

УДК: 620.98

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ, СРОКА ОКУПАЕМОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ГИБРИДНОЙ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Усманов Абдурауф Юлдашбоевич^{1,2} – младший научный сотрудник,
ORCID: 0000-0001-6085-6298, E-mail: usmonov_abdurauf@mail.ru

¹Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан
г. Ташкент, Узбекистан

²Национальный научно-исследовательский институт возобновляемых источников
энергии при Министерстве энергетики Республики Узбекистан
г. Ташкент, Узбекистан

***Аннотация.** Представлены результаты комплексной оценки маломасштабной гибридной биогазовой установки, предназначенной для фермерских хозяйств Узбекистана. Объект исследования включает 0,5 м³ биореактор, солнечный коллектор площадью 2 м² и фотоэлектрическую панель мощностью 0,55 кВт, обеспечивающие тепловую и электрическую энергию для биореактора практически без внешнего энергоснабжения.*

Методика расчёта основана на составлении энергетического баланса с учётом КПД всех подсистем.

Вычисленная суммарная энергетическая эффективность установки составила около 37% (то есть примерно 1/3 вовлечённой энергии преобразуется в полезное тепло и электроэнергию). Гибридная система покрывает до 96% своих энергетических потребностей за счёт возобновляемых источников, демонстрируя высокую степень энергетической автономности. Экономический анализ показал, что годовой совокупный эффект составляет 1,8 млн сум за счёт замещения 840 кВт·ч электроэнергии, 262 м³ природного газа и производства 600 кг биоудобрения. Срок окупаемости оценивается примерно в 7 лет. Экологический эффект выражается в сокращении выбросов CO₂ порядка 2,0 т/год (около 20 т за 10 лет работы) благодаря замещению ископаемого топлива биогазом и солнечной энергией.

Таким образом, гибридная солнечно-биогазовая система представляет собой эффективное решение для энергоснабжения удалённых фермерских хозяйств Узбекистана. Она обеспечивает рациональную утилизацию отходов животноводства с одновременным получением тепла, электроэнергии и ценного биоудобрения, повышая энергетическую автономность и экологическую устойчивость сельского хозяйства. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал внедрения подобных маломасштабных установок в аграрном секторе, что будет способствовать развитию возобновляемой энергетики и снижению углеродного следа в регионе.

Ключевые слова: гибридная биогазовая установка, возобновляемая энергия, энергетическая эффективность, энергетическая автономность, срок окупаемости, биоудобрения, сокращение выбросов CO₂.

UDC: 620.98

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY, PAYBACK PERIOD, AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF A HYBRID BIOGAS PLANT

Usmanov, Abdurauf Yuldashboevich^{1,2} – junior researcher

¹Physical-Technical Institute of Uzbekistan Academy of Sciences,
Tashkent city, Uzbekistan

²National Scientific Research Institute of Renewable Energy Sources
under the Ministry of Energy, Tashkent city, Uzbekistan

Abstract. *This paper presents the results of a comprehensive evaluation of a small-scale hybrid biogas plant for farms in Uzbekistan. The system under study includes a 0.5 m³ bioreactor, a 2 m² solar collector, and a 0.55 kW photovoltaic panel, providing thermal and electrical energy for the bioreactor with minimal external input.*

Performance was evaluated using an energy balance approach accounting for all subsystem efficiencies.

The overall energy efficiency of the plant is about 37% (i.e., roughly one-third of the input renewable energy is converted into useful heat and electricity). The hybrid system can supply up to 96% of its energy needs from renewable sources, demonstrating a high level of energy autonomy. Economic analysis indicates an annual benefit of approximately 1.8 million UZS by replacing grid electricity and natural gas with renewable energy and utilizing the produced biofertilizer. The simple payback period is about 7 years. Environmentally, the plant reduces CO₂ emissions by 2.0 tons per year (roughly 20 tons over 10 years) through the substitution of fossil fuels with biogas and solar energy.

Thus, the hybrid solar-biogas system represents an effective solution for supplying energy to remote farming communities in Uzbekistan. It enables the efficient utilization of livestock waste while simultaneously producing heat, electricity, and valuable biofertilizer, thereby enhancing the energy autonomy and environmental sustainability of the agricultural sector. The obtained results demonstrate the high potential for implementing such small-scale systems in agriculture, contributing to the development of renewable energy and the reduction of the carbon footprint in the region.

Keywords: *hybrid biogas plant, renewable energy, energy efficiency, energy autonomy, payback period, biofertilizer, CO₂ emission reduction.*

UO‘K: 620.98

GIBRID BIOGAZ QURILMASINING ENERGIYA SAMARADORLIGI, O‘ZINI QOPLASH MUDDATI VA EKOLOGIK TA‘SIRINI KOMPLEKS BAHOLASH

Usmanov Abdurauf Yuldashboyevich^{1,2} – kichik ilmiy xodim

¹O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Fizika-texnika instituti
Toshkent sh., O‘zbekiston

²O‘zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi huzuridagi Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. *O‘zbekiston fermer xo‘jaliklari uchun mo‘ljallangan kichik hajmli gibrid biogaz qurilmasining samaradorligini kompleks baholash natijalari taqdim etildi. Tadqiqot obyekti 0,5 m³ hajmli bioreaktor, 2 m² yuzaga ega quyosh issiqlik kollektori va 0,55 kVt quvvatli fotoelektr panelidan iborat bo‘lib, ular bioreaktorni deyarli tashqi energiya manbalarisiz zarur issiqlik va elektr energiya bilan ta‘minlaydi.*

Hisob-kitob metodikasi tizimning barcha qismlarining samaradorligini hisobga olgan holda energetik balans tuzishga asoslangan.

Natijada qurilmaning umumiy energetik samaradorligi 37% ga teng ekani aniqlandi (ya‘ni, tizimga kiritilgan energiyaning taxminan uchdan bir qismi foydali issiqlik va elektr energiyaga aylantiriladi). Gibrid tizim energiya ehtiyojlarining 96% gacha qismini qayta tiklanuvchi manbalar hisobidan qoplay olishi, ya‘ni yuqori darajadagi energetik mustaqillikka ega ekani ko‘rsatildi. Iqtisodiy tahlil yiliga taxminan 1,8 million so‘mlik umumiy samara berishini ko‘rsatdi; bunga elektr tarmog‘idan 840 kVt:soat elektr energiyasi va 262 m³ tabiiy gazni tejash hamda yiliga 600 kg

bioo'g'it ishlab chiqarish hisobidan erishildi. Ushbu qurilmaning o'zini qoplash muddati taxminan 7 yilni tashkil etadi. Shuningdek, mazkur tizimni qo'llash natijasida yiliga 2,0 tonna (10 yil davomida 20 tonna) CO₂ gazining atmosferaga chiqarilishi oldi olinadi.

Shu tariqa, quyosh-biogazli gibridd tizim O'zbekistonning chekka hududlaridagi fermer xo'jaliklarini energiya bilan ta'minlash uchun samarali yechim hisoblanadi. Ushbu tizim chorvachilik chiqindilarini oqilona qayta ishlash orqali issiqlik, elektr energiyasi va qimmatli bioo'g'it olish imkonini beradi hamda qishloq xo'jaligining energetik mustaqilligini va ekologik barqarorligini oshiradi. Olingan natijalar bunday kichik quvvatli qurilmalarni agrar sohada joriy etishning yuqori salohiyatga ega ekanligini ko'rsatadi, bu esa qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish va mintaqadagi uglerod izini kamaytirishga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: *gibridd biogaz qurilmasi, qayta tiklanuvchi energiya, energiya samaradorligi, energiya mustaqilligi, o'zini qoplash muddati, bioo'g'it, CO₂ chiqindilarini kamaytirish.*

Введение

В последние годы вопросы энергоэффективности и устойчивого развития приобретают особую актуальность в условиях глобального изменения климата и энергетического перехода. Сельские и отдалённые регионы, особенно в странах с высоким аграрным потенциалом, всё чаще рассматривают гибридные энергетические установки как перспективную альтернативу централизованному энергоснабжению [1-3].

Одним из таких решений является гибридная биогазовая установка (ГБУ), сочетающая в себе возможности утилизации органических отходов, выработки биогаза, а также использования возобновляемых источников энергии, таких как солнечные коллекторы и фотоэлектрические панели. Это обеспечивает как энергетическую автономность, так и снижение углеродного следа [4, 5].

Многочисленные исследования показывают, что интеграция солнечных и биогазовых компонентов позволяет компенсировать суточные колебания энергопотребления, снижать зависимость от ископаемых источников и минимизировать тепловые потери при соответствующем проектировании [6]. Однако для эффективного внедрения подобных установок необходимы подробные расчёты их энергетической эффективности, экономической целесообразности и экологического эффекта, учитывающие как локальные климатические условия, так и специфику сельскохозяйственных отходов.

В работах [7, 8] представлены расчётные исследования теплотехнических параметров систем вентиляции и теплоснабжения животноводческого комплекса, выполненные с целью оптимизации микроклимата на основе использования энергии ГБУ. В настоящем исследовании обоснованы конструктивно-технологические параметры установки, включая габариты биореактора, необходимые для обеспечения теплового режима и вентиляции коровника объёмом 6000 м³ на 300 голов скота, а также определены выходные характеристики системы для оценки её энергетической эффективности.

Настоящая работа направлена на комплексную оценку эффективности маломасштабной гибридной ГБУ, предназначенной для фермерских хозяйств Узбекистана, с акцентом на энергетический баланс, срок окупаемости и потенциал сокращения выбросов CO₂.

Методы и материалы

Как известно по [9] энергетическую эффективность ГБУ можно определить, как отношение суммарной полезной выходной энергии системы (тепловой + электрической) к общей затраченной энергии на её работу за тот же период. Это характеризует, насколько эффективно установка преобразует поступающую энергию в полезный выход (тепло и электроэнергию). В идеале этот коэффициент стремится к 1 (или 100%), но в реальности меньше из-за потерь и неполного КПД компонентов.

На рис.1 представлена принципиальная схема автоматизированной солнечно-биогазовой системы энергообеспечения биореактора [10], которая комбинирована с солнечными технологиями.

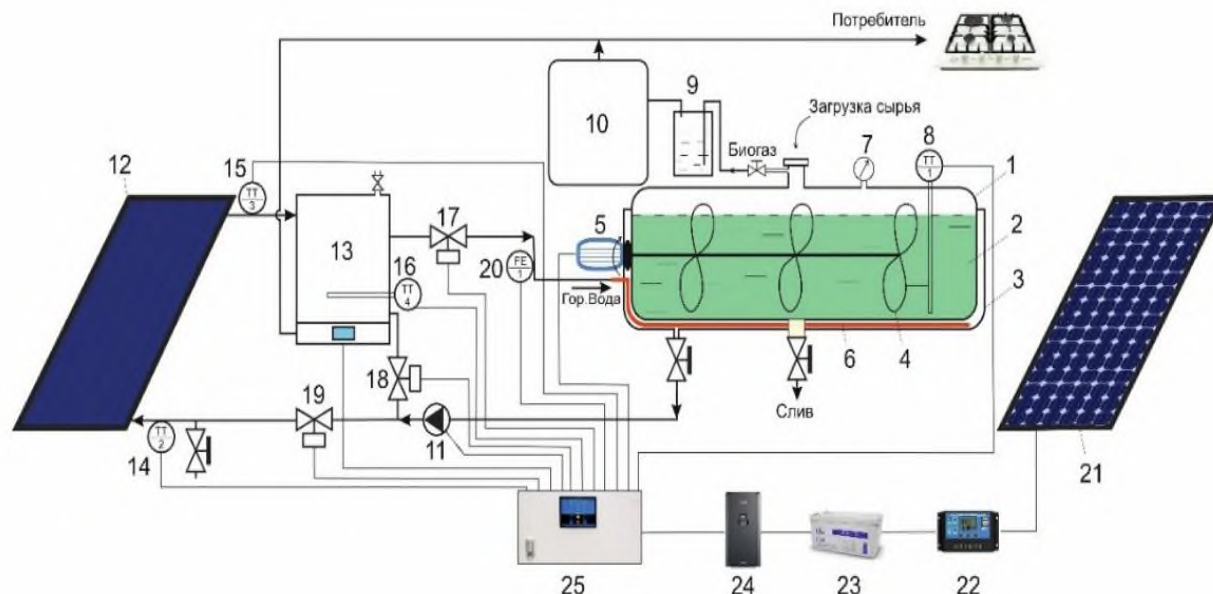


Рис. 1. Принципиальная схема автоматизированной солнечно-биогазовой системы энергообеспечения биореактора [10]: 1 — биореактор, 2 — субстрат, 3 — рубашка, 4 — мешалка, 5 — двигатель для перемешивания, 6 — распределитель теплоносителя, 7 — манометр, 8 — температурный датчик для измерения субстрата, 9 — гидрозатвор, 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 — ФЭП, 22 — контроллер заряда, 23 — аккумулятор, 24 — инвертор, 25 — блок автоматического управления.

В табл.1 представлена информация о составляющие элементы ГБУ и их стоимости на основе [11].

Таблица 1

Элементы и стоимость гибридной биогазовой системы

Элемент системы	Описание / Параметры	Кол-во	Цена за 1 шт (USD)	Общая цена (USD)	Общая цена (CUM)
Биореактор (0,5 м³)	металлический/пластиковый, герметичный	1	500	500	6500000
Изоляция (пенополиуретан)	3 см	1	70	70	910000
Плоский солнечный коллектор	2 м², эффективность 70%	1	350	350	4550000
Солнечные панели (PV)	550 Вт, монокристаллические	1	180	180	2340000
Аккумулятор	12В, 200Ач (LiFePO ₄ или AGM)	1	200	200	2600000
Электрический нагреватель (ТЭН)	1.5 кВт, 24/220В	1	25	25	325000

Газовая горелка для биогаза	с автоматикой	1	100	100	1300000
Контроллер заряда	MPPT, 60А, 24В	1	100	100	1300000
Инвертор	24В/220В, 3 кВт	1	220	220	2860000
Насос	для циркуляции теплоноситель	1	50	50	650000
Контроллер для управления датчики	термостат, датчики, реле	1	50	50	650000
Мотор	для перемешивания субстрата	1	50	50	650000
Трубы	для подключения к системе		50	50	650000
Электромагнитный клапан	для управления теплоносителя	3	15	45	585000
Термопара	для измерения температуры (субстрата, теплоносителя)	4	5	15	195000
Сумма				1505	19565000

В рассматриваемой ГБУ выходная энергия включает: (1) тепло, вырабатываемое солнечным коллектором и передаваемое для нагрева биореактора днём, (2) тепло от сжигания биогаза для обогрева ночью, и (3) электроэнергию от фотоэлектрической панели (ФЭП), используемую для питания оборудования (мешалка, насосы, а также резервный электронагрев). Согласно исходным данным, суточная потребность в тепле для поддержания температуры биореактора составляет около 6,2 кВт·ч (это компенсирует теплопотери через изоляцию). Суточная потребность в электроэнергии на работу системы (мешалка, насос циркуляции и др.) оценивается в 2,3 кВт·ч.

Результаты и обсуждения

Таким образом, общая полезная энергия для суток – порядка $E_{\text{полезн}} = 6,2 + 2,3 = 8,5$ кВт·ч. Эта энергия непосредственно расходуется на полезные цели: поддержание температуры брожения (тепло) и обеспечение работы оборудования (электричество).

При этом отметим, что затраченная энергия — это суммарная энергия, которую система должна получить из различных источников, чтобы обеспечить вышеуказанные 8,5 кВт·ч. ГБУ является гибридной, поэтому энергия поступает из нескольких источников: солнечная радиация (для коллектора и ФЭП), химическая энергия биогаза, а при недостатке – внешняя электроэнергия. При расчёте учитываем КПД каждого подсистемы и потери:

- **Солнечный коллектор:** площадь 2 м², КПД около 70%. Днём коллектор поглощает солнечное излучение и нагревает теплоноситель. Если для поддержания биореактора днём нужно, например, $Q_{\text{сол.полн}} = 3,1$ кВт·ч тепла (половина суточной потребности, оставшуюся половину покрывает биогаз ночью – см. ниже), то необходимая энергия солнечной радиации на коллектор составит:

$$Q_{\text{сол.затр}} = \frac{Q_{\text{сол.полн}}}{\eta_{\text{кол}}} = \frac{3,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}}{0,70} = 4,43 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1)$$

то есть около 4,43 кВт·ч солнечной энергии в день должно поступить на коллектор. Это соответствует, например, дневной инсоляции порядка 2,2 кВт·ч/м² (при 2 м² коллекторов). Из этой энергии 70% (3,1 кВт·ч) превращается в полезное тепло для биореактора, а 30% теряется (оптические и тепловые потери коллектора).

- **Биогазовое отопление:** объём биореактора 0,5 м³ обеспечивает выработку биогаза порядка 20,1 м³ за 28 дней, то есть около 0,72 м³ биогаза в сутки. Примем теплотворную способность биогаза (60% метан) около 6 кВт·ч/м³. Тогда ежедневно производится химической энергии биогаза порядка:

$$E_{\text{биогаз.пр}} = 0,72 \text{ м}^3 \cdot 6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 = 4,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (2)$$

Этот биогаз используется преимущественно для ночного обогрева. Допустим, для покрытия ночных теплопотерь требуется оставшиеся 3,1 кВт·ч тепла (то есть около 50% от суточных 6,2 кВт·ч). Биогазовая горелка имеет КПД сгорания порядка 90% (большая часть тепла передаётся теплоносителю, потери с выхлопом 10%). Тогда для получения $Q_{\text{биогаз.полн}} = 2,79 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ полезного тепла (90% от 3,1) следует израсходовать биогазовое топливо с энергией:

$$E_{\text{биогаз.затр}} = \frac{Q_{\text{биогаз.полн}}}{\eta_{\text{горелки}}} = \frac{2,79 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{0,90} = 3,10 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (3)$$

В пересчёте на объём это 0,52 м³ биогаза в сутки (что меньше доступных 0,72 м³ – излишек может запасаться или использоваться дополнительно, например, для приготовления еды). Эти 3,10 кВт·ч – это затраченная химическая энергия биогаза, из которой 2,79 кВт·ч выходит в виде полезного тепла, а 0,31 кВт·ч теряется с отходящими газами.

• **Фотоэлектрическая панель (ФЭП):** мощность ФЭП 550 Вт. Предположим, в среднем в сутки она вырабатывает около 2,3 кВт·ч электроэнергии (как раз покрывая суточное электропотребление системы 2,3 кВт·ч). Для получения этого количества электричества панели требуется энергия солнечного излучения: учитывая КПД ФЭП (18% для монокристаллического кремния) и потери в контроллере/инверторе (пусть суммарно 85% отдачи в сеть), общая эффективность преобразования солнца в полезную электроэнергию 15%. Тогда необходимая солнечная энергия на ФЭП в сутки:

$$E_{\text{ФЭП.затр}} = \frac{Q_{\text{эл.полн}}}{\eta_{\text{ФЭП}}} = \frac{2,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{0,15} = 15,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (4)$$

То есть около 15 кВт·ч солнечной энергии падает на панель в день (эквивалентно 5,6 кВт·ч/м² при площади панели 1,1÷1,2 м²). Эта энергия превращается в 2,3 кВт·ч электричества (полезный выход), остальное (13 кВт·ч) теряется в виде тепла панели и неиспользованного излучения. Полученная электроэнергия в системе расходуется на питание мешалки, насоса и других узлов, а небольшая часть (0,3 кВт·ч в нашем примере) может питать резервный электронагреватель ТЭН ночью (что мы уже учли в тепловом балансе как 10% ночного тепла, или 0,31 кВт·ч, восполненные за счёт аккумулятора).

• **Внешняя энергия:** в оптимальном режиме данная ГБУ практически не требует внешних источников энергии. Днём и ночью потребности покрываются за счёт солнечной энергии и энергии самого биогаза. Только в неблагоприятных условиях (например, продолжительная облачность, низкая выработка PV и недостаток биогаза) может потребоваться небольшое количество электричества из сети для питания ТЭНа или оборудования. В нормальном режиме расчёта эту величину можно принять пренебрежимо малой (0) – система спроектирована для автономной работы. В нашем балансе 10% ночного тепла (0,31 кВт·ч) покрыты электричеством, но мы предполагаем, что это электричество поступает от батареи, заряженной ФЭП днём, а не из внешней сети.

Суммируя затраченную энергию за сутки с учётом всех источников: солнечная энергия на коллектор: 4,43 кВт·ч; солнечная энергия на ФЭП: 15,3 кВт·ч; химическая энергия биогаза из субстрата: 3,10 кВт·ч; внешняя электроэнергия: 0 кВт·ч (в автономном режиме), получим 22,8 кВт·ч/сутки – столько энергии всего задействовано системой из всех источников.

Далее выполним расчет коэффициента эффективности рассматриваемой ГБУ, которая равна отношению выходной полезной энергии к этой затраченной составляет:

$$\eta_{\text{энергию}} = \frac{E_{\text{полезн}}}{E_{\text{затрачено}}} = \frac{8,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{22,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}} = 0,37, \quad (5)$$

то есть около 37%.

Данный показатель и есть энергетическая эффективность ГБУ при принятых допущениях, и показывает, что примерно 1/3 энергии, вовлечённой в систему, превращается в полезный выход, а остальная часть теряется (в основном из-за невысокого КПД фотоэлектрического преобразования и неизбежных тепловых потерь в коллекторе и при

сжигании биогаза). Важно отметить, что показатель энергетической эффективности 37% – довольно высокий показатель для автономной возобновляемой системы, демонстрирующий рациональное использование энергии. Например, значительная часть потерь связана с тем, что солнечная энергия непосредственно не вся усваивается ФЭП, если же оценивать эффективность по отношению к не возобновляемым (внешним) источникам, установка покрывает до 96% своих энергопотребностей за счёт собственных возобновляемых источников. Иными словами, зависимость от внешней энергии минимальна, что подтверждает высокую энергетическую автономность системы.

При этом необходимо отметить, что реальное значение η будет зависеть от режима работы. В солнечные дни доля солнечного тепла выше (биогаз используется меньше, накапливается), а в пасмурные – наоборот. В расчетных исследованиях условно разбили потребность 6,2 кВт·ч на дневную и ночную поровну, в действительности при оптимальной площади СВК ($2 \div 2,5 \text{ м}^2$) солнечная энергия может покрывать большую часть суточного тепла, а биогаз компенсирует остальное. Однако итоговое отношение выход/вход останется порядка десятков процентов, поскольку главные ограничения – эффективность преобразования солнечной энергии. Повысить этот коэффициент можно, например, улучшив КПД ФЭП (используя более эффективные модули) или снизив теплопотери биореактора (лучшей изоляцией, что уменьшит требуемые 6,2 кВт·ч/сутки).

Далее рассмотрим срок окупаемости системы, за которое экономия от работы установки покроет первоначальные инвестиции. Первичные капитальные затраты на ГБУ составили 19565000 сум (см в табл.1). Ежегодный экономический эффект складывается из сэкономленных средств на покупке электроэнергии и природного газа, а также потенциального дохода от продажи избыточной электроэнергии в сеть. Упрощенная формула по срокам окупаемости следующее:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{\text{Годовой суммарный экономический эффект}}{\text{Капитальные затраты}} \quad (6)$$

Ежегодная экономия электроэнергии: фотоэлектрическая панель (550 Вт) вырабатывает электроэнергию, которая иначе закупалась бы из сети. В условиях Ташкента можно ожидать выработку порядка $800 \div 900 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ в год от такой панели (примерно $2,3 \div 2,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ в среднем в сутки, исходя из нашего баланса).

Предположим, годовая генерация $E_{\text{ФЭП,год}} = 840 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ($2,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сутки} * 365$), так далее часть электроэнергии, частично потребляемая самой установкой (мешалка, насосы, нагреватель) вместо эквивалентного количества электроэнергии из сети, тем самым экономя средств. Если установка находится, например, в сельской местности или льготном режиме, можно брать 600 сум/кВт·ч, для коммерческих или более высоких тарифов – 800 сум/кВт·ч. Для оценки возьмём средний/верхний предел, т.е. 800 сум за кВт·ч. Тогда экономия за год по электричеству составит $840 \text{ кВт} \cdot \text{ч} * 800 \text{ сум/кВт} \cdot \text{ч} = 672 \text{ 000 сум}$ в год, если вся генерация идет на собственные нужды.

Однако возможно, что не вся выработанная PV-энергия расходуется установкой постоянно – в некоторые часы (например, солнечным днём, когда мешалка потребляет меньше мощности, а батарея уже заряжена) может возникать избыточная электроэнергия. Излишнюю энергию можно продать в сеть по тарифу 1000 сум/кВт·ч (условно принятый доход от ФЭП). Например, если оценочно 20% генерации оказывается избыточной, то $168 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$ продаётся по 1000 сум, а оставшиеся $672 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ потребляются на месте по 800 сум. Тогда годовой доход от ФЭП составит: $168 * 1000 + 672 * 800 = 168000 + 537600 = 705600 \text{ сум}$. В предельном случае, если всю выработку отдать в сеть (и покупать электричество из сети для собственных нужд по $600 \div 800 \text{ сум}$, что на практике может быть выгодно при таком раскладе тарифов), доход был бы $840 * 1000 = 840000 \text{ сум}$, но этот сценарий мало реален. Поэтому можно считать диапазон экономии на электроэнергии порядка $0,5 \div 0,7 \text{ млн сум/год}$ (в зависимости от тарифа и доли

продажи). В дальнейших расчётах принимается показатель 672 000 сум/год экономии на электричестве (как оценку при тарифе 800 и незначительной продаже).

Ежегодная экономия на природном газе: биогаз, производимый установкой, замещает потребление природного газа (например, для отопления или приготовления пищи). Годовой выход биогаза составляет порядка 262 м³ (0,72 м³/сутки * 365). Стоимость природного газа указана 1000 сум за м³ для населения республики. Таким образом, если весь биогаз используется (сжигается для отопления дома, фермы или того же реактора), то в денежном выражении замещается примерно 262 м³ * 1000 сум/м³ = 262 000 сум в год. Даже если часть биогаза расходуется на нагрев самого реактора, это всё равно экономия, так как в отсутствие биогаза пришлось бы тратить аналогичное количество природного газа или электроэнергии для этой цели. В связи с чем в данном случае рассматривается, что весь выработанный биогаз приносит экономию, эквивалентную замещению природного газа.

Ежегодная экономия за счёт биоудобрения: помимо выработки биогаза, установка ежегодно производит около 600 кг биоудобрения, которое может быть использовано в сельском хозяйстве либо продано на рынке [12]. При условной рыночной цене 1500 сум за 1 кг, общая потенциальная экономия или доход составляет 600 кг * 1500 сум/кг = 900 000 сум в год.

Даже если удобрение используется самим фермером, это позволяет снизить затраты на приобретение минеральных удобрений, тем самым повышая рентабельность системы. Таким образом, биоудобрения является дополнительным экономическим преимуществом гибридной установки наряду с заменой газа и электроэнергии.

Суммарный годовой экономический эффект, складывая на основе трех статей расходов и доходов и в среднем получаем:

- **Электричество:** 672 000 сум/год (самообеспечение ФЭП, частичная продажа)
- **Газ:** 262 000 сум/год (замещение природного газа)
- **Биоудобрения:** 900 000 сум/год (чистая прибыль)

Итого: 1 834 000 сум в год экономии.

Расчёт срока окупаемости: подставляем в формулу:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{19565000 \text{ сум}}{1834000 \text{ сум}} = 10,7 \text{ (года)}$$

Округлённо, около 11 лет при указанных тарифах. Если учитывать менее выгодный сценарий (тариф 600 сум и минимальная продажа), окупаемость может увеличиться до 2,5 ÷ 3 лет. Даже в худшем случае это значительно меньше типичного срока службы оборудования (например, ФЭП служат 10+ лет, батарея 5 ÷ 10 лет, биореактор ещё дольше), поэтому проект экономически целесообразен.

В расчетах экономического эффекта и сроков окупаемости зеленых технологий и систем на их основе так же учитывается сокращение эмиссии CO₂ за счет их применения. В этом контексте рассмотрим возможности ГБУ по снижению выбросов парниковых газов за счёт замещения части электроэнергии из внешней сети (которая обычно вырабатывается сжиганием ископаемого топлива) и природного газа (метана) на биогаз. Оценим сокращение эмиссии CO₂ на основе приведённых коэффициентов. Примем следующие удельные факторы выбросов [13]:

• **Для электроэнергии из сети:** 0,475 кг CO₂ на 1 кВт·ч потреблённой электроэнергии. (Это величина порядка среднего мирового значения; фактический показатель для конкретной страны зависит от структуры генерации. Например, IPCC (2006) приводит аналогичные оценки, а по данным IEA (2022) глобальный средний фактор около 0,475 кг/кВт·ч.) Для простоты используем 0,475 кг/кВт·ч (IEA, 2022).

• **Для природного газа:** 2,03 кг CO₂ на 1 м³ сожжённого газа. При сжигании метана CO₂ выделяется из расчёта 55 кг/ГДж, что соответствует 2,0 ÷ 2,1 кг/м³ для природного газа

стандартного состава. Значение $2,03 \text{ кг/м}^3$ согласуется с методиками IPCC (2006) и другими источниками.

• **При ферментации биомассе на открытом воздухе:** по предварительным упрощенным расчетам Биореактор объемом 500 л в год перерабатывает около 2080 кг биомассы, если учесть загрузку за один раз 160 кг биомассы и цикл полной переработки составляет 28 дней. При этом 1 кг биомассы на основе навоза крупного рогатого скота выделяет 0,5 кг и более CO_2 -экв/кг.

Далее оценим суммарную ежегодное снижение выбросов CO_2 за счёт работы ГБУ:

1. **Замещение электроэнергии:** благодаря ФЭП 840 кВт·ч в год электроэнергии не берётся из сети, а вырабатывается чисто. Значит, предотвращённые выбросы CO_2 составят:

$$\Delta m_{\text{CO}_2, \text{эл}} = E_{\text{ФЭП, год}} \cdot 0,475 = 840 \cdot 0,475 = 399 \text{ кг } \text{CO}_2 \text{ в год.} \quad (8)$$

То есть порядка 0,4 тонн CO_2 ежегодно не выбрасывается благодаря замещению энергии сети солнечной энергией.

2. **Замещение газа:** Выработка биогаза $262 \text{ м}^3/\text{год}$ позволяет эквивалентно сократить сжигание природного газа (который иначе использовался бы для тех же целей отопления/готовки). Предотвращённые выбросы CO_2 :

$$\Delta m_{\text{CO}_2, \text{газ}} = V_{\text{биогаз, год}} \cdot 2,03 = 262 \cdot 2,03 = 532 \text{ кг } \text{CO}_2 \text{ в год.} \quad (9)$$

То есть около 0,53 тонн CO_2 ежегодно экономится за счёт замены ископаемого газа биогазом (из возобновимого сырья). В расчетах предполагается, что метан биогаза при сжигании даёт такие же CO_2 выбросы, как метан природного газа – но биогаз производится из отходов, поэтому по методикам анализа жизненного цикла его CO_2 нейтрален (углерод из биомассы, а не из недр). Фактически, использование биогаза вместо природного газа не только сокращает CO_2 , но и предотвращает прямые выбросы метана от разложения отходов, что еще значительно для климата (метан имеет большой парниковый потенциал). Однако здесь учитываем лишь CO_2 от сжигания.

3. **При ферментации биомассы на открытом воздухе:** предотвращённые выбросы CO_2 из перерабатывает около 2080 кг биомассы на основе навоза крупного рогатого скота за 1 год составят 1040 кг.

Складывая эффекты по ежегодному снижению выбросов CO_2 за счёт работы ГБУ получаем итоговую сокращение за год: $\Delta m_{\text{CO}_2, \text{год}} = 399 + 532 + 1040 = 1971 \text{ кг } \text{CO}_2/\text{год}$. Округленно это 2,0 т CO_2 в год снижение выбросов. За 10 лет работы около 20,0 т CO_2 не попадёт в атмосферу за период эксплуатации системы.

Для наглядности, сокращение 20,0 т $\text{CO}_2/\text{год}$ эквивалентно, например, исключению сжигания 8600 литров бензина в год (приблизительно столько топлива сгорает при пробеге 108000 км среднестатистического автомобиля) или посадке ежегодному углеродопоглощению более 1000 деревьев. Это существенный экологический эффект для небольшой установки.

Отметим, что в Узбекистане пока не введён официальный углеродный налог или система торговли квотами на выбросы CO_2 (ETS), как это есть в ЕС или Китае. Однако ориентировочную стоимость 1 тонны CO_2 можно оценить по нескольким подходам. Например, внутренняя оценка “социальной стоимости углерода”, которая оценивается “вреда” от 1 т выбросов CO_2 для общества, по расчетам Всемирного банка и МВФ, составляет $40 \div 80 \text{ USD} / \text{т } \text{CO}_2$. Узбекистан может принять ориентир в пределах $30 \div 50 \text{ USD} / \text{т } \text{CO}_2$. при расчётах для государственной климатической политики.

Как видно из расчетов ГБУ демонстрирует сокращение углеродного следа примерно на 20,0 т CO_2 в расчёте на первые 10 лет работы по сравнению с традиционным снабжением энергией, которая эквивалентна 10 400 000 сум в среднем по вышеуказанному расчету.

Таким образом, наряду с экономической выгодой и высокой энергетической эффективностью (37% внутренней эффективности, >90% энергообеспечение за счёт ВИЭ), проект обеспечивает значимый экологический эффект, соответствующий целям сокращения выбросов парниковых газов.

При перерасчете сроков окупаемости ГБУ с учетом стоимости эмиссии CO₂, картина выглядит иначе по доходу и составляет: 1 834 000 сум+1 040 000сумм=2 874 000 сумм/год, так далее

$$T_{\text{окуп}} = \frac{19565000 \text{ сум}}{2874000 \text{ сум}} = 7 \text{ (года)}$$

Таким образом, гибридная БГУ окупается приблизительно за 7 лет эксплуатации. Быстрая окупаемость обусловлена использованием бесплатной возобновляемой энергии (солнца) и отходов (для биогаза) вместо покупных энергоносителей, а также относительно невысокой сметной стоимостью установки малого масштаба.

Для упрощения расчёта не учитывались эксплуатационные расходы (обслуживание, замена компонентов) и возможная деградация эффективности со временем. Включение этих факторов слегка увеличит реальный срок окупаемости, но незначительно, поскольку расходы на обслуживание биогазовых систем и солнечных панелей невелики.

Выводы

Рассчитанная суммарная энергетическая эффективность предложенной гибридной установки составила 37%, то есть порядка 8,5 кВт·ч полезной энергии получают из суточно поглощаемых 22,8 кВт·ч возобновляемой энергии солнца и биогаза. При оптимальных условиях до 96% энергопотребления системы обеспечивается собственными возобновляемыми источниками (солнечным коллектором, ФЭП и биогазом), что свидетельствует о высокой степени её энергетической автономности и надёжности энергоснабжения.

Применение гибридной биогазовой установки приносит заметный эколого-экономический эффект. Ежегодно фермерское хозяйство может экономить около 1,83 млн сум за счёт замещения 840 кВт·ч электроэнергии из сети и 262 м³ природного газа возобновляемой энергией, а также получения 600 кг биоудобрения. Расчётный простой срок окупаемости оборудования составляет порядка 7 лет, что сопоставимо со сроком службы ключевых компонентов и подтверждает экономическую целесообразность проекта. Кроме того, система ежегодно предотвращает выброс около 2 тонн CO₂ (20 т за 10 лет) благодаря уменьшению использования ископаемого топлива и утилизации органических отходов вместо их открытого разложения.

Таким образом, гибридная солнечно-биогазовая система представляет собой эффективное решение для энергоснабжения удалённых фермерских хозяйств Узбекистана. Она обеспечивает рациональную утилизацию отходов животноводства с одновременным получением тепла, электроэнергии и ценного биоудобрения, повышая энергетическую автономность и экологическую устойчивость сельского хозяйства. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал внедрения подобных маломасштабных установок в аграрном секторе, что будет способствовать развитию возобновляемой энергетики и снижению углеродного следа в регионе.

Литература

- [1] IEA (2022). World Energy Outlook 2022. International Energy Agency.
- [2] IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- [3] R. Evins. Multi-objective optimization for building design: a review. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2013, 22, pp.230-245.
- [4] S. Sinha, S.S. Chandel. Optimization techniques for hybrid PV–wind systems: A review. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2014, 50, pp.755-769.
- [5] M.J. Khan, M.T. Iqbal. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems. *Renewable Energy*, 2005, 30(6), pp.835-854.

-
- [6] A. Gupta, R.P. Saini. Multi-objective optimization of hybrid renewable energy systems using NSGA-II and MOPSO. *Renewable Energy*, 2020, 146, pp.1-18.
- [7] Н.Р. Авезова, А.Ю. Усманов, М.А. Куралов. Планирование системы теплоснабжения объектов животноводства и обеспечению необходимого микроклимата в них. *Проблемы энерго- и ресурсосбережения*, 2022, №3, стр. 101-109.
- [8] Н.Р. Авезова, А.Ю. Усманов, М.А. Куралов. Конструктивно-технологические и энергетические параметры биогазовой установки для обеспечения системы теплоснабжения и вентиляции на примере объекта коровника // *Проблемы энерго- и ресурсосбережения*, 2024, №4, стр. 124-131.
- [9] Н.Р. Авезова, О.З. Тоиров, А.Ю. Усманов. Обзор современных подходов в разработке гибридных биогазовых систем. *Гелиотехника*, 2024, Том 60, № 3, стр. 287-302.
- [10] А.Г. Бугаков, Н.Р. Авезова, А.М. Мирзабаев, А.У. Вохидов, А.Ю. Усманов. Солнечно-биогазовая система энергообеспечения биореактора. Патент на полезную модель № FAP 01315 (UZ). Официальный бюллетень Агентства по интеллектуальной собственности РУз. № 8. 2018.
- [11] <https://glotr.uz/solnechnaya-panel-trinasolar-tsm-550de19-550w-p-848214/>.
- [12] <https://flagma.uz/ru/biogumus-organicheskoe-udobrenie-bez-himicheskikh-dobavok-01950833.html>.
- [13] <https://sro150.ru/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovykh-gazov>
- [14] <https://www.gazeta.uz/oz/2024/06/23/carbon-wb/>.
- [15] <https://www.vsemirnyjbank.org/ru/news/press-release/2024/06/21/uzbekistan-receives-7-5-million-in-carbon-credits-for-enabling-half-a-million-tons-of-emissions-reduction>.