горизонтальном расположении вала мешалки объем биогаза больше в 2,1 раз от вертикального расположения; в 1,5 раз от расположения вала, под углом 30° и в 2,5 раз от контрольной установки без перемешивания.

Полученные данные, говорят о том, что наиболее эффективным является перемешивание сбраживаемого субстрата при лопастях, расположенных вертикально. Это связано с тем, что образованным в процессе метангенерации пузырькам газа необходима помощь для всплытия к поверхности и перерабатываемый субстрат имеет свойство оседать на дне. Именно данное расположение лопастей позволяет выполнить качественный массообмен внутри метантенка и увеличить производство качественного удобрения и выход биогаза.

Результаты III этапа. Уточнен оптимальный режим перемешивания сбраживаемого субстрата скребковой мешалкой, согласно данных приведенных на рис. 7. Максимальный показатель выхода биогаза – $0,29\text{ м}^3/\text{кг СОВ}$ в сутки приходится на четыре режима перемешивания: непрерывный и 4, 8 и 24 раза в сутки. Наименьший выход биогаза получен при спонтанном режиме перемешивания и составил $0,15\text{ м}^3/\text{кг СОВ}$. При непрерывном перемешивании и в режимах 4, 8, 24 раза в сутки выход биогаза варьируется в пределах $0,28$ до $0,32\text{ м}^3/\text{кг СОВ}$ в сутки, что соответствует стандартным значениям выхода биогаза из навоза крупного рогатого скота.

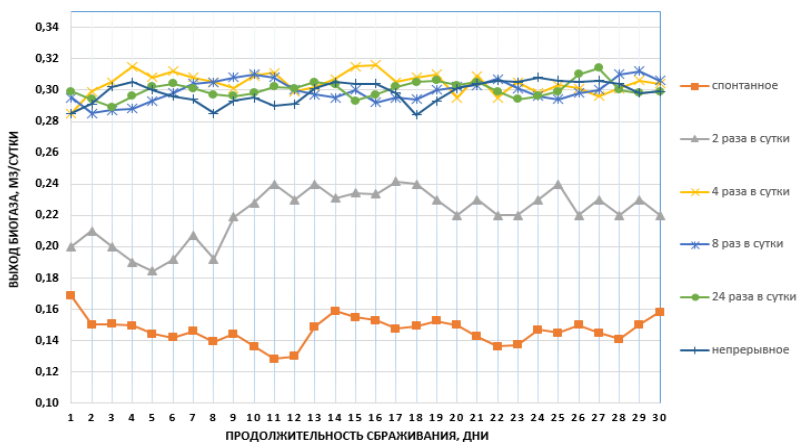


Рисунок 7 - Выход биогаза в зависимости от режима перемешивания механической мешалки, м³/кг ОСВ сутки

При цикличности перемешиваний в 4, 8, 24 раз в сутки и непрерывном способе, процесс разложения органического вещества сбраживаемого субстрата почти одинаковый. При этом выявлена следующая закономерность, показанная на рисунке 8.

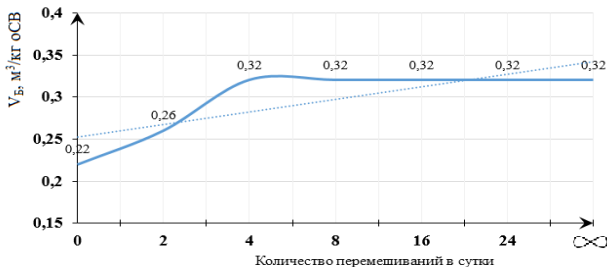


Рисунок 8 –Закономерность выхода биогаза от количества суточных воздействий на сбраживаемый субстрат

Поэтому в целях экономии энергозатрат предлагаем использовать цикличность перемешивания 4 раза в сутки.

Результаты IV этапа. Определен коэффициент лобового сопротивления (С_х) лопасти мешалки, который зависит от числа Рейнольдса и кинематической вязкости субстрата. Для различной влажности бесподстилочного навоза КРС были определены зависимости от влажности, представленные на рис. 9.

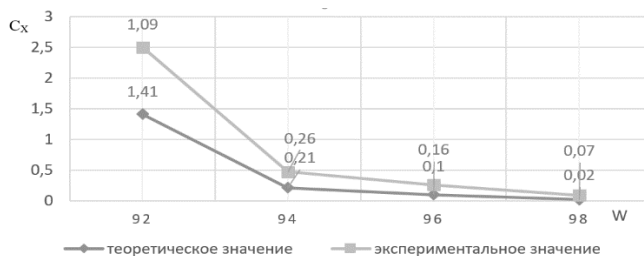


Рисунок 9 - Теоретическое и экспериментальное значение коэффициента лобового сопротивления (C_x)

Как видно из графика, полученные экспериментально значения C_x при различных влажностях имеют отличные от литературных данных значения. Это говорит о том, что при расчетах мощности определяется точное значение данного коэффициента для субстрата определенной влажности.

Оценка адекватности экспериментальных исследований

Данные экспериментальных исследований были обработаны с помощью программы Statistica 13.2. На основании априорного ранжирования, выбраны наиболее значимые параметры от которых зависит объем вырабатываемого газа (V_B) и заданы уровни их варьирования:

$$V_B = f(C_x, \omega, a, z_{л}), \text{ м}^3 \quad (18)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления; $C_x = 0,02 \dots 1,15$; ω – частота вращения; $\omega = 20 \dots 100$ об/мин; a – ширина лопасти мешалки; $a = 0,03 \dots 0,07$ м; $z_{л}$ – количество лопастей мешалки; $z_{л} = 2 \dots 8$ шт.

Получено уравнение в канонической форме, характеризующая выход биогаза в зависимости от частоты вращения ω (x_1) и коэффициента лобового сопротивления C_x (x_2):

$$V_6 = 0,2357 - 1,0124 \cdot E-13 \cdot x_1 + 0,955 \cdot x_2 + 8,1687 \cdot E-16 \cdot x_1^2 + 4,97 \cdot E-15 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,519 \cdot x_2^2 \quad (19)$$

Оптимальные значения факторов: $x_1 = 50 \dots 70$ об/мин; $x_2 = 0,07 \dots 1,09$.

Уравнение выхода биогаза в зависимости от количества лопастей и коэффициента лобового сопротивления в канонической форме:

$$V_6 = 0,2357 + 2,3975 \cdot E-13 \cdot x_1 + 0,955 \cdot x_2 - 2,4824 \cdot E-14 \cdot x_1^2 + 1,4475 \cdot E-14 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,519 \cdot x_2^2 \quad (20)$$

Оптимальные значения факторов: $x_1 = 4 \dots 6$; $x_2 = 0,07 \dots 1,09$.

Уравнение в канонической форме, характеризующая выход биогаза в зависимости от частоты вращения ω (x_1) и ширины лопасти мешалки a (x_2):

$$V_6 = 3,3825 - 0,0405 \cdot x_1 - 0,0675 \cdot x_2 + 0,0003 \cdot x_1^2 - 1,2054 \cdot E-15 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0007 \cdot x_2^2 \quad (21)$$

Оптимальные значения факторов: $x_1 = 50 \dots 70$ об/мин; $x_2 = 0,04 \dots 0,06$ м.

Уравнение выхода биогаза в зависимости от частоты вращения ω (x_1) и количества лопастей $z_{л}$ (x_2) в канонической форме:

$$V_6 = 3,3825 - 0,0405 \cdot x_1 - 0,675 \cdot x_2 + 0,0003 \cdot x_1^2 - 6,9597 \cdot E-15 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0675 \cdot x_2^2 \quad (22)$$

Оптимальные значения факторов: $x_1=50 \dots 70$ об/мин; $x_2=4 \dots 6$.

В пятой главе рассчитана эколого-экономическая эффективность, получаемая от одной установки объемом в 1 м^3 . Годовые затраты на поддержание температуры составляют 7,1 тыс. руб., затраты на перемешивание - 0,4 тыс. руб. Количество получаемой товарной энергии из биогаза составляет 4275,97 МДж, что составляет 0,141 т у.т. и 9,11 тыс. руб. Годовой экономический эффект составит 24,29 тыс. руб. Срок окупаемости 4,7 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. Перспективной технологией переработки бесподстилочного навоза крупного рогатого скота в высококачественное органическое удобрение является его переработка в мезофильном малом метантенке с перемешивающим устройством (патенты №2540019; №2540326). Данная технология снижает энергозатраты и позволяет получать качественное минерализованное удобрение, легкоусвояемое растениями.
2. На основе результатов теоретических исследований получены зависимости для определения режимных, геометрических и энергетических параметров метантенка с перемешивающим устройством. Получены канонические уравнения для определения оптимальных значений факторов.
3. Получена математическая модель анаэробного сбраживания, учитывающая не только кинетику деструкции органического вещества сбраживаемого навоза, но и воздействие интенсифицирующего процесс фактора - механического перемешивания на сбраживаемый субстрат.
4. По результатам проведенных исследований обоснованы основные конструктивные и режимные параметры мешалок малых метантенков: количество лопастей мешалки $z=5$; ширина лопастей $a = 0,05$ м. Тогда, при мощности мешалки $N=0,15$ кВт, частота вращений $n=50$ об/мин. При $N=0,3$ кВт, соответственно, $n = 60$ об/мин. При $N=0,42$ кВт, соответственно, $n = 70$ об/мин. При $N=0,63$ кВт, соответственно, $n = 80$ об/мин.
5. Основной технологический параметр – производительность мешалки составляет от 4,4 до 6,2 т/ч при кратности перемешивания 4 раза в сутки.
6. Рассчитана эколого-экономическая эффективность, получаемая от одной установки объемом в 1 м^3 . Годовые затраты на поддержание температуры составляют 7,1 тыс. руб., затраты на перемешивание - 0,4 тыс. руб. Количество получаемой товарной энергии из биогаза составляет 4275,97 МДж, что составляет 0,141 т у.т. и 9,11 тыс. руб. Годовой экономический эффект составит 24,29 тыс. руб. Срок окупаемости 4,7 лет.

Предложения и рекомендации производству.

1. По результатам проведенных исследований установлены оптимальный температурный диапазон при мезофильном режиме, который находится в

пределах 32-34 °С, цикличность перемешивания, равная 4 раза в сутки. Использование данных значений позволит не только интенсифицировать процесс метангенерации, но и снизить внешние затраты на электроэнергию.

2.Рекомендуется организовать серийное производство метантенков малого объема в мезофильной технологии, позволяющих перерабатывать навоз крупного рогатого скота в органическое удобрение при минимальных энергозатратах (8,13 кВт) и производительности 5,3 т/ч для использования в малых животноводческих хозяйствах Республики Саха (Якутия).

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования предусматривают автоматизацию контроля за процессом дозированной загрузки свежего навоза крупного рогатого скота в метантенк биоэнергетической установки.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

а) в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кобякова Е.Н. Ресурсосберегающие технологии производства кормовых добавок для птицеводства Якутии с использованием вторичного животноводческого сырья / Е.Н. Кобякова, В.П. Друзьянова, С.А. Петрова // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство, №10 – г. Москва, 2011г., С. 56-59
2. Кобякова Е.Н. Возможности использования биогаза в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания / Е.Н. Кобякова, В.П. Друзьянова, Н.В. Петров//Научно-теоретический журнал «Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В. Р. Филиппова», № 1 (34) январь-март, г. Улан-Удэ, 2014. С. 71-75
3. Кобякова Е.Н. Перспективы применения продуктов биогазовой технологии в агропромышленном секторе РС (Я) / Е.Н. Кобякова, В.П. Друзьянова, Н.В. Петров, С.А. Петрова // Научно-теоретический журнал «Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В. Р. Филиппова», № 2 (35) апрель-июнь, г. Улан-Удэ, 2014. С. 56-61
4. Кобякова Е.Н. Обоснование применения перемешивающего устройства в биогазовой установке для малых животноводческих хозяйств / Е.Н. Кобякова, С.С. Ямпиллов, В.П. Друзьянова // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления №4, 2014г., Улан-Удэ, С.13-19
5. Кобякова Е.Н. Фильтр для очистки биогаза для получения моторного топлива / Е.Н. Кобякова, В.П. Друзьянова, О.П. Семенова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока № 1: г. Новосибирск, 2015 – с. 236-238.
6. Кобякова Е.Н. Исследование выхода биогаза при различных температурах мезофильного режима в биогазовых установках малого объема / Е.Н. Кобякова, С.С. Ямпиллов, В.П. Друзьянова // Вестник Восточно-Сибирского госу-

дарственного университета технологий и управления №3 (60), 2016г., Улан-Удэ, С.5-13

б) в сборниках научных трудов:

7. Кобякова Е.Н. Перспектива применения биогазовой установки в с. Булгунняхтах Хангаласского улуса / Е.Н. Кобякова // Материалы IV Ларионовских чтений: сборник научных трудов – Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН, 2009. С. 37-38.
8. Кобякова Е.Н. Краткое технико-экономическое обоснование использования биогаза в с. Булгунняхтах Хангаласского улуса / Е.Н. Кобякова // Материалы круглого стола «Благоустройство жилья – требование времени». – Якутск, «Фонд содействия развитию культуры, науки, образования» Республики Саха (Якутия), 2009.
9. Кобякова Е.Н. Ресурсосберегающие технологии производства кормовых добавок для птицеводства Якутии с использованием вторичного животноводческого сырья / Е.Н. Кобякова, В.П. Друзьянова, С.А. Петрова // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство, №10 – г. Москва, 2011г., С. 56-59
10. Кобякова Е.Н. Органические отходы животноводства как источники питательных веществ для сельскохозяйственных животных / Е.Н. Кобякова, С.А. Петрова // Материалы IV межд. НПК «Теоретические и практические аспекты развития современной науки», 3-4 июля 2012, Москва, С.89-93
11. Кобякова Е.Н. Технологическая схема линии по производству кормовой добавки для животных из субстрата биогазовой установки / / Е.Н. Кобякова, В.П. Друзьянова, С.А. Петрова // «Science and world» №4 (4), International scientific journal Декабрь 2013, Волгоград, С. 81-83.
12. Кобякова Е.Н. Возможности применения биогазовой технологии для переработки навоза крупного рогатого скота в Республике Саха (Якутия) / Е.Н. Кобякова // Электронный научный журнал «APRIORI. Серия: естественные и технические науки», 2013 г.
13. Кобякова Е.Н. Классификация и обзор существующих биогазовых установок / Е.Н. Кобякова // Сборник материалов V Международной научно-практической конференции «Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков», 03. 2014 г, Новосибирск, С. 320-324.
14. Кобякова Е.Н. Обоснование оптимальной конструкции биогазовой установки для применения в малых животноводческих хозяйствах / Е.Н. Кобякова, С.С. Ямпиров // Сборник научных трудов. Серия: Технологии и технические средства в АПК. Вып. 10.– Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2014. С.137-145.
15. Кобякова Е.Н. Биогазовая установка для применения в частных животноводческих хозяйствах / Е.Н. Кобякова, С.С. Ямпиров, В.П. Друзьянова // Материалы Международной научно-практической конференции молодых учёных «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК», 28-29 апреля 2014 г., Иркутск, С. 140-147.
16. Кобякова Е.Н. Биогазовая установка для переработки отходов частных

животноводческих хозяйств применительно к условиям Республики Саха (Якутия) / Е.Н. Кобякова, С.С. Ямпиллов, В.П. Друзьянова // «Наука и образование в XXI веке» сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 17 частях. Часть 17, 2014г., Тамбов, С. 57-62.

17. Кобякова Е.Н. Возможности применения биогазового реактора в частных животноводческих хозяйствах / Е.Н. Кобякова, С.С. Ямпиллов, В.П. Друзьянова // Наука и образование в жизни современного общества: сб. науч. тр. по материалам Международной научной-практической конференции, 30 декабря 2014 г.: Часть 5. Тамбов, С. 59-63.

18. Кобякова Е.Н. Экономические и экологические аспекты внедрения биогазовой технологии переработки органических отходов животноводства в Республике Саха (Якутия) / Е.Н. Кобякова, Р.В. Кузьмина // Научный журнал «Молодой учёный» №9 (89) Часть 4, 2015г., С. 467-469

19. Kobyakova E.N. The study of biogas production from fresh cow manure at different temperature modes / E.N. Kobyakova, S.S. Yampilov, V.P/ Druzyanova // Proceedings of the 10th International scientific conference «European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences», (February 02, 2016) Vienna. 2016, P.130-135.

в) в патентах РФ на изобретения, полезные модели:

20. Пат. №2540019 Российская Федерация, МПК С 12М 1/02. Биореактор. Оpubл. 27.01.2015 – Бюл. №3. / Е.Н. Кобякова, С. Ямпиллов, В.П. Друзьянова.

21. Пат. №2540326, Российская Федерация, МПК С 02F 11/04. Биогазовая установка. Оpubл. 10.02.2015 – Бюл. №4. / Е.Н. Кобякова, С. Ямпиллов, В.П. Друзьянова, А.В.

22. Пат. №2540019, Российская Федерация, МПК С12М 1/04 Биогазовая установка. Оpubл. 10.11.2015 – Бюл. №31 / Е.Н. Кобякова, В.П. Друзьянова.

23. Пат. №162185 Рос. Федерация, МПК В01D 53/00 Устройство для очистки биогаза. Оpubл. 27.05.2016 Бюл. №15 / Е.Н. Кобякова, В.П. Друзьянова.