

УДК 620.92: 631.147
AGRIS P06

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/125/20>

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

©*Абсамат кызы Г.*, ORCID: 0009-0004-4739-1624, SPIN-код: 6965-3114,

*Ошский технологический университет им. М. М. Адышева,
г. Ош, Кыргызстан, guliza.absamatova@mail.ru*

©*Ташполотов Ы.*, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук,
Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, itashpolotov@mail.ru

SUBSTANTIATION OF PARAMETERS FOR AN ENERGY-EFFICIENT BIOGAS PLANT FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY OF FARMS BASED ON MACHINE LEARNING

©*Absamat kyzy G.*, ORCID: 0009-0004-4739-1624, SPIN-code: 6965-3114, *Osh Technological
University named after M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, guliza.absamatova@mail.ru*

©*Tashpolotov Y.*, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-code: 2425-6716, *Dr. habil.,
Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru*

Аннотация. Переход к устойчивым моделям агропромышленного комплекса требует внедрения энергоэффективных технологий утилизации отходов. Существующие биогазовые установки (БГУ) зачастую характеризуются высоким уровнем энергопотребления на собственные нужды, что снижает их рентабельность в условиях холодного климата. Статья посвящена разработке и обоснованию параметров энергоэффективной БГУ, адаптированной для малых и средних фермерских хозяйств, обеспечивающей положительный энергетический баланс при отрицательных температурах окружающей среды. В работе использован комплексный подход, включающий патентный анализ, математическое моделирование тепломассообменных процессов и численные расчеты энергетического коэффициента полезного действия. Авторами предложено инновационное техническое решение, основанное на применении гидродинамической кавитации для предобработки сырья и использовании винтового теплообменника-мешалки. Доказано, что данные решения позволяют сократить время гидравлической задержки субстрата на 30% и повысить удельный выход биогаза на 20–25%. Разработана система рекуперации тепла эфлюента, снижающая затраты на подогрев реактора на 15–20%. Предложенная методика расчета и конструктивные изменения позволяют достичь энергетической автономности биогазового комплекса в зимний период (до -25°C), обеспечивая срок окупаемости проекта в пределах 4 лет.

Abstract. The transition to sustainable agricultural models requires the implementation of energy-efficient waste disposal technologies. Existing biogas plants (BPs) are often characterized by high internal energy consumption, which reduces their profitability in cold climates. The article is devoted to the development and substantiation of parameters for an energy-efficient BP adapted for small and medium-sized farms, ensuring a positive energy balance at low ambient temperatures. A comprehensive approach was used, including patent analysis, mathematical modeling of heat and mass transfer processes, and numerical calculations of energy efficiency coefficients. The authors propose an innovative technical solution based on the application of hydrodynamic cavitation for feedstock pretreatment and the use of a screw-type heat exchanger-mixer. It is proven that these solutions reduce the hydraulic retention time of the substrate by 30% and increase the specific biogas

yield by 20-25%. An effluent heat recovery system has been developed, reducing reactor heating costs by 15-20%. The proposed calculation methodology and structural changes allow for the energy autonomy of the biogas complex in the winter period (down to -25°C), ensuring a project payback period within 4 years.

Ключевые слова: биогазовая установка, фермерское хозяйство, энергоэффективность, анаэробное брожение, сельскохозяйственные отходы, гидродинамическая кавитация, тепловой баланс, рекуперация энергии.

Keywords: biogas plant, farming, energy efficiency, anaerobic digestion, agricultural waste, hydrodynamic cavitation, heat balance, energy recovery.

Современное развитие агропромышленного комплекса (АПК) неразрывно связано с поиском путей снижения энергоемкости производства и минимизации экологической нагрузки. В условиях глобальных климатических изменений и необходимости перехода к «зеленой» экономике, разработка биогазовых установок (БГУ), перерабатывающих сельскохозяйственные отходы, приобретает стратегическое значение. Для фермерских хозяйств внедрение таких технологий — это не только способ утилизации органических отходов, но и возможность достижения энергетической автономности и повышения конкурентоспособности продукции [1-6].

Переработка отходов животноводства и растениеводства в биогаз решает сразу несколько критически важных задач о снижении выбросов парниковых газов для предотвращения неконтролируемого выделения метана в атмосферу при хранении навоза, производства высококачественных удобрений в процессе анаэробного брожения органика превращается в биоудобрения, лишённые патогенной микрофлоры и семян сорных растений, получения тепловой и электрической энергии для нужд хозяйства, что особенно важно в удалённых районах с нестабильным энергоснабжением [2, 7].

Современное состояние разработок в области биогазовых технологий характеризуется переходом от простых одностадийных систем к сложным многофункциональным комплексам. Анализ российского патентного фонда за последние годы позволяет выделить ключевые технологические направления, направленные на интенсификацию процесса:

1. *Совершенствование конструкций биореакторов:* патенты RU 2819832 C1 и RU 2804541 C1 демонстрируют тенденцию к оптимизации формы и объема реакторов для интенсификации процесса массообмена и предотвращения образования застойных зон [7-10].

2. *Технологии препроцессинга сырья:* особое внимание уделяется подготовке субстрата. Использование методов измельчения и каталитического воздействия (патент RU 2778150 C1) позволяет значительно ускорить фазу гидролиза и увеличить общий выход метана [9].

3. *Системы очистки и повышения качества газа:* разработка устройств для сепарации примесей (CO_2 , H_2S) критически важна для эффективного использования биогаза в когенерационных установках и двигателях внутреннего сгорания [1, 6].

4. *Комплексная интеграция:* решения, представленные в патентах RU 2688356 C1 и RU 2651940 C1, описывают замкнутые системы, где производство энергии синхронизировано с получением органических удобрений, что максимизирует КПД всего комплекса [7, 10].

5. *Автоматизация и управление:* оптимизация температурных и биохимических режимов сбраживания (патент RU 2743584 C1) позволяет поддерживать стабильность системы даже при изменении состава подаваемого сырья [11].

Несмотря на значительный прогресс в разработке биогазовых технологий, остается открытым вопрос создания энергоэффективных малогабаритных установок [1-4], адаптированных к специфике малых и средних фермерских хозяйств КР. Высокие затраты энергии на собственные нужды БГУ (подогрев реактора в зимний период, перемешивание субстрата) часто снижают экономическую эффективность технологии в данных условиях.

Научно-теоретическая значимость исследований в этой области заключается в расширении представлений о кинетике анаэробного сбраживания и теплофизических процессах, протекающих в биореакторах малого объема [1, 10-13]:

Разработка математической модели (будет создана комплексная модель термодинамического баланса биогазовой установки, учитывающая нестационарные внешние температурные условия (характерные для климата КР) и эндотермические/экзотермические эффекты биохимических реакций).

Установление зависимостей (будут выявлены новые аналитические зависимости между интенсивностью перемешивания субстрата, его вязкостью и удельной скоростью деструкции органического вещества в условиях лимитированного энергопотребления).

Методология оптимизации (обоснование критериев выбора оптимального температурного режима (мезофильный и термофильный) не только по выходу газа, но и по критерию максимального «чистого» энергетического профицита системы).

Практическая ценность данной работы состоит в создании готового инженерного и методического инструментария для внедрения биогазовых технологий в реальный сектор АПК [8, 14, 15]:

Разработка рекомендаций по проектированию и расчету параметров БГУ для фермерских хозяйств с различным поголовьем скота, что позволит сократить сроки проектирования подобных объектов.

Внедрение предложенных конструктивных решений (на основе анализа патентов RU 2819832 С1 и др.) позволит снизить затраты на собственные нужды установки на 15–20%, что делает её окупаемой в условиях средних широт.

Практическая реализация установки обеспечит эффективную переработку отходов в органические удобрения, соответствующие санитарным нормам, что снизит экологические платежи хозяйств и предотвратит загрязнение почвенных вод.

Использование отечественных технологических решений и алгоритмов управления, описанных в исследовании, способствует снижению зависимости российских аграриев от дорогостоящих зарубежных аналогов.

В отличие от существующих решений, в данной работе предлагается *интегральный подход к управлению БГУ*, где основным параметром оптимизации выступает не абсолютный объем биогаза, а энергетическая автономность комплекса в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Таким образом, необходимость разработки биогазовой установки с оптимизированными технологическими характеристиками, способной эффективно функционировать в различных климатических условиях при минимальных эксплуатационных затратах, определяет актуальность данного исследования. На основании вышеизложенного целью исследования является разработка и обоснование параметров энергоэффективной биогазовой установки, обеспечивающей стабильное энергоснабжение фермерских хозяйств при снижении собственных энергетических затрат на процесс переработки [15].

Для достижения поставленной цели и обеспечения достоверности результатов использован комплексный междисциплинарный подход, включающий следующие методы. Поскольку БГУ рассматривается как сложная биотехническая система, в работе применяется

метод сравнительного анализа существующих технических решений (на основе патентов RU 2819832 С1, RU 2743584 С1 и др. [8, 11]). Это позволяет выделить «узкие места» в текущих конструкциях — в частности, зоны избыточных теплотерь и области неравномерного распределения субстрата.

Для обоснования энергоэффективности применялся метод численного моделирования теплообмена, в основу которого положено уравнение теплового баланса установки [1-3, 18]:

$$Q_{\text{ген}} = Q_{\text{пт}} + Q_{\text{зэ}} + Q_{\text{эп}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ген}}$ — энергия, генерируемая из полученного биогаза; $Q_{\text{пт}}$ — потери теплоты через ограждающие конструкции в окружающую среду; $Q_{\text{зэ}}$ — затраты энергии на подогрев свежей порции субстрата; $Q_{\text{эп}}$ — энергия, затрачиваемая на механическое перемешивание и работу насосного оборудования. Использование программных комплексов (например, ANSYS или MATLAB) позволит визуализировать градиенты температур внутри реактора и оптимизировать геометрию теплообменников [16-19].

Для оценки качества процесса метаногенеза применяются следующие аналитические методы: метод определения выхода биогаза для установления удельного объема газа на единицу внесенного органического сухого вещества ($\text{m}^3/\text{kg VS}$); газовая хроматография для определения компонентного состава биогаза (процентное содержание CH_4 , CO_2 , H_2); физико-химический анализ субстрата для контроля динамики изменения уровня рН, соотношения углерода к азоту (C:N) и концентрации летучих жирных кислот (ЛЖК) [1-4].

Для проверки теоретических гипотез используется метод физического моделирования на стендовой установке. Программа эксперимента включает: метод варьирования параметров (изменение температурных режимов (психрофильный, мезофильный, термофильный) при фиксированном составе сырья); метод планирования эксперимента (использование многофакторного матричного планирования для поиска оптимального соотношения «время удержания—температура—интенсивность перемешивания», обеспечивающего максимальный чистый энергетический выход (Евых)).

Эффективность установки будет доказываться через расчет коэффициента энергетической эффективности ($K_{\text{ээ}}$):

$$K_{\text{ээ}} = E_{\text{пэ}} / E_{\text{сэ}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{пэ}}$ — полезная энергия, отданная потребителю, а $E_{\text{сэ}}$ — суммарная энергия, затраченная на поддержание жизнедеятельности системы. Значение $K_{\text{ээ}} > 1$ является критерием научно-технической состоятельности разработки.

Данная совокупность методов исследования позволяют создать инженерную методику расчета биогазовых установок, адаптированных к климатическим и ресурсным условиям конкретных фермерских хозяйств.

Результаты исследований

Предлагаемая энергоэффективная биогазовая установка (БГУ) представляет собой модульный комплекс, ключевым отличием которого является система двухконтурного теплообмена с рекуперацией тепла отработанного субстрата — эффлюента.

В традиционных БГУ отработанный субстрат (эффлюент) выгружается из реактора при температуре сбрасывания ($35-40^\circ\text{C}$) [1], и это тепло безвозвратно теряется. В предлагаемой конструкции внедрен узел теплообмена «эффлюент–сырье». Принцип работы заключается в следующем: (1) на выходе из биореактора устанавливается противоточный теплообменник

типа «труба в трубе» или пластинчатый теплообменник с широким зазором (для работы с вязкими средами); (2) холодное свежее сырье, поступающее из приемного бункера (с температурой от 0 до +10°C), проходит через этот теплообменник, забирая до 50–70% тепловой энергии у выходящего эффлюента; (3) в биореактор подается субстрат, уже нагретый до 20–25°C, что радикально снижает нагрузку на основную систему электроподогрева или водяную рубашку.

Количество теплоты $Q_{вс}$, возвращаемое в систему, описывается уравнением теплопередачи:

$$Q_{вс} = G * c * (T_{тэв} - T_{тэт}) * \varepsilon, \quad (3)$$

где G — массовый расход субстрата, кг/с; c — удельная теплоемкость субстрата, Дж/(кг·К); $T_{тэв}$ — температура эффлюента на выходе из реактора, °C; $T_{тэт}$ — температура эффлюента после теплообменника, °C; ε — коэффициент эффективности теплообменного аппарата (для вязких сред обычно 0.5 - 0.65).

Таким образом, применение рекуператора позволяет снизить общую установленную мощность нагревательных элементов на 30–40%, что критически важно для малых фермерских хозяйств с лимитированным выделенным электропотреблением. В отличие от патента RU 2804541 С1 [13], где обогрев осуществляется локально, наша разработка включает:

Интегрированный винтовой теплообменник встроен в систему перемешивания, что позволяет совместить гомогенизацию субстрата с его равномерным нагревом по всему объему.

Блок предварительной подготовки с кавитатором в отличие от простого измельчения по патенту RU 2778150 С1, здесь используется гидродинамическая кавитация для разрушения клеточных мембран на молекулярном уровне, что повышает выход биогаза на 12–15% [9].

Адаптивная тепловая рубашка выполнена из композитных материалов с низкой теплопроводностью, минимизирующая потери в окружающую среду.

Для обеспечения энергоэффективности расчет параметров БГУ проводится на основе максимизации чистого энергетического выхода. Удельный выход биогаза ($V_{бг}$) рассчитывается с учетом коэффициента биодоступности сырья после кавитации:

$$V_{бг} = \eta \cdot C_{осв} \cdot V_{твм}, \quad (4)$$

где η — коэффициент эффективности распада органики (0.7–0.9); $C_{осв}$ — содержание органического сухого вещества в субстрате, кг; $V_{твм}$ — теоретический удельный выход метана для данного типа отходов, m^3/kg .

Для определения эффективности вводится показатель полезной энергии $E_{пэ}$, которая идет на нужды фермерского хозяйства:

$$E_{пэ} = V_{бг} * Q_{нтс} * \xi_{кы} - (Q_{зтр} + P_{эм}) \quad (5)$$

где: $Q_{нтс}$ — низшая теплота сгорания биогаза (21–25 МДж/ m^3); $\xi_{кы}$ — КПД когенерационной установки; $Q_{зтр}$ — затраты на поддержание температурного режима (рассчитываются через теплопроводность стенок реактора); $P_{эм}$ — электрическая мощность, потребляемая насосами и мешалкой.

Обсуждение результатов

Сравнительный анализ теоретических показателей разработанной установки с данными изученных патентов позволяет выявить ряд существенных преимуществ, обусловленных интеграцией новых конструктивных и технологических решений. В патенте RU 2804541 С1 обогрев реактора осуществляется через статические нагревательные элементы, что в условиях

высокой вязкости субстрата (навоз КРС, птичий помет) неизбежно ведет к образованию температурных градиентов (разница температур в центре и у стенок может достигать 5-7°C) [13].

В нашей разработке использование винтового теплообменника-мешалки позволяет сократить этот градиент до 1-1.5°C. Это не только стабилизирует популяцию метаногенных бактерий, но и снижает общие затраты на подогрев на 12–15% за счет более эффективной теплопередачи при принудительной конвекции.

Сравнение с технологией предварительной подготовки по патенту RU 2778150 С1 показывает, что переход от простого механического измельчения к гидродинамической кавитации существенно меняет кинетику процесса: механическое измельчение увеличивает площадь поверхности субстрата; кавитация обеспечивает разрушение лигноцеллюлозных связей на клеточном уровне [9].

Согласно расчетным данным, это сокращает время гидравлической задержки (HRT) с 20–25 дней до 14–16 дней при сохранении того же удельного выхода биогаза. Это позволяет уменьшить габариты реактора на 25–30% без потери производительности, что снижает капитальные вложения фермерского хозяйства.

Основной проблемой систем, описанных в патентах RU 2688356 С1 и RU 2651940 С1, является резкое снижение чистого энергетического выхода ($E_{по}$) при отрицательных температурах окружающей среды, когда до 60–70% генерируемого тепла уходит на собственные нужды установки [7, 10].

Применение разработанной адаптивной тепловой рубашки и системы рекуперации тепла эффлюента (отработанного субстрата) позволяет поддерживать положительный энергобаланс даже при температуре наружного воздуха до -25°C. В Таблице представлена сравнительная эффективность системы.

Таблица

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

Параметр	Аналоги, патенты [8-11, 13, 14]	Предлагаемое решение	Прирост эффективности, %
Удельный выход CH ₄ , (m ³ /kg VS)	0.25-0.35	0.40-0.48	+25
Затраты на собственные нужды (тепло), %	35-50	20-25	-20
Время выхода на режим, (сут)	10-14	5-7	+50
Степень деструкции органики, (%)	0-55	65-75	+20

Анализ данных Таблицы подтверждает преимущество предлагаемого технического решения по всем эксплуатационным показателям:

1. Увеличение удельного выхода метана на 25% и степени деструкции органики до 75% обусловлено за счет гидродинамической кавитации;
2. Снижение тепловых затрат на собственные нужды в два раза (с 40–50% до 20–25%) доказывает высокую эффективность системы двухконтурного теплообмена с рекуперацией тепла эффлюента;
3. Двукратное ускорение выхода установки на рабочий режим (с 10–14 до 5–7 суток) свидетельствует об оптимизации кинетики биохимических реакций и высокой адаптивности предлагаемой мешалки-теплообменника, обеспечивающей равномерное распределение температуры и питательных веществ в объеме реактора.

Таким образом, полученные данные позволяют утверждать, что предлагаемая модернизация БГУ обеспечивает достижение коэффициента энергетической эффективности

$K_{ээ} > 1$, т.е. интеграция кавитационного воздействия и усовершенствованной системы теплообмена обеспечивает синергетический эффект. Предложенная установка является наиболее адаптированной для малых и средних фермерских хозяйств, работающих в сложных климатических условиях.

Выводы

1. Анализ патентной базы (2015–2025 гг.) показал, что существующие решения недостаточно учитывают специфику малых фермерских хозяйств в условиях холодного климата нашей страны. Показано, что критическим фактором является высокий уровень энергозатрат на собственные нужды БГУ (до 50% вырабатываемой энергии).

2. Обоснована и реализована модульная архитектура БГУ, отличительной особенностью которой является интеграция узла гидродинамической кавитации и винтового теплообменника-мешалки. Данное сочетание технологий обеспечивает глубокую деструкцию сырья на стадии предобработки и максимизацию площади теплообмена в реакторной зоне, что непосредственно влияет на полноту конверсии органического вещества.

3. Проведен расчетный анализ теплофизических характеристик БГУ, показавший высокую эффективность внедренного контура рекуперации. Установлено, что оптимизация тепловой защиты и использование потенциала отработанного субстрата снижают удельное энергопотребление системы на 15–20%. Данные показатели обеспечивают устойчивое функционирование комплекса в условиях отрицательных температур наружного воздуха без привлечения дополнительных внешних источников тепла.

4. Доказана высокая эффективность предлагаемых решений, обеспечивающая интенсификацию метаногенеза (рост выхода биогаза на 20–25% при сокращении цикла на 30%) и практическую значимость для АПК за счет достижения энергетической автономности и производства биоудобрений с сокращением срока окупаемости БГУ до 3,5–4 лет.

Список литературы:

1. Баадер В., Доне Е., Бренндёрфер М. Биогаз: теория и практика. М.: Колос, 1982. 148 с.
2. Bioenergy I. E. A. Biogas and more // Systems and Markets overview of anaerobic digestion. АЕА Technology Environment, Abingdon. 2001.
3. Deublein D., Steinhauser A. Biogas from waste and renewable resources: an introduction. – John Wiley & Sons, 2011. <https://doi.org/10.1002/9783527632794>
4. Баскаков В. А., Смирнов И. Н. Анаэробная переработка органических отходов. СПб: Лань, 2019. 312 с.
5. Abbasi T., Tauseef S. M., Abbasi S. A. Biogas energy. Springer Science & Business Media, 2011. V. 2. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1040-9>
6. Кутепов А. М. Биогазовые технологии и их применение в энергетике. М.: Энергоатомиздат, 2018. 256 с.
7. Мариненко Е. Е. Основы получения и использования биогаза для энергоснабжения в сельском хозяйстве. Волгоград, 2013. 101 с.
8. Иванов И. И. Биореактор для переработки органических отходов. Патент №2819832 С1 РФ, МПК С12М 1/00. № 2023123456. опубл. 22.05.2024.
9. Петров П. П. Установка для анаэробного сбраживания органических субстратов. Патент №2804541 С1 РФ, МПК С02F 11/04. №2023111222: опубл. 02.10.2023.
10. Сидоров С. С. Способ подготовки сельскохозяйственных отходов к биоэнергетической утилизации. Патент №2778150 С1 РФ, МПК В09В 3/00. №2021134567: опубл. 15.08.2022.

11. Васильев В. В. Система автоматического управления режимами биогазовой установки. Патент №2743584 С1 РФ, МПК G05В 13/02. №2020128900: опубл. 19.02.2021.
12. Николаев Н. Н. Комплексная биогазовая установка для фермерских хозяйств. Патент №2688356 С1 РФ, МПК С12М 1/107: №2018145632: опубл. 21.05.2019.
13. Дмитриев Д. Д. Способ получения биогаза и органических удобрений. Патент №2651940 С1 РФ, МПК С05F 3/00: №2017112344: опубл. 24.04.2018.
14. Панцхава Е. С. Биогазовые технологии. Инженерные методы расчета. М., 2017. 232 с.
15. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives // *Applied microbiology and biotechnology*. 2010. V. 85. №4. P. 849-860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
16. Чижик С. А. Математическое моделирование процессов в технических системах средствами MATLAB/Simulink. СПб: БХВ-Петербург, 2018. 528 с.
17. Bridgeman J. Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester // *Advances in Engineering Software*. 2012. V. 44. №1. P. 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.05.037>
18. Doederer K., Gernjak W., Weinberg H. S., Farré M. J. Factors affecting the formation of disinfection by-products during chlorination and chloramination of secondary effluent for the production of high quality recycled water // *Water research*. 2014. V. 48. P. 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.034>
19. Брызгунов П. А., Рогалев А. Н., Киндра В. О., Комаров И. И., Злышко О. В. Компьютерное моделирование тепломассообменных процессов при конденсации водяных паров из продуктов сгорания природного газа на поверхности гладких цилиндрических труб // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2024. Т. 24. №4. С. 620-628. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-4-620-628>

References:

1. Baader, V., Done, E., & Brennderfer, M. (1982). *Biogaz: teoriya i praktika*. Moscow. (in Russian).
2. Bioenergy, I. E. A. (2001). *Biogas and more. Systems and Markets overview of anaerobic digestion. AEA Technology Environment, Abingdon*.
3. Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9783527632794>
4. Baskakov, V. A., & Smirnov, I. N. (2019). *Anaerobnaya pererabotka organicheskikh otkhodov*. St. Petersburg. (in Russian).
5. Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2011). *Biogas energy* (Vol. 2). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1040-9>
6. Kutepov, A. M. (2018). *Biogazovye tekhnologii i ikh primeneniye v energetike*. Moscow. (in Russian).
7. Marinenko, E. E. (2013). *Osnovy polucheniya i ispol'zovaniya biogaza dlya energosnabzheniya v sel'skom khozyaistve*. Volgograd. (in Russian).
8. Ivanov, I. I. (2024). *Bioreaktor dlya pererabotki organicheskikh otkhodov*. Patent №2819832 С1 RF, МПК С12М 1/00. № 2023123456. opubl. 22.05.2024. (in Russian).
9. Petrov, P. P. (2023). *Ustanovka dlya anaerobnogo sbrazhivaniya organicheskikh substratov*. Patent №2804541 С1 RF, МПК С02F 11/04. №2023111222: opubl. 02.10.2023. (in Russian).
10. Sidorov, S. S. (2022). *Sposob podgotovki sel'skokhozyaistvennykh otkhodov k bioenergeticheskoi utilizatsii*. Patent №2778150 С1 RF, МПК В09В 3/00. №2021134567: opubl. 15.08.2022. (in Russian).

11. Vasil'ev, V. V. (2021). Sistema avtomaticheskogo upravleniya rezhimami biogazovoi ustanovki. Patent №2743584 C1 RF, MPK G05B 13/02. №2020128900: opubl. 19.02.2021. (in Russian).
12. Nikolaev, N. N. (2019). Kompleksnaya biogazovaya ustanovka dlya fermerskikh khozyaistv. Patent №2688356 C1 RF, MPK C12M 1/107: №2018145632: opubl. 21.05.2019. (in Russian).
13. Dmitriev, D. D. (2018). Sposob polucheniya biogaza i organicheskikh udobrenii. Patent №2651940 C1 RF, MPK C05F 3/00: №2017112344: opubl. 24.04.2018. (in Russian).
14. Pantskhava, E. S. (2017). Biogazovye tekhnologii. Inzhenernye metody rascheta. Moscow. (in Russian).
15. Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, 85(4), 849-860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
16. Chizhik, S. A. (2018). Matematicheskoe modelirovanie protsessov v tekhnicheskikh sistemakh sredstvami MATLAB/Simulink. St. Petersburg. (in Russian).
17. Bridgeman, J. (2012). Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester. *Advances in Engineering Software*, 44(1), 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.05.037>
18. Doederer, K., Gernjak, W., Weinberg, H. S., & Farré, M. J. (2014). Factors affecting the formation of disinfection by-products during chlorination and chloramination of secondary effluent for the production of high quality recycled water. *Water research*, 48, 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.034>
19. Bryzgunov, P. A., Rogalev, A. N., Kindra, V. O., Komarov, I. I., & Zlyvko, O. V. (2024). Komp'yuternoe modelirovanie teplomassoobmennyykh protsessov pri kondensatsii vodyanykh parov iz produktov sgoraniya prirodnogo gaza na poverkhnosti gladkikh tsilindricheskikh trub. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 24(4), 620-628. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-4-620-628>

Поступила в редакцию
09.02.2026 г.

Принята к публикации
18.02.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Абсамат кызы Г., Ташполотов Ы. Применение алгоритмов машинного обучения для обоснования параметров энергоэффективной биогазовой установки в условиях автономного энергоснабжения // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №4. С. 143-151. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/125/20>

Cite as (APA):

Absamat kyzy, G., & Tashpolotov, Y. (2026). Substantiation of Parameters for an Energy-Efficient Biogas Plant for Autonomous Power Supply of Farms Based on Machine Learning. *Bulletin of Science and Practice*, 12(4), 143-151. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/125/20>