

УДК 621.311.243:662.767

Муродов Музаффар Хабибуллаевич, к.т.н., доцент,
Ахмедов Авазбек Боходир угли, докторант
*Наманганский государственный технический университет,
Узбекистан*

СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ СУБСТРАТА В ГИБРИДНОЙ СОЛНЕЧНО-БИОГАЗОВОЙ СИСТЕМЕ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ТЕПЛА (ДЛЯ УСЛОВИЙ НАМАНГАНА)

Солнечная энергетика и биогазовые технологии являются наиболее перспективными видами возобновляемых источников энергии. Однако они не всегда полностью обеспечивают энергетический баланс при работе по отдельности.

Например, поверхность фотоэлектрического модуля перегревается, что снижает эффективность генерации электроэнергии. В биогазовых реакторах температура субстрата также снижается в зависимости от внешней температуры, что замедляет активность метанообразующих бактерий, которые активно участвуют в ферментации [1].

Поэтому интеграция этих двух систем основана на принципе энергетической синергии "переработки избыточного тепла". В данной исследовательской работе была разработана и рассчитана солнечно-биогазовая гибридная система, объединяющая PV/T теплообменник и биогазовый реактор в условиях Намангана.

Традиционные солнечные панели преобразуют в среднем $\approx 20\text{--}23\%$ световой энергии в электрическую, остальные $77\text{--}80\%$ энергии теряются в виде тепла. Системы PV/T позволяют именно этот потерянный тепловой поток собирать и эффективно использовать через гидравлический или воздушный контур [2].

Согласно исследованиям, при высокой интенсивности солнечного излучения (до $850\text{--}950 \text{ Вт/м}^2$ в условиях Намангана) температура поверхности фотоэлектрических модулей повышается до $60\text{--}75^\circ\text{C}$. В этом случае каждое повышение температуры на 1°C снижает электрическую эффективность фотоэлектрического модуля на $0,4\text{--}0,5\%$. Например, при повышении температуры с 25°C (STC) до 65°C мощность модуля теряется до $18\text{--}20\%$ [3].

Однако это тепло обладает огромным энергетическим потенциалом. Если его собирать через жидкостный контур, то из каждой м^2 PV/T панели можно получить $1,2\text{--}2,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч/день}$.

Таким образом:

- Температура фотоэлектрического модуля понижается до 10–15 °С;
- Эффективность генерации повышается до 3–6%;
- Накопленное тепло передается жидкости или воздуху (вода, гликоль или воздух).

Экспериментально установлено, что жидкостные PV/T коллекторы накапливают на 25–30% больше тепла, чем воздушные [4]. Результаты исследований по нагреву биогазовых реакторов с использованием солнечной энергии показали, что при доведении температуры реактора до мезофильного уровня в течение 8–12 часов урожайность метана стабилизируется. Также в некоторых работах было отмечено, что низкий потенциал тепла, получаемый из-за ПВ-панелей, достаточен для поддержания процесса ферментации. Согласно этому, для обеспечения мезофильного диапазона температур 35–45 °С площадь PV/T панелей 5–6 м² считается достаточной для реактора объемом 300 л.

Для накопления тепла система накопления тепла, обычно состоящая из медных труб, устанавливается на задней части фотоэлектрического модуля. Через эту систему перемещается гликоль-водяная смесь или антифризная жидкость и выводит тепло с поверхности панелей, нагретых до 60–75 °С. Энергия, накопленная таким образом, передается на внешнюю нагревательную стенку биогазового реактора или теплообменник. В то же время, снижение температуры в диапазоне наиболее оптимальных температур (35–40 °С) для процесса производства биогаза негативно влияет на активность метаногенных бактерий [5]. Поэтому направление избыточного тепла с фотоэлектрических панелей внутрь биогазового реактора значительно повышает совместную эффективность двух систем.

Кроме того, системы PV/T дают двойную выгоду:

1. Фотоэлектрические панели повышают эффективность генерации (путем охлаждения).
2. Он поддерживает процесс образования биогаза теплом.

На этой основе интеграция PV/T-биогазовой установки для условий Намангана является не только технически обоснованной, но и экономически целесообразной, что позволяет экономить 500–800 кВтч электроэнергии в год.

Биогазовые реакторы эффективно работают в мезофильном режиме. Снижение температуры на 5 °С снижает выход метана на

20–30 %. Поэтому передача тепла через PV/T коллектор не только снижает нагрузку на электронагреватель, но и стабилизирует процесс биогазообразования.

Система сбора тепла (коллектор PV-Air/T) состоит из следующих составных частей:

- Солнечная панель (1.6–2.0 м², рамка Al).
- Камера горячего воздуха: на расстоянии 15–20 мм от задней поверхности панели.
- Трубка «Змеевик»: PEX-AL-PEX Ø12-16 мм, внутри камеры.
- Каналы входа/выхода: холодный воздух поступает снизу, горячий воздух выходит/не выходит сверху.
- Изоляция: на задней стороне слой из алюминиевой фольги (или стекловолкна) размером 510 мм.
- Вентиляция: вентиляторы постоянного тока 12 В 60–120 м³/час (для принудительной конвекции, необязательно).

Чем ниже начальная температура субстрата, тем больше тепла требуется для запуска биореактора. Нагрев от 10 °С до 37 °С требует наибольшего количества энергии – 8,78 кВт·ч, что эквивалентно непрерывной работе ТЭН мощностью 1 кВт в течение 9 часов. Наоборот, начиная с 20 °С, требуется всего 5.53 кВт·ч, что на ≈40% меньше (Рисунок 1).

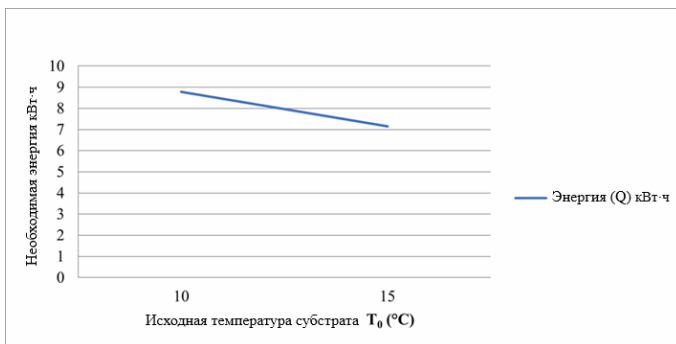


Рисунок 1. Зависимость энергии от исходной температуры субстрата

В условиях Намангана совокупность PV/T панелей площадью 5 м² может производить 6-10 кВт·ч тепловой энергии в солнечный день. Следовательно, нагрев до 15-37 °С происходит полностью за один день, в то время как нагрев до 10-37 °С продолжается 1-1,2 дня (Рис. 1). Если начальную температуру поддерживать на уровне 20 °С – запуск завершится через полдня.

Результаты показывают, что при использовании системы PV/T практически не требуется ТЭО для стадии стартапа биогазового реактора. В свою очередь, спрос на электроэнергию резко снижается (особенно во внезимнее время). Быстрый и стабильный нагрев субстрата ускоряет ритм активации микроорганизмов и запускает первоначальное производство биогаза за 1–2 дня.

Данное исследование показало, что использование избыточного тепла, образующегося в фотоэлектрических панелях, при доведении биогазового реактора до мезофильного режима значительно снижает потребность во внешней энергии нагрева. Предложенная гибридная система PV-Air/T позволила снизить нагрузку электронагревателя до 60–90% в климатических условиях Намангана и повысить эффективность производства биогаза примерно на 15–25%. Результаты подтверждают, что данная технология является высокоэффективным техническим, энергетическим и экономическим решением для малых и средних биогазовых систем в холодных и полупустынных регионах.

Список использованной литературы

1. Alkhamis T.M., El-Khazali R., Kablan M.M., Alhusein M.A. Heating of a biogas reactor using a solar energy system with temperature control unit // *Solar Energy*. – 2000. – Т. 69, No 3. – С. 239–247. – ISSN 0038-092X. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00068-2).
2. Choi H.-U., Choi K.-H. Оценка производительности PV/T воздухооборника с однопроходным двухпоточным воздушным каналом и неравномерным поперечным сечением // *Энергия*. – 2020. – Т. 13, No 9. – С. 2203. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en13092203>.
3. Duffie J.A., Beckman W.A. Солнечная инженерия тепловых процессов: 4-е изд. – Хобокен: John Wiley & Sons, 2013. – 944 с. – ISBN 9781118415412.
4. Kazem H.A., Chaichan M., Al-Waeli A., Sopian K., Alnaser W., Kazmerski L., Alnaser N. Обзор фотоэлектрического/теплого (PV/T) внедрения в процесс производства водорода // *Global Energy Interconnection*. – 2025. – Т. 8. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.03.001>.
5. Kumar P., Mishra R.K., Chinnam S., Binnal P., Dwivedi N. Комплексное исследование анаэробного переваривания органических твердых отходов: Обзор конфигураций, эксплуатационных параметров, технико-экономического анализа и текущих тенденций // *Biotechnology Notes*. – 2021. – Т. – С. 33–49. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.02.001>.