

УДК: 620.98

doi 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.2

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ: МИНИМИЗАЦИЯ ОКУПАЕМОСТИ, ЭНЕРГОПОТЕРЬ И ВЫБРОСОВ CO₂



Авезова Нилуфар Раббанакуловна

Доктор технических наук, Ферганский государственный
технический университет, Фергана, Узбекистан

E-mail: avezovanr@gmail.com

ORCID ID: 10000-0002-4298-1041



Усманов Абдурауф Юлдашбоевич

Младший научный сотрудник,
Физико-технический институт Академии наук Республики
Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

E-mail: usmonov_abdurauf@mail.ru

ORCID ID: 0000-0001-6085-6298

Аннотация. В статье рассматривается разработка целевой функции для многокритериальной оптимизации энергетической эффективности гибридной биогазовой установки (ГБУ), интегрированной с фотоэлектрической системой и солнечными тепловыми коллекторами. Предложенная модель учитывает пять ключевых параметров: площадь солнечного водонагревательного коллектора (СВК), мощность фотоэлектрической системы, объём биореактора, температуру анаэробного процесса и скорость перемешивания субстрата. Целевая функция направлена на минимизацию срока окупаемости, энергопотери и выбросов CO₂ с учётом технических и экономических ограничений. Анализ зависимостей параметров от критериев эффективности выявил их нелинейный характер и наличие оптимальных диапазонов, что подтверждает необходимость применения методов оптимизации, таких как скаляризация, эволюционные алгоритмы или имитационного моделирования. Результаты демонстрируют потенциал гибридных систем в повышении энергоэффективности и экологической устойчивости за счёт синергетического использования возобновляемых источников энергии. Исследование вносит вклад в развитие методологии проектирования ГБУ и может служить основой для практической реализации энергоэффективных биоэнергетических комплексов.

Ключевые слова: гибридная биогазовая установка, многокритериальная оптимизация, энергетическая эффективность, возобновляемые источники энергии, солнечные коллекторы, фотоэлектрические системы, анаэробное брожение, экологическая устойчивость.

AVTONOM GIBRID BIOGAZ QURILMASINING KO'P MEZONLI OPTIMALLASHTIRILISHI: O'ZINI OQLASH MUDDATI, ENERGIYA YO'QOTISHLARI VA CO₂ EMISSIYASINI KAMAYTIRISH

Avezova Nilufar Rabbanaqulovna

Texnika fanlari doktori, Farg'ona davlat texnika universiteti,
Farg'ona, O'zbekiston

Usmanov Abdurauf Yuldashboyevich

O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Fizika-texnika
instituti kichik ilmiy xodimi, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqolada quyosh fotoelektrik tizimi va quyosh suv isitgich kollektorlari (QSIK) bilan integratsiyalashgan gibrid biogaz qurilmasining (GBQ) energetik samaradorligini ko'p mezonli optimallashtirish uchun maqsadli funktsiyani ishlab chiqish masalasi ko'rib chiqiladi. Taklif etilgan mo-

del beshta asosiy parametrlarni hisobga oladi: QSIK yuzasi, fotoelektrik tizim quvvati, bioreaktor hajmi, anaerob jarayon harorati va substratni aralashtirish tezligi. Maqsadli funktsiya texnik va iqtisodiy cheklovlarini hisobga olgan holda, o'zlashtirish muddati, energiya yo'qotishlari va CO₂ emissiyasini minimallashtirishga qaratilgan. Parametrlarning samaradorlik mezonlariga bog'liqligini tahlil qilish ularning noxiziq xususiyatga ega ekanini va optimal oraliqlar mavjudligini ko'rsatdi, bu esa skalyarizatsiya, evolyutsion algoritmlar yoki imitatsion modellash kabi optimallashtirish usullarini qo'llash zarurligini tasdiqlaydi. Natijalar gibridd tizimlarning energiya samaradorligi va ekologik barqarorligini oshirishda qayta tiklanuvchi energiya manbalarining sinergik qo'llanilishi orqali katta salohiyatga ega ekanini namoyon etdi. Tadqiqot GBQni loyihalash metodologiyasini rivojlantirishga hissa qo'shadi va energiya tejamkor bioenergetik majmualarni amaliyotga joriy etish uchun asos bo'la oladi.

Kalit so'zlar: gibridd biogaz qurilmasi, ko'p mezonli optimallashtirish, energiya samaradorligi, qayta tiklanuvchi energiya manbalari, quyosh kollektorlar, fotoelektr panellar, anaerob achitish, ekologik barqarorlik.

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF AN AUTONOMOUS HYBRID BIOGAS PLANT: MINIMIZING PAYBACK PERIOD, ENERGY LOSSES, AND CO₂ EMISSIONS

Avezova Nilufar Rabbanakulovna

Doctor of Technical Sciences, Fergana State Technical University,
Fergana, Uzbekistan

Usmanov Abdurauf Yuldashboyevich

Junior Research Fellow of the Physico-Technical Institute of the
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This article presents the development of an objective function for multi-criteria optimization of the energy efficiency of a hybrid biogas plant (HBP), integrated with photovoltaic (PV) systems and solar thermal collectors. The proposed model considers five key parameters: solar collector area, PV system capacity, bioreactor volume, anaerobic digestion temperature, and substrate mixing rate. The objective function aims to minimize the payback period, energy losses, and CO₂ emissions, while taking into account both technical and economic constraints. The analysis of parameter dependencies on efficiency criteria reveals their nonlinear nature and the existence of optimal ranges, which underscores the need for optimization methods such as scalarization, evolutionary algorithms, or simulation modeling. The results demonstrate the potential of hybrid systems to improve energy efficiency and environmental sustainability through the synergistic use of renewable energy sources. This research contributes to the development of hybrid biogas plant design methodology and can serve as a foundation for the practical implementation of energy-efficient bioenergy systems.

Keywords: hybrid biogas plant, multi-criteria optimization, energy efficiency, renewable energy sources, solar collectors, photovoltaic systems, anaerobic digestion, environmental sustainability.

Введение. Современные вызовы в области энергетики требуют разработки высокоэффективных систем, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ) для минимизации экологического следа и зависимости от ископаемого топлива.

Согласно Постановлению Кабинета Министров №561 от 25.10.2023г. [1], утверждена Национальная таксономия «зелёной» экономики, предусматривающая классифи-

кацию видов деятельности и критерии соответствия. В рамках биоэнергетического направления предусмотрены объекты для производства и хранения биотоплива, биомассы, биогаза и других продуктов, включая установки для анаэробного брожения и производства электроэнергии из биотоплива. Также указаны установки для выработки тепловой и электрической энергии, системы отопления, станции на биомассе и биогазе, улучшенные

биомассовые печи, использование отходов сельского и лесного хозяйства.

Практические шаги также подтверждаются последующими нормативными актами. В частности, в соответствии с Указом Президента №УП-5 от 04.01.2024 г. [2], поручено создать правовые основы для внедрения «зелёного тарифа» на электро- и теплоэнергию, производимую в результате утилизации бытовых отходов и переработки биогаза.

Гибридные биогазовые установки (ГБУ), объединяющие анаэробное брожение с солнечными технологиями, представляют собой перспективное направление для достижения этих целей. Такие системы интегрируют биореакторы с фотоэлектрическими панелями для выработки электроэнергии и солнечными тепловыми коллекторами для поддержания оптимального температурного режима, что позволяет повысить выход биогаза и снизить потребность во внешних энергоресурсах [3]. Однако сложность проектирования ГБУ заключается во взаимосвязанности множества параметров, влияющих на энергетическую, экономическую и экологическую эффективность [4].

Настоящее исследование посвящено разработке целевой функции для многокритериальной оптимизации ГБУ, включающей пять ключевых параметров: площадь солнечного коллектора, мощность фотоэлектрической системы, объём биореактора, температуру процесса и скорость перемешивания субстрата. Целью работы является формулирование математической модели, позволяющей одновременно минимизировать срок окупаемости, энергопотери и выбросы CO₂ при соблюдении технических и экономических ограничений.

Востребованность и актуальность данного исследования заключается в разработке методологии оптимизации гибридных систем, объединяющих биогазовые и солнечные технологии, которая вносит вклад в теорию проектирования энергоэффективных ВИЭ-систем, а также в предоставлении инструмента для проектировщиков и инженеров, позволяющего подбирать оптимальные конфи-

гурации ГБУ, повышая их рентабельность и экологическую устойчивость в реальных условиях эксплуатации.

Основная часть. ГБУ сочетает солнечное тепло и электроснабжение, и биогазовое топливо для поддержания стабильного температурного режима биореактора, что позволяет эффективнее использовать возобновляемую энергию и снизить зависимость от внешних источников энергии [5, 6]. В световой день избыточная солнечная энергия направляется на подогрев субстрата и поддержки механизмов по ее перемешиванию и управлению режимами, а ночью нехватка тепла компенсируется сжиганием накопленного биогаза либо аккумуляторами. Такой подход устойчиво поддерживает оптимальную температуру брожения 37 °С (мезофильный режим) несмотря на суточные и сезонные колебания окружающей среды, связи с чем можно уверенно отметить, что Гибридная схема повышает энергоэффективность и автономность биоустановки, сокращая углеродный след по сравнению с традиционными системами энергоснабжения [7, 8].

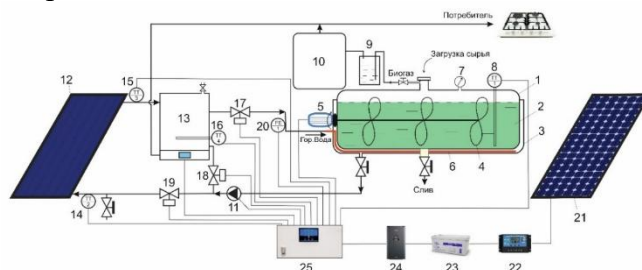


Рис.1. Принципиальная схема автоматизированной солнечно-биогазовой системы энергообеспечения биореактора [9]:

1 - биореактор, 2 - субстрат, 3 - рубашка, 4 - мешалка, 5 - двигатель для перемешивания, 6 - распределитель теплоносителя, 7 - манометр, 8 - температурный датчик для измерения субстрата, 9 - гидрозапор, 10 - газгольдер, 11 - циркуляционный насос, 12 - СВК, 13 - газовый котел с бойлером, 14 - датчик для измерения температуры теплоносителя у входа СВК, 15 - датчик для измерения температуры теплоносителя на выходе СВК, 16 - датчик для измерения температуры теплоносителя внутри газовой колонки, 17, 18, 19 - регулировочные электромагнитные клапаны, 20 - расходомер, 21 - ФЭС, 22 - контроллер заряда, 23 - аккумулятор, 24 - инвертор, 25 - блок автоматического управления.

На Рис.1 представлена принципиальная

схема гибридной солнечно-биогазовой установки, которая включает следующие основные компоненты: Биореактор с водяной рубашкой нагрева и мешалкой, куда загружается подготовленный органический субстрат; Система подачи субстрата – приёмный бункер или насос для загрузки предварительно измельченного и разбавленного до 90% влажности сырья; Система выгрузки шлама – отверстие или клапан для отвода отбродившего остатка (удобрения) из реактора. В верхней части биореактора установлен газоотвод с гидрозатвором, обеспечивающим выход биогаза и предотвращающим обратный поток. Высвобождающийся биогаз накапливается во внешнем газгольдере (газовом мешке или ёмкости).

Как видно из Рис.1. из газгольдера биогаз поступает в газовый котёл – водогрейный агрегат на биогазовом топливе, использующийся для подогрева теплоносителя. Основной контур отопления представляет собой замкнутую систему с циркуляцией теплоносителя (воды) между котлом, солнечным коллектором и рубашкой биореактора. Циркуляционный насос качает воду через СВК (днём) и/или через змеевик газового котла (ночью). Коллектор нагревает воду от солнца, а газовый котёл – сжигая биогаз. Для управления потоками установлены электромагнитные клапаны: один клапан на линии от насоса к СВК, второй – на линии к газовому котлу, а также клапан на газопроводе к горелке. Открывая или закрывая эти клапаны, система переключается между режимами нагрева: солнечным или газовым. Нагретый теплоноситель поступает в рубашку реактора, отдаёт тепло субстрату и возвращается охлаждённым обратно к насосу (закрывая контур). Также в контур встроены расходомер для контроля расхода воды (он необходим для мониторинга эффективности теплообмена и работы насоса). Давление в системе теплоносителя контролирует манометр.

Для электроснабжения автономной работы ГБУ установлена ФЭС, состоящая из: фотоэлектрической панели (мощностью 550 Вт), контроллера заряда, аккумуляторной батареи и инвертора. ФЭС днём заряжает аккумулятор, а накопленная энергия питает насос, мешалку,

клапаны и систему управления. Блок автоматического управления (на базе PID-регулятора) получает данные от датчиков температуры и управляет насосом, клапанами, мешалкой и нагревательными устройствами, обеспечивая стабильную работу всей установки. В сумме схема охватывает полный цикл: от подачи сырья и брожения – до получения, хранения и использования биогаза, утилизации остатка и поддержания температурного режима.

Таким образом разработанная гибридная солнечно-биогазовая установка позволяет эффективно поддерживать работу биореактора в автономном режиме.

Для оптимизации энергетической эффективности ГБУ, которая состоит из биореактора интегрированная с СВК (для выработки электроэнергии) и СВК (для подогрева реактора) формулируется многокритериальная целевая функция с учетом пяти оптимизируемых параметров A_{col} , P_{PV} , V_{bio} , T , ω . Предлагаемая гибридная система использует энергию солнца для поддержания оптимальной температуры брожения и обеспечения работы вспомогательных устройств, повышая выход биогаза и сокращая потребность во внешних энергоресурсах.

Ниже кратко перечислены и описаны пять оптимизируемых параметров в модели многокритериальной оптимизации гибридной биогазовой установки:

1. A_{col} — площадь СВК.

От этого параметра зависит количество улавливаемой солнечной тепловой энергии. Чем больше площадь, тем больше можно получать тепла для подогрева биореактора (и/или для других нужд), но при этом возрастают капитальные затраты и требования к свободной площади для размещения СВК.

2. P_{PV} — мощность ФЭС (солнечных модулей).

Определяет пиковую (установленную) мощность системы фотоэлектрических модулей. Чем выше P_{PV} , тем больше электроэнергии можно генерировать из солнечного излучения, снижая энергозатраты на внешнее электроснабжение и уменьшая выбросы CO₂. Однако большие фотомодули занимают значительную площадь и требуют больших

первоначальных вложений.

3. V_{bio} — *объем биореактора*.

Чем больше полезный объем биореактора, тем больший объем субстрата (органических отходов) можно переработать и, следовательно, получить больше биогаза. Но увеличение объема реактора увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты, а также требует достаточного количества сырья (биомассы). Существуют и конструктивные ограничения, и практические аспекты (например, доступный объем отходов).

4. T — *температура процесса* (температурный режим внутри биореактора).

Для разных типов анаэробного сбраживания оптимальными являются мезофильной (около 35÷40 °С) или термофильные (50÷55 °С) режимы. Повышение температуры обычно ускоряет метаногенез, повышая выход биогаза, однако требует более высоких затрат на нагрев. Если СВК покрывают потребность в тепле, это может окупаться, но при недостатке солнечной энергии слишком высокая температура увеличит внешние энергозатраты и может ухудшить общую эффективность.

5. ω — *скорость перемешивания субстрата* в биореакторе.

Оптимальный режим мешалки обеспечивает равномерное распределение субстрата и микроорганизмов, улучшая выход биогаза и теплоперенос, но при этом само перемешивание требует электроэнергии. Слишком низкая скорость вызывает расслоение среды, слишком высокая — избыточные энергозатраты и даже дестабилизацию микробных сообществ. Следовательно, существует определенная оптимальная величина ω , при которой достигается наилучшее соотношение «энергия перемешивания/выход биогаза».

Все эти пять параметров (A_{col} , P_{PV} , V_{bio} , T , ω) взаимосвязаны с точки зрения энергетического, экономического и экологического эффектов. В задаче многокритериальной оптимизации искомые параметры подобраны, чтобы достигать сразу нескольких целей: минимизация срока окупаемости, минимизация энергопотери и одновременно максимальное снижение выбросов CO_2 с учётом заданных технических и

экономических ограничений.

Данную задачу представим как задачу минимизации комплексного критерия, например посредством взвешенной суммы отдельных показателей:

$$F = w_1 T_{payback}(A_{col}, P_{PV}, V_{bio}, T, \omega) + w_2 E_{loss}(A_{col}, P_{PV}, V_{bio}, T, \omega) - w_3 CO_{2red}(A_{col}, P_{PV}, V_{bio}, T, \omega), \quad (1)$$

где $T_{payback}$ — срок окупаемости проекта; E_{loss} — суммарные энергопотери (или энергозатраты) системы; CO_{2red} — объем предотвращенных выбросов CO_2 (чем больше, тем лучше). Коэффициенты $w_1, w_2, w_3 > 0$ — весовые множители, приводящие критерии к сопоставимому виду и отражающие приоритеты. В таком виде функция F снижается при сокращении $T_{payback}$ и E_{loss} и при росте CO_{2red} , что соответствует требованиям задачи. Альтернативно, можно минимизировать каждый критерий по отдельности, рассматривая задачу как истинно многокритериальную (векторную) оптимизацию, где цели — $T_{payback}$ и E_{loss} (минимизация) и — CO_{2red} (минимизация отрицательного эквивалента для максимизации положительного эффекта).

Ограничения: при оптимизации вводятся ограничения технической реализуемости и экономической целесообразности которые состоят из следующих:

- **Площадь:** $A_{col} + A_{PV}(P_{PV}) \leq A_{max}$
 Площадь СВК плюс площадь, требуемая для фотоэлектрических панелей (в зависимости от установленной мощности P_{PV} , не должна превышать доступную площадь установки A_{max} . Это гарантирует вписывание системы в отведенную территорию.

- **Объем биореактора:** $V_{bio} \geq V_{min}$. Объем биогазового реактора должен быть не менее минимально необходимого V_{min} для обеспечения достаточной выработки биогаза, чтобы установка была экономически окупаемой.

- **Температура процесса:** $T_{min} \leq T \leq T_{max}$. Температура анаэробного процесса ограничена диапазоном, обеспечивающим жизнедеятельность микроорганизмов и стабильность процесса (например, мезофильный режим около 35÷40 °С или термофильный до 55 °С). Выход за эти пределы нарушает работу биореактора.

- **Скорость перемешивания:** $\omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max}$. Слишком низкое перемешивание (ω_{min}) может привести к расслоению субстрата, а слишком высокое (ω_{max}) – к избыточным энергозатратам и даже подавлению метаногенеза. Поэтому скорость ограничена разумным диапазоном.

Прочие эксплуатационные ограничения: например, допустимая нагрузка на систему отопления (если тепло от СВК недостаточно), максимальная мощность, выдаваемая в сеть, надежность и безопасность оборудования и пр. Эти ограничения вводятся по необходимости, чтобы решение оставалось практически осуществимым.

Таким образом, задача формулируется как нахождение таких A_{col} , P_{PV} , V_{bio} , T , ω , которые минимизируют F при выполнении всех указанных ограничений. В литературе встречается аналогичный подход – оптимизация сразу по экономическим, энергетическим и экологическим показателям. Например, известно решение для интегрированных энергосистем, где одновременно минимизируются эксплуатационные затраты, потери энергии и выбросы CO_2 . Также зачастую непосредственно выбирают срок окупаемости в качестве целевой функции при энергетическом проектировании, что отражает приоритет экономической эффективности.

При решении описанной оптимизационной задачи можно применить различные методы. Выбор метода зависит от того, сведена ли задача к одной целевой функции или рассматривается многокритериально, а также от математических свойств модели (линейность, дифференцируемость и т.д.). Также используются специализированные программные комплексы для оптимизации гибридных энергоустановок. Например, существуют инструменты HOMER, Hybrid Optimization Model или собственные скрипты, использующие библиотеки оптимизации [10, 11]. Они позволяют учесть стохастические характеристики (солнечную радиацию, нагрузку и т.д.) и применяют встроенные оптимизаторы для подбора размеров систем. В таких пакетах часто используется либо линейное/динамическое программирование, либо генетические

алгоритмы. Заранее задавая граничные условия и ограничения (площадь, минимум биогаза, бюджет и прочие), программа находит оптимальную конфигурацию.

Таким образом метод оптимизации должен учитывать необходимость удовлетворить ограничения и особенности целевой функции. Для многокритериальной задачи предпочтительно сначала получить набор Pareto-оптимальных решений, а затем, основываясь на внешних критериях (например, бюджете или политике снижения выбросов), выбрать конкретное оптимальное решение [12].

Представленная функциональная схема ГБУ (Рис. 2) визуализирует все ключевые процессы – от подготовки сырья до утилизации энергии биогаза. Система управления на базе PID-регулятора обеспечивает автоматическое поддержание оптимальной температуры брожения $37^\circ C$, переключая источники тепла (СВК днём, биогазовый котёл ночью) и задействуя резерв при необходимости. Результаты расчётов показывают, что при объёме реактора $0,5 \text{ м}^3$ ежедневные теплотери $6,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ могут быть компенсированы комбинацией солнечного тепла ($2 \div 2,5 \text{ м}^2$ коллекторов) и собственного биогаза ($0,77 \text{ м}^3/\text{ночь}$) практически полностью, с минимальным использованием электрического нагрева. Суточное электропотребление ($2,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$) покрывается фотоэлектрической системой $0,55 \text{ кВт}$ и аккумулятором с ёмкостью $6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, обеспечивая энергетическую независимость системы (Табл.1). В целом, гибридный подход повышает энергоэффективность установки, позволяя утилизировать возобновляемые источники энергии (солнце и биогаз) максимально полно. Это снижает эксплуатационные затраты и выбросы CO_2 и делает установку пригодной для применения в условиях отсутствия стабильного электрообеспечения и в целях устойчивого обеспечения энергией аграрного хозяйства.

В Табл.1 представлены сводные характеристики исследуемой гибридной биогазовой установки.

На Рис.2 представлена влияние площади СВК (A_{col}) на критерии эффективности системы.

Таблица 1.

**Сводные характеристики гибридной
 биогазовой установки**

Параметр	Значение (ед.)	Примечание/источник
Объём биореактора, всего	0,5 м³	полный объём реактора
Объём рабочий (субстрат)	0,35 м³	70% заполнения
Масса загруженного субстрата	402,5 кг	при $\rho=1150$ кг/м³, влажность 90%
Влажность субстрата	90%	(сухое вещество 40 кг)
Рабочая температура субстрата	37 °C	мезофильный режим
Суточная потребность в тепле	6,2 кВт·ч/сут	для $\Delta T=12$ °C (с запасом 10%)
КПД СВК (теплоноситель)	70%	превращение солнца в тепло воды
КПД передачи тепла рубашкой	82%	от воды к субстрату
Совокупный КПД солнечного нагрева	57%	0,70-0,82
Необходимая энергия от солнца	10,8 кВт·ч/сут	для получения 6,2 кВт·ч в реактор
Рекомендуемая площадь СВК	2,5 м²	при 4÷5 кВт·ч/м²·сут инсоляции
Выход биогаза за цикл (28 суток)	20 м³	из 40 кг СВ при уд. выходе 0,5 м³/кг
Среднесуточный выход биогаза	0,7÷0,8 м³/сут	в условиях стабильной работы
Теплотворность биогаза (60% CH ₄)	6 кВт·ч/м³	5,98 кВт·ч/м³ принято в расчётах
Потребность биогаза на ночное отопление	0,77 м³/ночь	для 4,13 кВт·ч тепла
Доля ночного тепла, покрываемая биогазом	до 90%	по результатам расчёта
Суточное электропотребление оборудования	2,3 кВт·ч/сут	мешалка, насос, контроллер
Мощность ФЭС	550 Вт	площадь 2 м², КПД 21%
Выработка ФЭС (яркий день)	2,5 кВт·ч/сут	при >5 час эквив. солнца
Рекомендуемая аккумуляторная батарея	48 В, 120÷150 А·ч	5,7÷7,2 кВт·ч ёмкости
Резерв по электропитанию	2 суток без солнца	при батарее 6÷7 кВт·ч

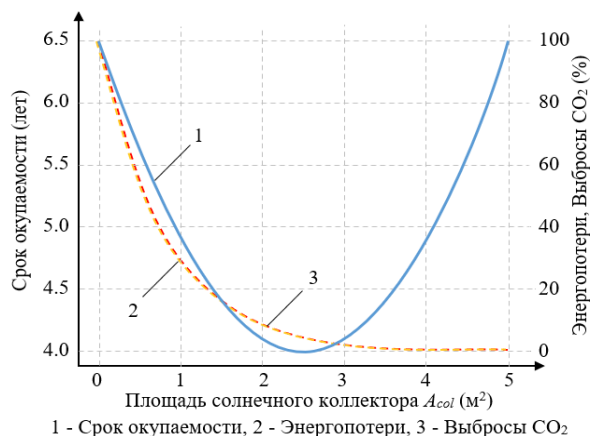


Рис.2. Качественное влияние площади СВК на критерии эффективности.

С ростом площади СВК A_{col} возрастает улавливаемая солнечная тепловая энергия, что сокращает потребность во внешнем тепле для подогрева биореактора. Как показано на графике, сначала увеличение A_{col} приводит к снижению срока окупаемости (синяя кривая) – система быстрее окупается за счёт экономии топлива. Одновременно энергопотери (оранжевая штриховая) и выбросы CO₂ (красная штрихпунктирная) падают, так как большая доля тепла покрывается солнцем вместо сжигания биогаза или ископаемого топлива. При достижении оптимальной области (A_{col} около 2÷3 м² для данного 0,5 м³ реактора) солнечного тепла хватает практически полностью закрыть теплотребности. Дальнейшее увеличение A_{col} даёт эффект насыщения: энергопотери и CO₂-эмиссии уже близки к нулю (всё тепло от солнца), а срок окупаемости начинает расти из-за непропорционально больших инвестиций в коллекторы. Избыточная площадь ведёт к лишним капитальным затратам и простаивающей мощности в летние периоды, не улучшая существенно энергоэффективность. Таким образом, слишком малый A_{col} (<1÷2 м²) приводит к высокой зависимости от внешнего топлива и большим выбросам, а слишком большой (>3 м²) – к перерасходу средств при минимальном добавочном эффекте. Оптимум лежит в диапазоне, где солнечная энергия покрывает 100% дневной потребности и значительную часть ночной – для данного проекта это около 2,5 м², обеспечивая минимальные потери и выбросы при наименьшем сроке окупаемости.

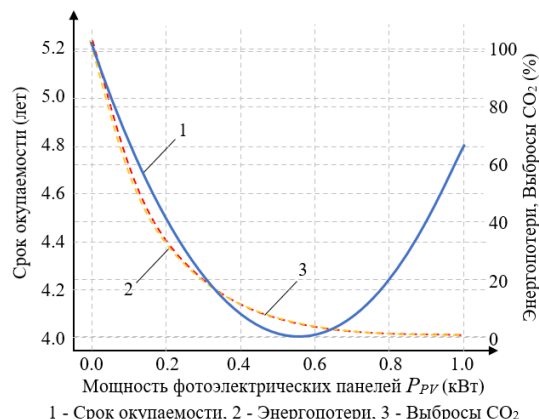


Рис.3. Качественное влияние мощности ФЭС на критерии эффективности.

На Рис.3 представлена влияние мощности ФЭС (P_{PV}) на критерии эффективности системы.

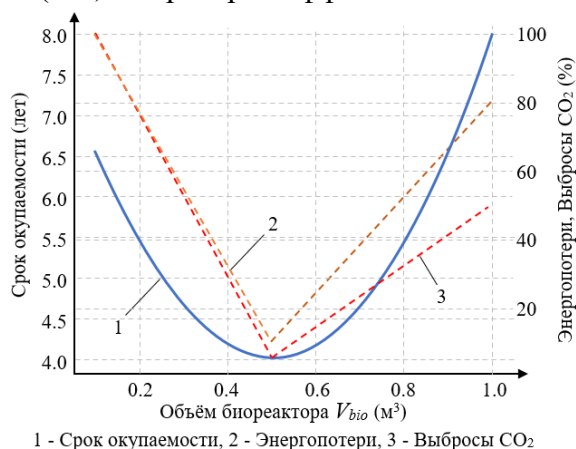


Рис.4. Качественное влияние объёма биореактора на критерии эффективности.

Увеличение установленной мощности ФЭС снижает потребление внешней электроэнергии для привода мешалок, насосов, нагревателей и др. потребителей. При нулевой или малой P_{PV} установка вынуждена брать 2÷3 кВт·ч/сут из сети или от генератора, что увеличивает энергопотери и связанные выбросы CO₂ (см. оранжевую и красную линии при $P_{PV} \rightarrow 0$). По мере роста P_{PV} эти показатели быстро уменьшаются – достаточно мощности ФЭС, чтобы покрыть суточное электропотребление оборудования (2,3 кВт·ч/сут). Срок окупаемости (синяя кривая) также сокращается, поскольку экономятся расходы на электроэнергию: например, при $P_{PV} 0.5 \div 0.6$ кВт (как в базе 550 Вт) солнечная генерация покрывает всё энергопотребление, и система становится автономной по электричеству. Дальнейшее увеличение P_{PV} выше этого оптимума даёт меньший эффект. Энергопотери и CO₂-выбросы уже минимальны (вся энергия оборудования от ФЭС), поэтому излишняя мощность панелей либо простаивает (в автономной схеме), либо отдаётся во внешнюю сеть с низкой добавочной выгодой. В то же время большие фотоэлектрические массивы требуют значительных инвестиций и площади, удлинняя окупаемость. На графике после 0,55 кВт срок окупаемости начинает расти из-за перенасыщения фотоэлектрической системой. Таким образом, оптимальная P_{PV} – это мощность,

достаточная для покрытия собственных нужд (для проекта 0,5÷0,6 кВт), при которой достигаются минимальные потери и выбросы. Меньшие значения приводят к расходованию внешней электроэнергии (увеличивая углеродный след), а большие – к неоправданным затратам при незначительном росте выработки.

На Рис. 4 представлена влияние объёма биореактора (V_{bio}) на критерии эффективности системы.

Объём реактора определяет количество субстрата, которое может одновременно находиться в переработке, и длительность анаэробного удерживания (регулирует степень разложения). При слишком малом V_{bio} (левая часть графика) субстрат не успевает полноценно переработаться (или приходится уменьшать суточную загрузку), что приводит к неполученному биогазу – высоким энергопотерям и выбросам CO₂ (невысвобожденный метан может выделяться при последующем хранении отходов). Кроме того, малая установка даёт мало энергии, а фиксированные расходы (капитальные, эксплуатационные) остаются, поэтому срок окупаемости сильно возрастает. С ростом V_{bio} сначала наблюдается резкое улучшение: увеличивается выход биогаза (больше топлива заменяет ископаемое), снижаются удельные потери и эмиссии. Срок окупаемости сокращается, так как большее производство энергии приносит больше экономии/дохода. Однако после достижения некоторого оптимума (для рассматриваемого случая 0,5 м³ рабочего объёма) дальнейшее увеличение V_{bio} даёт эффект убывающей отдачи. Если объём превышает доступное количество сырья или необходимое для обеспечения разумного времени удерживания (30 дней), лишний объём будет недозагружен. При $V_{bio} > 0.5 \div 0.6$ м³ кривая окупаемости на графике идёт вверх: дополнительные капиталовложения в большой реактор не окупаются, поскольку производство биогаза уже ограничено притоком сырья. Энергопотери при этом растут из-за увеличения теплопотерь большого аппарата и траты энергии на поддержание пустующего объёма. Выбросы CO₂ также увеличиваются, ведь лишние энергозатраты (например, на обогрев большого

объёма) частично компенсируются за счёт сжигания топлива. Таким образом, слишком большой реактор работает неэффективно – он дороже, требует больше тепла и электроэнергии на единицу полученного биогаза. Оптимальный диапазон V_{bio} определяется потребным временем ферментации и наличием сырья. В нашем случае оптимум $0,5 \text{ м}^3$ (70% заполнения $0,35 \text{ м}^3$ субстрата) обеспечивает 28 суток удерживания, близкое к полному сбраживанию 40 кг сухого вещества, при умеренных потерях тепла. При отклонении от этого объёма в меньшую сторону – неполная ферментация (невостребованный потенциал энергии), в большую – перерасход ресурсов при почти том же выходе биогаза.

На Рис.5 представлено влияние температуры процесса (T) на критерии эффективности системы.

Температурный режим значительно влияет на скорость микробиологических реакций и выход биогаза. При низких температурах ($<30^\circ\text{C}$) процесс замедляется: выход газа невелик, хотя энергозатраты на подогрев минимальны. На графике слева видно, что при понижении T срок окупаемости быстро возрастает (синяя линия >8 лет), выбросы CO_2 также высоки – установка вырабатывает мало возобновляемой энергии и почти не замещает ископаемое топливо. Кроме того, в недоразложенном субстрате остаётся органика, которая при дальнейшем компостировании может выделить метан/ CO_2 , увеличивая суммарные эмиссии. С повышением температуры от психрофильных значений к мезофильным (37°C) ситуация улучшается: выход метана резко растёт, выбросы CO_2 падают (больше углерода утилизируется в биогазе вместо прямых выбросов). Одновременно умеренно увеличиваются и энергопотери – требуется подвод тепла $6 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}$ для поддержания 37°C (при $\Delta T=12^\circ\text{C}$), но эту потребность покрывает СВК и часть биогаза. В диапазоне $35\div 40^\circ\text{C}$ достигается оптимум: максимальный выход биогаза при ещё умеренных затратах на нагрев. Для нашего реактора мезофильный режим 37°C оказался близким к оптимальному по всем критериям (см. минимум кривых на графике в этой области). Дальнейший переход в термофильный режим

($50\div 55^\circ\text{C}$) даёт прирост выработки метана (реакции идут быстрее) и улучшает обеззараживание, но требует существенно большего подвода тепла. Если СВК недостаточно, для поддержания высокой T приходится сжигать больше собственного биогаза или подключать электронагрев. Это проявляется в росте энергопотерь (оранжевая штриховая кривая идёт вверх после $40\div 45^\circ\text{C}$) и увеличении условных выбросов CO_2 (красная линия растёт вследствие расхода дополнительного топлива). Срок окупаемости при этом начинает ухудшаться, так как часть произведённой энергии тратится на нагрев, снижается чистый выход на продажу/потребление. Кроме того, термофильные системы сложнее в эксплуатации (риск всплеск ацидогенеза, требования к изоляции), что может косвенно влиять на экономику.

Таким образом, зависимость показателей от T носит нелинейный характер: имеется оптимальная точка (мезофильная зона $35\div 40^\circ\text{C}$), при которой достигается наилучший баланс между выходом метана и затратами на его обеспечение. Ниже этого диапазона – низкая производительность и недоиспользованный потенциал сырья; значительно выше – рост затрат перевешивает рост выработки, снижая эффективность системы.

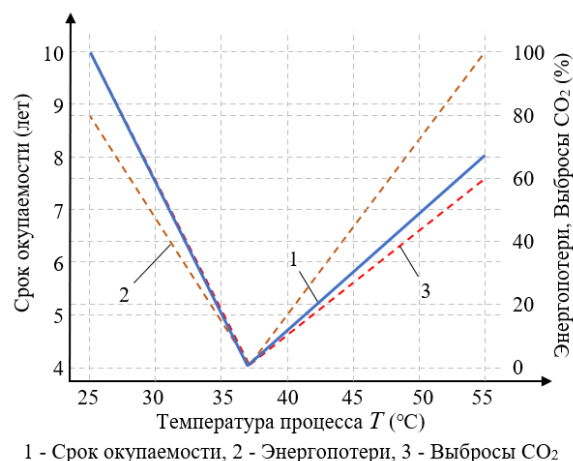


Рис.5. Качественное влияние температуры брожения на критерии эффективности.

На Рис.6 представлена влияние скорости перемешивания (ω) на критерии эффективности системы.

Перемешивание субстрата обеспечивает

равномерность температуры и распределение питательных веществ между микроорганизмами, поэтому умеренное мешание повышает выход биогаза. Однако работа мешалок потребляет электроэнергию и при чрезмерной интенсивности может даже подавлять метаногенез (из-за дестабилизации микрофлоры). График иллюстрирует наличие оптимума по скорости перемешивания. При $\omega \rightarrow 0$ (отсутствие мешания) среда в реакторе стратифицируется: образуются плавающая корка и осадок, снижается контакт микроорганизмов с субстратом. Это ведёт к неполному сбраживанию – часть органики не превращается в метан, что повышает энергопотери (нереализованная энергия в отходах) и связанные выбросы CO_2 . В то же время затраты энергии на мешалку отсутствуют, поэтому срок окупаемости при нулевом перемешивании не столь катастрофичен, как при нулевом отоплении, но всё же хуже оптимального (см. синюю кривую около 0 – окупаемость 10 лет). При увеличении ω от 0 до оптимального значения состояние улучшается: срок окупаемости сокращается (большой выход метана окупает расход энергии на мешалку), а потери и выбросы падают благодаря более полному извлечению энергии из субстрата.

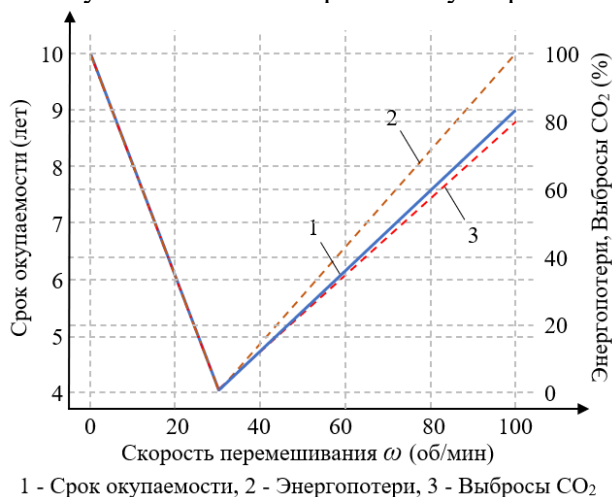


Рис.6. Качественное влияние интенсивности перемешивания на критерии эффективности.

Обобщение опыта эксплуатации таковых установок показывают, что даже периодическое медленное перемешивание может увеличить выход биогаза на 20÷30% по сравнению с

непромешиваемой средой. Например, низкая скорость 150 об/мин даёт больше газа, чем 25 об/мин в одном исследовании, но слишком высокая интенсивность >700 об/мин наоборот снизила выход. На графике оптимум 30% от максимальной скорости соответствует минимальным потерям и выбросам. В этой точке достигается лучшее соотношение: рост производства метана покрывает затраты энергии на мешалку. Если же ω продолжать увеличивать (правая часть графика), появляется эффект перенасыщения: биогазовый выход уже не растёт, даже может снижаться, а потребление электроэнергии на перемешивание возрастает нелинейно (мощность ω^3 для мешалок). Энергопотери (штриховая линия) резко растут – по оценкам, мешалка на высоких оборотах может потреблять до 54% всей энергии, потребляемой установкой. Это приводит к удлинению срока окупаемости (при $\omega \rightarrow 100\%$ он вновь приближается к 8÷9 годам) и увеличению выбросов CO_2 , поскольку лишняя электроэнергия либо берётся из внешней сети (углеродный след), либо отбирается от выработанного биогаза, снижая чистый экологический эффект. Таким образом, перемешивание имеет ярко выраженный нелинейный характер влияния: отсутствие мешания и чрезмерное мешание одинаково нежелательны. Рекомендуется выбирать умеренную скорость/режим перемешивания (например, периодическое включение мешалки), при котором достигается максимальный выход газа при минимуме затрат энергии.

Выводы. Развитие гибридной солнечно-биогазовой установки требует балансировки множества параметров для достижения наилучшей эффективности. Проведённый качественный анализ показал, что для каждого из ключевых параметров существует оптимальный диапазон, при котором одновременно минимизируются срок окупаемости, энергопотери и выбросы CO_2 . При отклонении от этого диапазона показатели системы резко ухудшаются из-за либо недоиспользования потенциала (в случае недостаточных значений параметров), либо убывающей отдачи и роста внутренних затрат (в случае чрезмерных величин).

В частности, оптимальными для рассматриваемой небольшой ГБУ оказались: площадь СВК порядка $2 \div 3 \text{ м}^2$, мощность PV-панелей $0,5 \div 0,6 \text{ кВт}$, объём биореактора $0,5 \text{ м}^3$, мезофильный температурный режим $35 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$ и умеренная скорость перемешивания. В этих условиях система способна практически полностью удовлетворять свои энергетические потребности за счёт солнечной энергии, сводя внешние энергозатраты и выбросы CO_2 к минимуму. При этом нелинейный характер влияния подтверждает необходимость комплексного подхода при проектировании: увеличение параметра улучшает эффективность лишь до определённого предела, после которого

дополнительные инвестиции или усложнение системы не оправдывают себя. Данные выводы могут служить основой для методики многокритериальной оптимизации ГБУ. Главным практическим результатом является демонстрация того, что сбалансированная конфигурация (согласование размеров солнечных систем, биореактора и режимов работы) способна обеспечить высокую энергоэффективность и экологичность без чрезмерного увеличения стоимости или сложности системы. Это подчёркивает целесообразность тщательного подбора каждого параметра на этапе проектирования гибридных биогазовых установок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан №561 от 25 октября 2023 г. Об утверждении Национальной таксономии «зелёной» экономики.
- [2] Указ Президента Республики Узбекистан №УП-5 от 4 января 2024 г. О мерах по совершенствованию системы управления отходами и снижению их негативного воздействия на экологическую обстановку.
- [3] Roldán-Porta, C., Roldán-Blay, C., Dasí-Crespo, D., & Escrivá Escrivá, G. (2023). Optimising a biogas and photovoltaic hybrid system for sustainable power supply in rural areas. *Applied Sciences*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/app13042155>
- [4] Avezova, N. R., Matchanov, N. A., & Usmanov, A. Y. (2025). Hybrid biogas plants: Economic viability and environmental benefits. *Alternative Energy*, 1(16), 71–81.
- [5] Авезова, Н. Р., Тоиров, О. З., & Усманов, А. Ю. (2024). Гибридные биогазовые установки: технологии и перспективы. *Проблемы информатики и энергетики*, (5), 76–92.
- [6] O'z DSt 2798:2017. (2017). Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам.
- [7] Ennemiri, N., Berrada, A., Emrani, A., Abdelmajid, J., & El Mrabet, R. (2024). Optimization of an off-grid PV/biogas/battery hybrid energy system for electrification: A case study in a commercial platform in Morocco. *Energy Conversion and Management: X*, 21, 100508. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100508>
- [8] Nassereddine, M., Nassreddine, G., & El Arid, A. (2024). Hybrid photovoltaic and biogas system for stable power system. *Next Energy*, 5, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100172>
- [9] Бугаков, А. Г., Авезова, Н. Р., Мирзабаев, А. М., Вохидов, А. У., & Усманов, А. Ю. (2018). Солнечно-биогазовая система энергообеспечения биореактора [Патент на полезную модель № FAP 01315 (UZ)]. Официальный бюллетень Агентства по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан, №8.
- [10] Bahramara, S., Parsa Moghaddam, M., & Haghifam, M. R. (2016). Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 609–620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.039>
- [11] Pal, A., & Bhattacharjee, S. (2020). Effectuation of biogas-based hybrid energy system for cost-effective decentralized application in small rural community. *Energy*, 203, 117819. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117819>