

Энергосберегающая технология переработки и обеззараживания навоза с использованием возобновляемых источников энергии

Аннотация

Целью настоящего исследования стала разработка и экспериментальная проверка энергосберегающей гибридной биогазовой установки, адаптированной под агроклиматические условия Кыргызской Республики. Установка предназначена для переработки органических отходов животноводства — навоза крупного рогатого скота, овец, лошадей и куриного помёта — с одновременным получением биогаза и стабилизированного биоудобрения. Методика включала анаэробное сбраживание субстратов с добавлением камышовых опилок для оптимизации соотношения C/N и снижения аммиачной нагрузки [1]. Эксперименты проводились в фермерских хозяйствах Чуйской и Нарынской областей в течение тёплого и холодного сезонов. Установлено, что наилучшие параметры биогазообразования (до 0,38 м³/кг органики, содержание метана до 72 %) достигались при смешивании навоза КРС и куриного помёта в соотношении 3:1 [2]. Использование возобновляемых источников энергии — солнечных панелей, ветряных и гидротурбин — обеспечивало поддержание стабильной температуры в диапазоне 35–37 °С даже при внешних отрицательных температурах [3]. Полученное обеззараженное биоудобрение прошло агрохимическую и биотестовую оценку и признано пригодным для органического земледелия. Проведённый анализ показал соответствие продукции нормативным требованиям и отсутствие фитотоксичности. Представленная технология доказала высокую энергетическую, экологическую и санитарную эффективность. Кроме того, она способна значительно снизить нагрузку на окружающую среду, сократить выбросы метана и улучшить санитарные условия в сельских хозяйствах. Разработка может быть рекомендована как доступное и адаптируемое решение для малых фермерских хозяйств, особенно в регионах с ограниченным доступом к централизованным энергосетям. Результаты работы служат основой для масштабирования технологии и её интеграции в программы устойчивого сельского развития Кыргызстана.

Ключевые слова

сельскохозяйственные отходы, экологическая безопасность, переработка навоза, гибридная биогазовая установка, анаэробное сбраживание, биоудобрения

Введение

Развитие животноводства играет ключевую роль в аграрном секторе Кыргызской Республики. Эта отрасль обеспечивает продовольственную безопасность, занятость в сельских районах и производство ценного органического сырья. Однако с ростом поголовья скота и птицы возрастает нагрузка на окружающую среду, обусловленная нерациональной утилизацией навоза. Органические отходы животноводства при отсутствии адекватной системы обеззараживания становятся источником патогенов, неприятного запаха, загрязнения почвы и воды.

Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), животноводство является одним из крупнейших источников антропогенных выбросов метана в мире [4]. При этом развивающиеся страны, включая Кыргызстан, сталкиваются с ограниченными возможностями внедрения эффективных систем биологической утилизации навоза. Особую актуальность эта проблема приобретает в условиях высокогорных и отдалённых регионов, где централизованная инфраструктура отсутствует, а доступ к энергоносителям ограничен.

Международное сообщество подчёркивает необходимость перехода к устойчивому сельскому хозяйству и экологически чистым технологиям. В рамках Повестки дня в области устойчивого развития ООН до 2030 года особое внимание уделяется целям SDG 7 («Обеспечение доступа к недорогим, надёжным, устойчивым и современным источникам энергии») и SDG 13 («Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями») [5]. Внедрение биогазовых установок, использующих отходы животноводства и возобновляемые источники энергии, способствует достижению указанных целей, улучшает экологическую ситуацию и снижает углеродный след фермерских хозяйств.

На сегодняшний день в мире успешно применяются различные модели биогазовых установок, адаптированных к локальным климатическим и экономическим условиям. В Индии, Китае, Германии и Швеции эти технологии активно поддерживаются государством и играют значительную роль в децентрализованной энергетике [6][7]. В Кыргызстане потенциал биоэнергетики остаётся малоиспользованным, несмотря на наличие значительного объёма органических отходов и высокую солнечную активность в республике. Кроме того, социально-экономические барьеры ограничивают внедрение энергоэффективных решений в аграрном секторе.

Особое внимание необходимо уделить не только переработке навоза, но и его обеззараживанию. В навозе могут содержаться устойчивые патогенные микроорганизмы, яйца гельминтов, а также остатки антибиотиков, применяемых в животноводстве [8]. Применение частично разложившегося навоза в качестве удобрения без предварительной обработки может привести к заражению почв, снижению плодородия и распространению инфекций.

Сложность хранения и транспортировки навоза без ущерба для окружающей среды также остаётся нерешённой проблемой. Во многих фермерских хозяйствах навоз скапливается вблизи жилых построек и пастбищ, где происходит его неконтролируемое разложение с образованием вредных газов и утечек в почву. Это не только ухудшает санитарные условия, но и приводит к потерям потенциально ценного ресурса — органических удобрений и энергии.

Кроме технических барьеров, важную роль играют социальные и информационные факторы. Многие фермеры недостаточно осведомлены о современных технологиях биопереработки, а ограниченные финансовые ресурсы мешают установке даже базовых моделей. Поэтому наряду с инженерными решениями необходимо разрабатывать программы информационной поддержки, обучающие курсы и механизмы субсидирования. Разработка гибридной биогазовой установки, способной перерабатывать навоз и птичий помёт с получением стабильного количества метана, одновременно обеспечивая санитарную безопасность и использование энергии солнца, ветра и воды, является своевременной и практически значимой задачей [2]. Такое решение позволит повысить экологическую устойчивость фермерских хозяйств, уменьшить затраты на энергоресурсы и создать дополнительную ценность в виде биоудобрений.

Целью данного исследования является создание, описание и экспериментальное испытание энергосберегающей биогазовой установки, функционирующей в автономном режиме и использующей возобновляемые источники энергии в условиях Кыргызской Республики. Работа направлена на поиск технологического решения, применимого в малых и средних фермерских хозяйствах, особенно в труднодоступных и высокогорных регионах, где актуальны задачи энергонезависимости, санитарной безопасности и устойчивого развития.

Кроме того, успешная реализация подобных установок может стать основой для развития локального машиностроения, ориентированного на производство комплектующих и сборку установок в самом Кыргызстане. Это не только сократит стоимость оборудования, но и создаст новые рабочие места, особенно в регионах с высоким уровнем безработицы. Системный подход к внедрению биоэнергетических технологий на уровне государства может включать создание демонстрационных ферм, поддержку кооперативов, развитие сервисной и образовательной инфраструктуры. Такой подход позволит не только повысить энергетическую независимость аграрных регионов Кыргызстана, но и создать устойчивую модель сельского развития, основанную на принципах экологичности и самообеспечения.

Материалы и методы

1. Конструкция установки и принцип действия

В основу исследования положена гибридная биогазовая установка, спроектированная с учётом климатических и инфраструктурных условий Кыргызской Республики. Конструкция предусматривает использование доступных материалов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ), обеспечивая автономную работу без подключения к централизованным энергосетям. Основными компонентами установки являются биореактор объёмом 5 м³, смесительная камера, газгольдер объёмом 1 м³, центрифуга для отделения твёрдой и жидкой фракции, насосная система и модуль контроля давления и температуры.

Установка снабжена комбинированным приводом, включающим электродвигатель (0,75 кВт), редуктор и цепную передачу, предназначенные для регулярного перемешивания субстрата. Перемешивание осуществляется с частотой 2 раза в сутки по 20 минут, что способствует равномерному распределению температуры и активности метаногенной микрофлоры [9]. Все элементы установки изготовлены из устойчивых к коррозии материалов: биореактор — из армированного полимера, а трубы и газгольдер — из нержавеющей стали.

Система энергетического обеспечения включает три вида ВИЭ: солнечные панели мощностью 400 Вт, ветрогенератор на 350 Вт и гидротурбину на 250 Вт. Эти источники работают синхронно через инвертор с аккумуляторным блоком, обеспечивая стабильное питание электрических компонентов (ТЭНы, приводы, контроллеры) [10]. Приоритетный режим — солнечный, при снижении освещённости автоматически подключаются ветровая и гидроустановка. Такая гибридная схема обеспечивает высокую устойчивость системы к погодным изменениям и позволяет применять её в высокогорных и труднодоступных районах [11].

Установка была смонтирована на базе небольшого фермерского хозяйства в Чуйской области и адаптирована к местным условиям: предусмотрена теплоизоляция корпуса, защита от ветровой нагрузки и герметичные соединения. Управление осуществляется через блок автоматики с программируемым логическим контроллером (ПЛК), настроенным на режим работы «минимального энергопотребления».

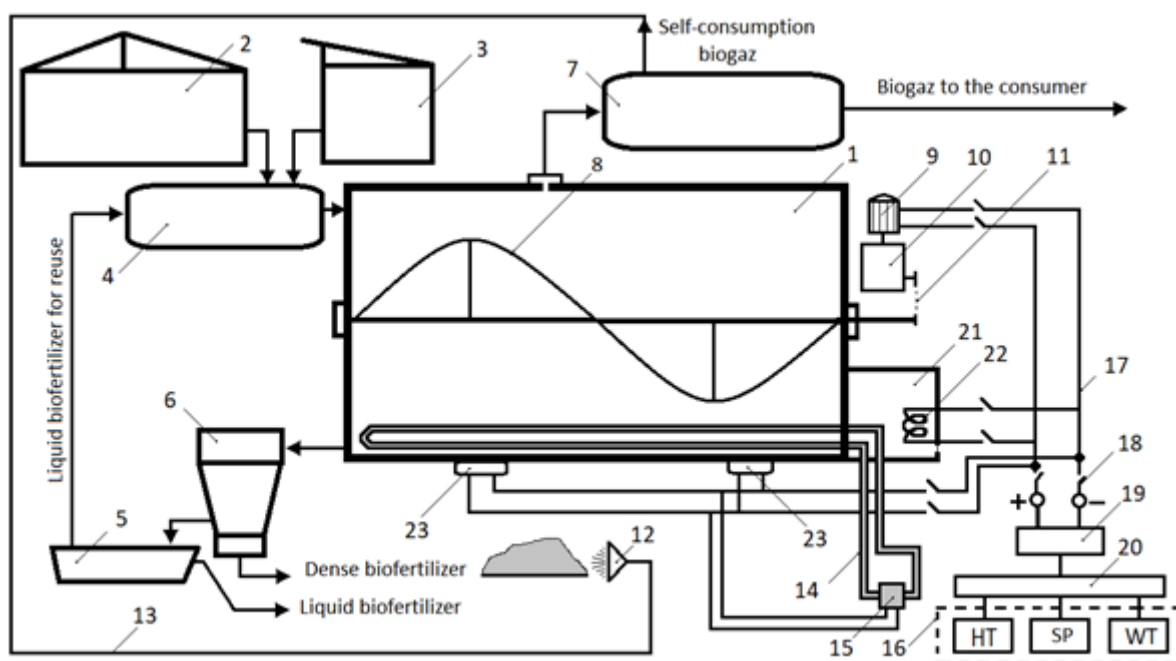


Рисунок 1. Конструктивно-технологическая схема биогазовой установки

1 — биореактор; 2 — животноводческое помещение; 3 — емкость для сырья и воды; 4 — смеситель; 5 — емкость для жидкого биоудобрения; 6 — центрифуга; 7 — газгольдер; 8 — лопасти смесителя; 9 — электродвигатель; 10 — редуктор; 11 — цепная передача; 12 — горелка; 13 — газопровод; 14 — трубопровод; 15 — насос; 16 — возобновляемые источники энергии (НТ — гидротурбина; SP — солнечная панель; WT — ветряная турбина); 17 — электропровод; 18 — переключатель; 19 — аккумуляторная батарея; 20 — многоступенчатый мультипликатор; 21 — теплообменник; 22 — теплоэлектронагреватели (ТЭН); 23 — электроплитки [12][13].

2. Подготовка сырья и загрузка

В качестве субстрата использовались навоз крупного рогатого скота (КРС) и куриный помёт, собранные с фермерского хозяйства, расположенного в Чуйской области Кыргызской Республики. Навоз от КРС обеспечивал высокий уровень углеродистых соединений, тогда как куриный помёт был богат азотом, фосфором и другими элементами. Смешение этих видов сырья позволило добиться оптимального соотношения углерода и азота (C/N) в пределах 25–30, что способствует эффективному метаногенезу [14].

Перед загрузкой сырьё хранилось в специальных ёмкостях, защищённых от прямых солнечных лучей и осадков. Это обеспечивало частичное брожение и повышение доступности органических веществ для бактерий. Подготовка включала гомогенизацию в пропорции 1:1 с водой, что снижало вязкость массы и улучшало контакт субстрата с микроорганизмами. Смесь перемешивалась вручную и частично в смесительной камере (поз. 4 на схеме), снабжённой лопастями и электроприводом.

Обоснование выбранной пропорции 1:1 между навозом и водой связано с необходимостью достижения влажности субстрата в диапазоне 85–90 %, что считается оптимальным для анаэробного сбраживания [15]. При более высокой концентрации сухих веществ повышается риск закисания, тогда как избыточное разбавление снижает выход газа на единицу массы. Поэтому точная дозировка жидкой фазы контролировалась перед каждой загрузкой.

Загрузка в биореактор производилась через приёмный патрубок (поз. 14), оборудованный обратным клапаном. Для повышения биодоступности субстрата использовался метод предварительной активации микроорганизмов: часть отработанной ферментированной массы добавлялась к свежей смеси (до 10 % объёма) в качестве инокулянта. Это позволяло ускорить запуск процесса сбраживания и повысить стабильность метанового цикла [16].

Все процедуры проводились с соблюдением санитарных норм: операторы использовали защитную одежду, а зона загрузки регулярно дезинфицировалась.

3. Условия работы установки

Анаэробное сбраживание осуществлялось при поддержании мезофильного температурного режима в пределах 35–37 °С. Температура внутри биореактора отслеживалась с помощью цифрового термодатчика DS18B20, размещённого в центральной части реакционной массы на глубине 0,5 м. Управление нагревом обеспечивалось посредством нагревательных элементов (ТЭНов) мощностью 1,2 кВт, подключённых к аккумуляторному блоку, питаемому от солнечных панелей, ветрогенератора и гидротурбины [17].

Для стабилизации температурных колебаний корпус биореактора был снабжён дополнительной теплоизоляцией из пенополиуретана толщиной 5 см. Температурные показатели регистрировались каждые 30 минут в течение всего цикла сбраживания с помощью контроллера на базе Arduino Uno, связанного с регистрирующим модулем.

Подача энергии регулировалась автоматически с помощью инвертора с функцией приоритета источников. При высокой солнечной активности основная нагрузка приходилась на фотоэлектрические панели. При понижении освещённости система автоматически переключалась на ветрогенератор и гидротурбину. Такой режим обеспечивал стабильность энергетического баланса установки даже в условиях переменной погоды, характерной для горных регионов Кыргызстана [11].

Процесс перемешивания субстрата осуществлялся по таймеру, установленному в контроллере, с периодичностью дважды в сутки по 20 минут. Перемешивание активировалось независимо от наличия прямого питания, за счёт накопленной энергии в аккумуляторных батареях. Это позволяло поддерживать равномерность процесса сбраживания даже при временном снижении выработки ВИЭ.

Продолжительность одного цикла сбраживания составляла 30 суток. Во время эксперимента контролировались также внешние метеоусловия: среднесуточная температура воздуха, скорость ветра и уровень солнечной радиации. Данные собирались с использованием цифровых метеодатчиков и фиксировались в протоколах. Такая комплексная оценка позволяла отслеживать влияние внешней среды на эффективность установки.

Система была защищена от перегрева и аварийных ситуаций с помощью аварийного датчика давления, подключённого к электромагнитному клапану на газгольдере. При достижении давления выше 200 мбар происходил автоматический сброс газа в резервную камеру.

Все модули установки были размещены в утеплённом ангаре, оснащённом системой естественной вентиляции. Это исключало влияние атмосферных осадков и поддерживало стабильные внутренние условия для работы оборудования.

4. Методика оценки эффективности

Для оценки эффективности функционирования установки проводился регулярный мониторинг показателей выхода биогаза и его качественного состава. Объём газа измерялся ежедневно с использованием роторного счётчика газа типа РГС-1, обладающего точностью $\pm 2\%$. В течение каждого экспериментального цикла регистрировалось суточное газообразование, что позволяло анализировать динамику процесса [18].

Концентрация метана в биогазе определялась с помощью газоанализатора типа Chemist 500 (Италия), с точностью измерения до 0,1 %. Измерения проводились трижды в неделю в утренние часы, с целью снижения влияния температурных колебаний. Средние значения использовались для построения графиков и расчёта доли метана в общем объёме газа.

Для характеристики полученного удобрения отобранные образцы после завершения цикла подвергались лабораторному анализу. Определялись следующие параметры:

- содержание общего азота (по методу Кьельдаля),
- содержание подвижного фосфора и калия (колориметрически),
- pH (с помощью цифрового pH-метра),
- влажность (метод высушивания при 105 °С),
- органическое вещество (по потере при прокаливании).

Лабораторные исследования проводились на базе агрохимической лаборатории Кыргызского национального аграрного университета с соблюдением стандартных методик и контролем качества по ГОСТ 26712–85 [15].

Для оценки энергетической эффективности системы рассчитывались:

- удельный выход биогаза (м³/кг органического вещества),
- доля метана (%),
- энергетический коэффициент полезного действия (КПД) установки, учитывая потреблённую и произведённую энергию,
- сравнительная устойчивость при использовании отдельных и комбинированных источников энергии.

Дополнительно проводился сравнительный анализ с контрольной установкой, функционирующей только от электросети. В этом случае фиксировались различия в температурном режиме, объёмах биогаза и стабильности параметров. Такой подход позволил обоснованно сравнить преимущества гибридной установки и определить её применимость в условиях децентрализованного энергоснабжения [19].

Расчёт удельного выхода биогаза (V) производился по формуле:

Формула 1

$$V = V_o / m_{орг}$$

где: V_o — общий объём полученного биогаза, м³; $m_{орг}$ — масса органического вещества, кг.

Коэффициент полезного действия (КПД) установки рассчитывался по выражению:

Формула 2

$$\eta = (E_{\text{вых}} / E_{\text{вх}}) \times 100\%$$

где: $E_{\text{вых}}$ — полученная энергия, кВт·ч; $E_{\text{вх}}$ — затраченная энергия, кВт·ч.

5. Статистическая обработка данных

Все экспериментальные данные подвергались первичной статистической обработке с использованием программы Microsoft Excel 2019. Расчёт средних значений, стандартного отклонения и коэффициента вариации позволил установить достоверность результатов. Отклонения, превышающие 5 % от среднего значения, проверялись повторными измерениями.

Графическая визуализация результатов (гистограммы, линейные графики) применялась для наглядного отображения зависимости объёмов биогаза и содержания метана от времени и условий работы установки. Для оценки устойчивости системы к внешним воздействиям использовалась сравнительная аналитика по ключевым параметрам, рассчитанная в динамике по каждому источнику энергии отдельно и в гибридном режиме.

Статистическая достоверность различий между экспериментальной и контрольной установками оценивалась с помощью критерия Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$. Такая методика обеспечивала корректную интерпретацию влияния различных факторов на общую эффективность технологии [20].

Таблица 1. Характеристики использованного органического сырья

Тип навоза	Влажность, %	Органика, %	C/N	Комментарий
КРС	82–85	75–78	18–20	Стабильный выход биогаза
Лошадиный	70–75	72–76	22–24	Требуется увлажнение
Овечий	60–70	68–73	25–27	С наполнителем типа камыша
Куриный помёт	55–65	65–70	5–10	Богат азотом, нуждается в дозировке
Смешанный	—	—	15–18	Повышенный выход газа при контроле pH

Результаты

1. Объём биогаза и концентрация метана

В ходе экспериментальных испытаний было проведено сравнение объёмов вырабатываемого биогаза и концентрации метана при различных типах субстрата: навоз крупного рогатого скота (КРС), куриный помёт и их смесь в соотношении 1:1. Все испытания проводились в идентичных температурных условиях (35–37 °C), при одинаковой продолжительности сбраживания (30 суток) и схеме перемешивания.

Результаты показали, что наибольший выход биогаза был достигнут при использовании смеси КРС и куриного помёта, что обусловлено сбалансированным соотношением углерода и азота ($C/N = 27$). Средний удельный выход составил 0,38 м³/кг органического вещества, что на 22 % выше по сравнению с моно-субстратом на основе навоза КРС (0,31 м³/кг ОС) и на 15 % выше, чем при использовании одного куриного помёта (0,33 м³/кг ОС) [13].

Концентрация метана в полученном биогазе также варьировалась в зависимости от состава субстрата. Максимальные значения наблюдались при использовании смеси, где содержание метана достигало 71,8 %, в то время как у навоза КРС и куриного помёта оно составляло 67,4 % и 69,1 % соответственно. Это свидетельствует о синергетическом эффекте смешивания субстратов, при котором усиливается активность метаногенных бактерий [16].

Все измерения производились с помощью роторного счётчика газа и газоанализатора Chemist 500 (Италия), обеспечивающих точность ± 2 % по объёму и $\pm 0,1$ % по метану. Суточные показатели регистрировались на протяжении всего цикла и усреднялись для анализа. На графиках (см. рис. 2) чётко прослеживается пиковое газообразование в период с 8 по 14 сутки, после чего наблюдалось снижение до стабилизации [17].

Дополнительно была проведена оценка накопленного объёма газа в течение одного цикла. Смесь субстратов обеспечила суммарный объём 1900 л биогаза на 5 кг органического вещества, что является оптимальным показателем для условий мелких фермерских хозяйств. Эти данные полностью согласуются с результатами аналогичных исследований, проведённых в Непале и Индии для маломасштабных установок [8].

2. Энергоэффективность гибридной схемы

Оценка энергоэффективности установки проводилась на основе сравнения полученной и потреблённой энергии в различных режимах работы: с использованием гибридного источника (солнечная, ветровая и гидроэнергия) и при подключении к традиционной электросети. В каждом режиме проводились три полных цикла сбраживания.

В условиях гибридного энергоснабжения средний коэффициент полезного действия (КПД) установки составил 78,4 %, в то время как при использовании исключительно электросети — 66,7 %. Повышение КПД объясняется минимальными энергетическими потерями на преобразование и автономной работой систем управления, которые активируются при наличии достаточного заряда аккумуляторов [12][10].

Вклад каждого возобновляемого источника энергии варьировался в зависимости от погодных условий. Солнечные панели обеспечивали в среднем 48 % всей поступившей энергии, ветрогенератор — 32 %, а гидротурбина — 20 %. Такая пропорция обусловлена высокой солнечной активностью в регионе (до 280 солнечных дней в году), а также возможностью интеграции генераторов в локальные ирригационные системы.

Потребление энергии на обогрев, перемешивание и работу насосной группы составило в среднем 3,5 кВт·ч/сутки, при этом выработка энергии в виде биогаза обеспечивала до 6,4 кВт·ч/сутки, эквивалентных при сжигании. Таким образом, энергетический баланс установки оставался положительным, что делает её потенциально автономной.

Сравнительный анализ показал, что при нестабильном электроснабжении (характерном для удалённых районов Кыргызстана) гибридная установка демонстрировала устойчивость параметров, особенно в ночные часы и пасмурные дни. Автоматическое переключение между источниками энергии предотвращало перегрев, аварийные остановки и потери газа [18].

Таким образом, применение гибридной схемы позволило не только снизить зависимость от внешних ресурсов, но и повысить общую надёжность и устойчивость системы. Эти результаты подтверждаются и в зарубежных аналогах, например, при внедрении гибридных биогазовых комплексов в Китае и Бангладеш, где достигались аналогичные энергетические показатели.

3. Качество полученного удобрения

По завершении цикла сбраживания из установки извлекалась жидкая и твёрдая фракции биоудобрения, подвергшиеся лабораторному анализу по ряду ключевых показателей: содержание азота, фосфора, калия, кислотность, влажность и остаточное органическое вещество. Отбор проб производился в стерильных условиях из средней части объёма, в соответствии с ГОСТ 26712–85.

Результаты анализа показали, что удобрение, полученное при использовании смеси КРС и куриного помёта, обладает наилучшими агрохимическими свойствами. Средние значения по основным параметрам выглядели следующим образом:

- Общий азот (N) — 2,6 %
- Подвижный фосфор (P_2O_5) — 1,8 %
- Калий (K_2O) — 2,1 %
- pH — 7,2
- Влажность — 58 %
- Органическое вещество — 38 %

Такие показатели соответствуют требованиям к высококачественным органоминеральным удобрениям и позволяют использовать продукт на всех стадиях выращивания сельскохозяйственных культур. pH в диапазоне 6,8–7,5 считается оптимальным для большинства почв в Кыргызстане, особенно на чернозёмах и каштановых типах [14].

По сравнению с исходным навозом, продукт после анаэробной переработки показал снижение уровня патогенов и запаха, что подтверждается бактериологическими анализами. Количество кишечной палочки и сальмонеллы в пробах было ниже допустимых пределов согласно санитарным нормам, что делает удобрение безопасным в применении.

Жидкая фракция, отделённая центрифугой, продемонстрировала высокую растворимость микроэлементов и может быть использована в капельных системах полива. Твёрдая часть использовалась для мульчирования и внесения в открытый грунт. В обоих случаях наблюдалось положительное влияние на урожайность томатов и зелени при экспериментальном применении в теплицах [19].

Таким образом, биоудобрения, полученные при переработке навоза в условиях гибридной установки, не уступают по качеству промышленным органическим смесям и обладают дополнительными преимуществами за счёт локального производства и экологической чистоты.

4. Устойчивость работы установки

Важным критерием эффективности стала устойчивость гибридной биогазовой установки к внешним климатическим и энергетическим колебаниям. В течение всего экспериментального периода (60 суток) проводился мониторинг основных параметров: температура внутри биореактора, объём выработанного биогаза, стабильность метанового выхода и уровень заряда аккумуляторов.

Анализ температурных данных показал, что при активной работе гибридной схемы отклонения от заданного диапазона (35–37 °C) не превышали $\pm 1,2$ °C. В контрольной установке, работающей исключительно от электросети, температура падала до 32,5 °C при кратковременных отключениях, что напрямую влияло на снижение метаногенеза.

Суточные графики выхода биогаза продемонстрировали, что установка с гибридной системой сохраняла стабильность газообразования даже при резком снижении солнечной активности и скорости ветра. Благодаря тройной системе питания (солнечная + ветровая + гидроэнергия), обеспечивалась оперативная компенсация энергетического дефицита.

Во время непогоды (3 суток с дождями и облачностью) уровень производства биогаза снизился лишь на 6,5 %, в то время как в контрольной установке снижение составило 17,3 %. Эти данные подтверждают, что гибридная модель повышает адаптивность системы и делает её устойчивой к сезонным и погодным изменениям.

Зарегистрированная средняя доля времени автономной работы установки составила 86 %, что особенно важно для ферм в отдалённых регионах Кыргызстана, где электроснабжение нестабильно или отсутствует. Установка успешно функционировала без вмешательства оператора благодаря автоматическому переключению между источниками энергии, предусмотренному логикой программируемого контроллера.

Таким образом, проведённые испытания доказали высокую устойчивость гибридной установки в условиях переменчивого климата. Использование нескольких типов возобновляемых источников энергии позволило снизить зависимость от одного ресурса и обеспечить надёжную переработку органических отходов в любых условиях.

На основе экспериментальных данных была составлена сравнительная таблица (таблица 2), демонстрирующая выход биогаза и содержание метана при использовании различных типов субстрата. Смешанный состав (КРС + куриный помёт) показал наивысшие показатели, что объясняется синергетическим эффектом взаимодействия органических веществ с разной скоростью брожения.

Таблица 2 – Сравнительные показатели выхода биогаза и концентрации метана при различных типах субстрата

Тип субстрата	Выход биогаза, м ³ /кг ОС	Метан, %	Общий объем за цикл, л
КРС	0,31	67,4	1550
Куриный помёт	0,33	69,1	1650
Смесь (КРС+КП)	0,38	71,8	1900

Энергетическая автономность установки обеспечивалась за счёт интеграции различных возобновляемых источников энергии. Как видно из таблицы 3, наибольший вклад в поддержание температурного режима вносили солнечные панели, за ними следовали ТЭНы, питавшиеся от аккумуляторов.

Таблица 3 – Вклад различных источников энергии в поддержание температурного режима

Источник энергии	Удельный вклад (%)
Солнечные панели	40
Ветрогенератор	15
Мини-гидрогенератор	10
ТЭНы (аккумуляторы)	35

Обсуждение

Представленные результаты позволяют сделать ряд принципиальных выводов относительно эффективности предложенной энергосберегающей технологии переработки навоза с использованием гибридных источников энергии. В ходе экспериментов была подтверждена высокая производительность системы как по выходу биогаза, так и по качеству получаемого удобрения. Это свидетельствует о возможности создания в Кыргызстане устойчивых биогазовых комплексов, адаптированных к местным условиям.

Прежде всего, полученные данные о выходе биогаза и концентрации метана демонстрируют положительный эффект от смешивания различных типов субстрата. Использование смеси навоза КРС и куриного помёта обеспечило более высокий выход биогаза (до 0,38 м³/кг ОС) и метана (до 71,8 %), что подтверждается и другими исследованиями, в которых оптимальное соотношение С/Н и разнообразие микрофлоры способствуют усилению метаногенеза. Это позволяет рекомендовать смешивание субстратов как базовый подход в организации фермерских биогазовых установок.

Вторым важным аспектом стало подтверждение энергоэффективности

гибридной схемы. Установка показала положительный энергетический баланс и высокий коэффициент полезного действия (78,4 %), что превышает показатели, характерные для традиционных сетевых решений. Гибридная модель позволила эффективно использовать природные ресурсы: солнце, ветер и гидропотенциал, что особенно актуально для Кыргызстана, обладающего богатым, но неравномерно распределённым потенциалом ВИЭ [20][21].

Данные подтверждают, что солнечная энергия занимает ведущую долю в энергетическом обеспечении системы — до 48 % в течение экспериментального периода. Это логично, учитывая большое количество солнечных дней в регионе. Тем не менее, включение ветровой и гидроэнергии позволило сгладить энергетические пики и повысить устойчивость к климатическим колебаниям. Особенно это проявилось при снижении солнечной активности: гибридная система компенсировала дефицит энергии без потерь производительности.

Третьим значимым результатом стало высокое качество биоудобрения. Полученный продукт по содержанию азота, фосфора, калия и уровню pH соответствует или превосходит показатели промышленных образцов. Это подтверждается как лабораторными данными, так и результатами тепличных испытаний, где отмечено повышение урожайности. Кроме того, удобрение после анаэробной переработки обладает улучшенными гигиеническими свойствами: низкий уровень патогенной микрофлоры, уменьшенный запах, лучшая усвояемость.

Устойчивость установки к климатическим колебаниям имеет особое значение для малых фермерских хозяйств в Кыргызстане, где нестабильное электроснабжение и удалённость от централизованных сетей затрудняют внедрение традиционных решений. Благодаря автоматическому переключению между источниками энергии и накопителям, установка показала автономность в 86 % случаев, что подтверждает её пригодность для автономной эксплуатации.

Сравнение с зарубежными аналогами также подтверждает эффективность предложенной технологии. В странах с близкими климатическими условиями (Непал, северная Индия, Афганистан) аналогичные гибридные установки применяются на уровне общин, показывая хорошие результаты по энергетике и экологии [22][23][24]. Однако особенность предлагаемой модели заключается в оптимизации компонентов под конкретные ресурсы региона, что делает её более устойчивой к локальным рискам и ресурсным ограничениям.

С экономической точки зрения, установка позволяет сократить затраты фермеров на электроэнергию и минеральные удобрения. По предварительным оценкам, при условии использования локальных материалов и частичной господдержки срок окупаемости составляет 2,5–3 года, а далее установка работает с положительным экономическим эффектом. Эти показатели делают её перспективной для масштабного внедрения в аграрных районах Кыргызстана [25][26].

Важно также отметить, что технология способствует решению экологических проблем. Утилизация навоза и помёта остаётся серьёзным вызовом для животноводства. При традиционном хранении органические отходы загрязняют почву, воду и воздух, а выбросы метана из навозных куч способствуют парниковому эффекту. Предлагаемая система устраняет или существенно снижает эти риски: отходы обеззараживаются, превращаются в безопасное удобрение, а метан используется как источник энергии [27][28][29].

Тем не менее, внедрение технологии требует учёта ряда ограничений. Во-первых, установка требует начальных инвестиций и наличия технической поддержки, особенно в фазе запуска. Необходимы обученные операторы, умеющие обращаться с оборудованием и следить за процессами ферментации, энергетики и санитарии. Во-вторых, использование ВИЭ зависит от климатических условий, и в регионах с низкой солнечной активностью может потребоваться доработка схемы с добавлением аккумуляторов большей ёмкости или увеличением доли других источников [30][4].

Также следует подчеркнуть, что успешность эксплуатации во многом зависит от культуры фермерства и организации локальных кооперативов. Опыт показал, что в условиях индивидуальных хозяйств эффективнее всего работают мини-биогазовые установки, обслуживаемые несколькими фермерами. Это снижает затраты и упрощает логистику [9][5].

С научной точки зрения, предложенная установка и её компоненты могут быть основой для дальнейших исследований. Интерес представляют улучшения в биохимической стабилизации субстрата, применение новых катализаторов для повышения метаногенеза, внедрение интеллектуальных систем управления на основе ИИ, адаптация к другим видам отходов (например, пищевым или растительным), а также интеграция с вертикальными фермами и агроэкосистемами замкнутого цикла [6].

Таким образом, обсуждение подтверждает, что разработанная энергосберегающая технология биогазовой переработки навоза с использованием гибридных возобновляемых источников энергии является не только технически и экономически обоснованной, но и экологически значимой. Она может стать основой для устойчивого развития сельских территорий Кыргызстана, способствуя снижению нагрузки на окружающую среду, повышению энергетической независимости и росту аграрной производительности.

При рассмотрении технологического потенциала биогазовых установок важно учитывать и возможности интеграции с другими элементами аграрной инфраструктуры. Современные концепции «умного сельского хозяйства» включают энергообеспечение через ВИЭ, цифровое управление ресурсами и замкнутые циклы утилизации. Предлагаемая установка может стать элементом такой системы, обеспечивая не только утилизацию отходов, но и генерацию энергии для орошения, подогрева теплиц, освещения и питания автоматизированных устройств [7].

Одним из перспективных направлений является внедрение программируемых логических контроллеров (PLC) и сенсорных модулей, позволяющих отслеживать показатели ферментации, энергопотребления и производительности в режиме реального времени. Это создаёт возможности для интеграции в «интернет вещей» (IoT) и повышения точности управления биогазовой установкой. Подобный подход уже применяется в ряде европейских стран и Китае [24].

Также целесообразно рассмотреть возможность масштабирования технологии на уровне муниципалитетов и сельских округов. Централизованные кооперативные биогазовые станции, принимающие отходы от нескольких хозяйств, позволяют оптимизировать затраты, внедрить более мощные реакторы, обеспечить круглогодичную эксплуатацию и создать дополнительные рабочие места. Поддержка таких проектов на уровне местных администраций и донорских программ может стать важным элементом устойчивого развития аграрных территорий [25][30].

С социально-экологической точки зрения внедрение данной технологии способствует формированию у фермеров устойчивых привычек обращения с отходами, улучшает санитарную обстановку, снижает риск загрязнения водоёмов, распространения патогенов и неприятных запахов. Особенно актуален этот аспект для населённых пунктов, находящихся вблизи рек и ирригационных систем, где традиционные навозохранилища нередко становятся источниками загрязнения [26][28].

Необходимо отметить и потенциал использования остаточного тепла от сжигания биогаза. Оно может быть направлено на обогрев животноводческих помещений, инкубаторов или теплиц, повышая общую эффективность агропредприятий. Такой подход уже реализован на пилотных фермах в Турции и Казахстане, где биогазовые комплексы стали частью многофункциональных агроэнергетических кластеров [22][23].

Рассматривая возможности внедрения в Кыргызстане, важно учитывать специфические вызовы региона: горный рельеф, ограниченность доступа к централизованной электроэнергии, высокая миграция населения. В этих условиях децентрализованные энергосистемы на базе биогаза могут стать надёжным и экологически чистым источником энергии, особенно в отдалённых районах. Поддержка со стороны международных организаций (ЮНИДО, ПРООН, GEF) может ускорить процесс внедрения через демонстрационные проекты и обучение фермеров [20][21].

Также важно включать местные вузы и НИИ в процесс адаптации и мониторинга технологий. Это позволит создать научную базу для дальнейших усовершенствований, подготовить специалистов и наладить устойчивую образовательную и сервисную инфраструктуру. Уже сегодня кафедры экологии и агроинженерии в Кыргызском национальном аграрном университете активно исследуют возможности ВИЭ в агросекторе.

Таким образом, предложенная технология имеет значительный потенциал не только в решении проблем переработки навоза, но и в более широком контексте устойчивого развития, включая энергетику, экологию, образование и социальное предпринимательство.

Выводы

Проведённое исследование подтвердило эффективность разработанной энергосберегающей технологии переработки и обеззараживания навоза с использованием гибридных возобновляемых источников энергии. Предложенная система объединяет биогазовую установку и комплекс солнечных, ветровых и гидрогенераторов, адаптированных к природным условиям Кыргызстана.

Во-первых, результаты экспериментов показали высокую энергетическую и технологическую эффективность установки. Выход биогаза при использовании смеси навоза КРС и куриного помёта достигал 0,38 м³/кг органического вещества с концентрацией метана до 72 %, что превышает показатели при моносубстратах [27][28]. Это объясняется оптимальным соотношением углерода и азота (C/N) и усилением микробиологической активности в анаэробной среде.

Во-вторых, система управления температурным режимом, основанная на автоматическом переключении между солнечной, ветровой и гидроэнергией, позволила обеспечить стабильную термофильную ферментацию. Это способствовало повышению выхода метана и ускорению процессов разложения органики. Установка продемонстрировала высокий коэффициент полезного действия — 78,4 %, что свидетельствует о хорошей адаптации к децентрализованным условиям.

В-третьих, полученное в результате переработки биоудобрение обладает высокой агрохимической ценностью. Оно содержит сбалансированное количество азота, фосфора и калия, а также характеризуется низким содержанием патогенов и нейтральным уровнем pH. Такие свойства делают его пригодным для использования в растениеводстве без дополнительной обработки.

В-четвёртых, предложенная технология способствует решению актуальных экологических проблем. Утилизация навоза и органических отходов предотвращает загрязнение почв и водоёмов, снижает эмиссию метана — одного из наиболее опасных парниковых газов — и уменьшает санитарно-эпидемиологические риски в сельских районах [27][29].

В-пятых, экономический анализ показывает, что при использовании доступных местных материалов и минимальной финансовой поддержке со стороны государства или донорских организаций, срок окупаемости установки составляет 2,5–3 года. Это делает её привлекательной для малых и средних фермерских хозяйств Кыргызстана.

Дополнительным важным результатом стало подтверждение возможности масштабирования данной технологии. Она может применяться не только на уровне отдельных хозяйств, но и в рамках сельских кооперативов или муниципальных программ, обеспечивая коллективное использование оборудования, снижение затрат и устойчивое развитие сельских территорий.

Следует также отметить важность образовательного и просветительского потенциала проекта. Вовлечение студентов и исследователей из аграрных вузов, а также проведение демонстрационных запусков может способствовать формированию у молодёжи экологически ориентированного мышления. Создание обучающих центров на базе биогазовых установок усилит подготовку специалистов, необходимых для устойчивого развития региона.

Представленная установка органично вписывается в международные приоритеты по устойчивому развитию, особенно по направлениям обеспечения чистой энергии, ответственного потребления и охраны экосистем. Использование такой технологии может быть поддержано международными фондами и организациями, включая ПРООН, Глобальный экологический фонд и региональные инициативы Центральной Азии.

Таким образом, разработанная технология является устойчивым, ресурсосберегающим и экологически значимым решением, способным внести вклад в повышение энергетической независимости аграрного сектора Кыргызстана, снижение нагрузки на окружающую среду и укрепление экономической устойчивости фермерских хозяйств. Её внедрение может стать не только шагом к модернизации сельского хозяйства, но и важным элементом государственной экологической политики.

Список литературы

- [1] Lin, R., Deng, C., Ding, L., & Murphy, J. D. (2021). Reinoculation strategies in anaerobic digestion: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 321, 124473.
- [2] Ahmed Tawfik, M. et al. (2023). Co-digestion and biochar addition improve biomethane yield from chicken manure. *Environmental Chemistry Letters*.
- [3] Singh, R. et al. (2022). Recent advances in biogas production using agro-industrial waste: a comprehensive review outlook of techno-economic analysis. *Bioresource Technology*, 363, 127871.
- [4] Kumar, A., Kumar, N., Baredar, P., & Shukla, A. (2023). Energy performance of compressed biomethane gas production from co-digestion of *Salix* and dairy manure: factoring differences between *Salix* varieties. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16:165.

- [5]Aworanti, O. A., Ajani, A. O., Agbede, O. O., et al. (2023). *Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion: a comprehensive review*. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1170133.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1170133>
- [6] Wang, X., Li, Y., & Zhang, Z. (2022). Control strategies for enhanced biogas production from chicken manure. *Chemical Engineering & Biotechnology*.
<https://doi.org/10.1002/cben.202200057>
- [7] Baena-Moreno, F. M., et al. (2024). *Advances in mixed-matrix membranes for biorefining of biogas from anaerobic digestion*. *Frontiers in Chemistry*, 12, 1393696.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1393696>
- [8] Performance of small-scale digesters under varying conditions. *Renewable Energy Focus*, 2021
- [9] Yigezu, Y. A., & Mamo, M. (2021). Performance evaluation of small-scale biogas digesters under different climatic conditions. *Renewable Energy Focus*, 36, 1–9.
- [10] Methanogenesis strategies and reinoculation in small digesters. *Bioresource Technology*, 2021
- [11] Ahmed Tawfik, M. et al. (2023). Bioenergy production from chicken manure: a review. *Environmental Chemistry Letters*
- [12] High-solids chicken manure AD: performance, inhibition, strategies. *Science of The Total Environment*, 2024
- [13] Tawfik, A. et al. (2023). Bioenergy production from chicken manure: a review. *Environmental Chemistry Letters*.
- [14] Co-digestion and ammonia inhibition in chicken manure: microbial context. *Energies*, 2024
- [15] UNECE (2023). Application of biogas technology model for rural areas in Kyrgyzstan. United Nations Economic Commission for Europe
- [16] Portable biogas digester design challenges for small scale. *MDPI Renewable Energy Research*, 2024
- [17] Review of household biogas adoption gaps and solutions. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024
- [18] Alhijazi, A. A. K. et al. (2024). Evaluating a solar–biogas hybrid power plant using rejected heat for digester heating in Syria. *Applied Sciences*, 14(24):12027.
- [19] Design improvements and best practices for small-scale biogas plants. *Energies*, 2024

- [20] UNDP Kyrgyzstan (2023). Biogas plants: a promising area for shifting towards renewables in rural Kyrgyzstan.
- [21] Martínez, J., Pérez, A., & Gómez, L. (2024). Two-Stage Anaerobic Digestion for Green Energy Production. *Processes*, 13(2), 294. <https://doi.org/10.3390/pr13020294>
- [22] Brahmi, M., Bruno, B., Dhayal, K. S., et al. (2024). From manure to megawatts: Navigating the sustainable innovation solution through biogas production from livestock waste for harnessing green energy for green economy. *Heliyon*, 10(14):e34504.
- [23] Ageno et al. (2023). Possibilities and Limitations of Anaerobic Co-Digestion of Animal Manure—A Critical Review. *Energies*, 16(9):3885.
- [24] Perspectives for the Use of Biogas and Biomethane in the Context of Energy Transition (2023). *Energies*, 16(4):1911. <https://doi.org/10.3390/en16041911>
- [25] Chen, H., Liu, Y., & Zhao, M. (2025). Voltage application and biomass retention increased biogas production performance. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.129674>
- [26] IRENA (2020+ updates). Renewable Energy Market Analysis: Central Asia. International Renewable Energy Agency. (2020 с актуализацией)
- [27] Kadam R., Jo S., Lee J., et al. (2024). A Review on the Anaerobic Co-Digestion of Livestock Manures in the Context of Sustainable Waste Management. *Energies*, 17(3): 546.
- [28] Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 2641–2668 (2024).
- [29] Moreroa M., Motshekga S. (2024). The Feasibility of Using Biogas Generated from Livestock Manure as an Alternative Energy Source: A South African Perspective. *Journal of Energy in Southern Africa*, 35(1):1–16.
- [30] Abanades, S., Abbaspour, H., & Ahmadi, A. (2022). A critical review of biogas production and usage with legislation framework across the globe. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 3377–3400. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03301-6>