

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**СОЛНЕЧНАЯ БИОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ
ОСНОВНЫХ УЗЛОВ**

© 2022 г. А. Б. Алхасов^а, Я. А. Дибиров^{а, *}, К. Я. Дибиров^а

^аИнститут проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН,
просп. Шамиля, д. 39а, г. Махачкала, 367030 Россия

*e-mail: jakhya@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 23.06.2021 г.

Энергоэффективность существующих биогазовых установок (БГУ) можно повысить, используя солнечную энергию. В настоящее время в солнечных БГУ более половины выработанной солнечными коллекторами тепловой энергии остается не востребованной непосредственно для покрытия технологических нужд биогазовых установок. Разработана принципиальная схема БГУ с двумя биореакторами, позволяющая независимо от сезонной и суточной неравномерности поступления солнечной энергии максимально использовать весь потенциал выработанной солнечными коллекторами тепловой энергии для обеспечения всех энергозатрат технологической схемы сбраживания исходного сырья. Один биореактор полноценно функционирует круглый год, а второй – в период, когда количество вырабатываемой солнечными коллекторами тепловой энергии превышает суммарный уровень тепловой энергии, необходимый для компенсации всех энергозатрат на производство биогаза в первом биореакторе. Подключение (или отключение) второго биореактора производится термоконтроллером с сервоприводами, установленными на трубопроводах циркуляции теплоносителя, подачи в биореактор ежесуточной дозы субстрата исходного сырья и люка выгрузки в резервуар жидкого удобрения. Круглосуточное поддержание оптимального термического режима сбраживания биомассы в каждом биореакторе в периоды отсутствия поступления солнечной энергии обеспечивается посредством подачи тепловой энергии разрядки фазопереходного теплового аккумулятора, установленного в резервуаре с жидкостью вокруг каждого биореактора. На примере исходного сырья – навоза крупного рогатого скота (КРС) с термофильным режимом сбраживания – рассмотрена методика расчетов оптимальных значений параметров каждого биореактора БГУ, площади солнечных коллекторов и количества теплоаккумулирующего материала. Реализация предложенной БГУ позволяет снизить площадь солнечных коллекторов более чем в 2 раза и на 25% суммарную себестоимость основных узлов БГУ.

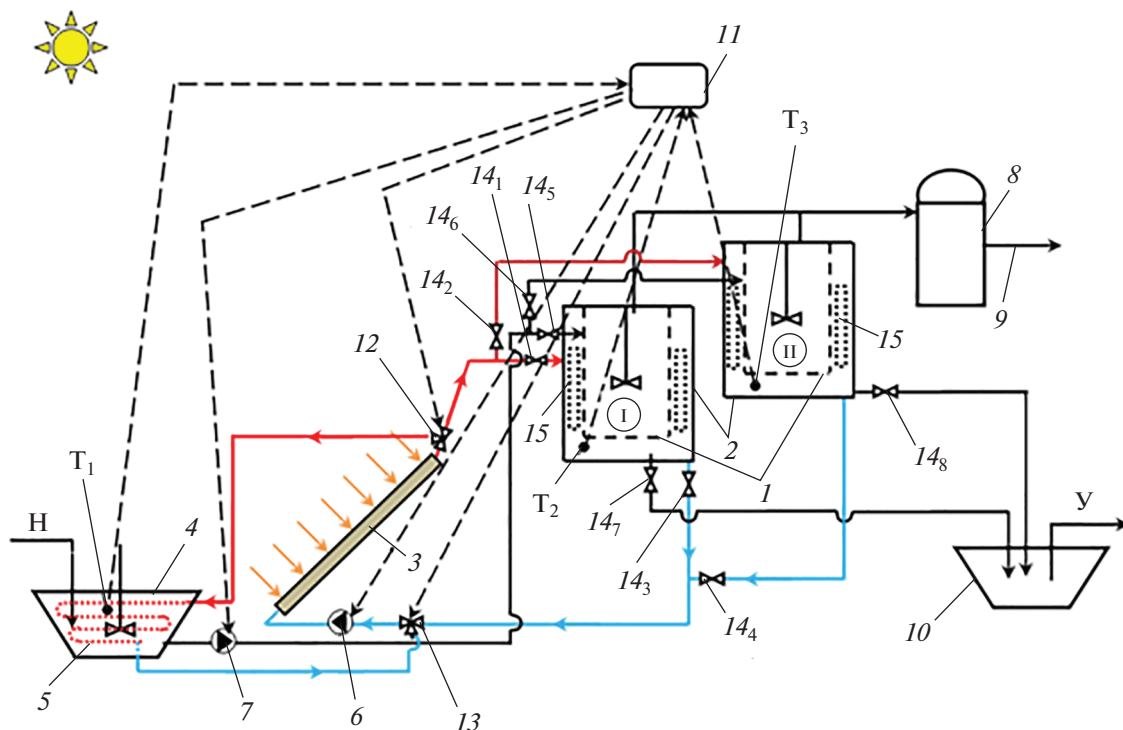
Ключевые слова: биогазовые установки, солнечный коллектор, термоконтроллер, тепловой аккумулятор, объем дозы исходного субстрата, тепловая энергия

DOI: 10.1134/S0040363622030018

Одна из перспективных областей использования гелиотермальной энергии – биогазовые технологии с требуемым диапазоном рабочей температуры процесса сбраживания биомассы 25–60°C [1, 2]. Повышения энергоэффективности солнечных БГУ можно достичь применением тепловых аккумуляторов (ТА), заряжаемых тепловой энергией, вырабатываемой солнечными коллекторами. Использование ТА в таких БГУ позволяет не только свести к минимуму любые дополнительные энергозатраты для обеспечения технологических нужд производства биогаза с сохранением его максимального выхода, но и существенно упростить конструкцию БГУ, что обусловлено отсутствием

необходимости в системе подогрева биореактора с отопительным котлом [3].

В исследованиях [4–7] определение параметров основных узлов БГУ (площади солнечных коллекторов, габаритов биореактора и др.) производится для наиболее холодного расчетного периода года с минимальным поступлением солнечной энергии. Следовательно, в этих разработках весь потенциал тепловой энергии, ежедневно вырабатываемый солнечными коллекторами, может быть использован для компенсации всех суточных энергозатрат БГУ в лучшем случае в течение двух месяцев в году.



Принципиальная схема солнечной биогазовой установки с двумя биореакторами.

1 – два биореактора (I и II); 2 – резервуары с жидкостью и тепловыми аккумуляторами вокруг биореактора; 3 – солнечные коллекторы; 4 – резервуар для подготовки субстрата исходного сырья; 5 – теплообменник для подогрева субстрата исходного сырья; 6 – циркуляционный насос; 7 – дозировочный насос; 8 – газгольдер; 9 – биогаз потребителю; 10 – резервуар жидкого удобрения; 11 – термоконтроллер с термодатчиками (T_1 , T_2 и T_3) и сервоприводами; 12 – трехходовой кран с одним входом; 13 – трехходовой кран с одним выходом; 14₁–14₈ – вентили; 15 – контейнеры с теплоаккумулирующим материалом; Н – навоз; У – удобрение

Цель данной работы – разработка технологической схемы солнечной биогазовой установки с максимальным использованием всего потенциала выработанной солнечными коллекторами тепловой энергии только для технологических нужд производства биогаза, а также методики расчетов параметров основных узлов данной установки.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЛНЕЧНОЙ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Круглогодичное использование энергии Солнца, поступающей на солнечные коллекторы минимальной суммарной площадью, только для нужд производства биогаза в предложенной принципиальной схеме (см. рисунок) достигается установкой в БГУ двух отдельных биореакторов. Один из них, круглогодичный (I), задействован в производстве биогаза круглый год, а второй, периодичный (II), – в промежутки времени, когда выработанная солнечными коллекторами тепловая энергия превышает суммарную тепловую энергию, необходимую для всех технологических нужд производства биогаза в биореакторе I. Оба биореактора имеют одинаковое конструктивное решение и

различаются лишь своими размерами и габаритами контейнеров с теплоаккумулирующим материалом.

Максимальное использование ежедневно поступающей солнечной энергии только для нужд производства биогаза с круглосуточным поддержанием необходимого оптимального термического режима в биореакторах в предложенной схеме (см. рисунок) осуществляется следующим образом.

Подогрев предварительно подготовленного увлажненного исходного сырья производится нагретым солнечными коллекторами теплоносителем, циркулирующим по первому контуру через теплообменник, установленный внутри субстрата в резервуаре подготовки исходного сырья. Подключение или отключение первого контура осуществляется термоконтроллером с сервоприводами трехходовых кранов.

При достижении заданной температуры субстрата в резервуаре по значению входного сигнала от термодатчика T_1 термоконтроллер переключает циркуляцию теплоносителя на второй контур: солнечные коллекторы – оба резервуара с

жидкостью вокруг биореакторов – циркуляционный насос – солнечные коллекторы, что обеспечивает заданный одинаковый температурный режим жидкости в обоих резервуарах.

Увлажненное сырье, нагретое до заданной температуры в резервуаре для подготовки субстрата, дозировочным насосом подается в каждый биореактор.

Ежесуточная выгрузка дозы сброженной биомассы из нижней части каждого из биореакторов в резервуар для жидкого удобрения производится по сигналам термоконтроллера на сервоприводы вентилях, установленных на соответствующих трубопроводах люков выгрузки (вентили 14₇ и 14₈) (сервоприводы вентилях на рисунке не показаны).

Биогаз, образующийся в верхней части каждого биореактора, поступает в газгольдер, откуда по трубопроводу подается потребителю.

В период года, когда начинает функционировать только биореактор I, должна быть завершена выгрузка всего остатка сброженной биомассы из биореактора II в резервуар для жидкого удобрения. При этом циркуляция теплоносителя через резервуар биореактора II прекращается. До периода следующего начала функционирования биореактора II вентили 14₂, 14₄, 14₆ и 14₈ на соответствующих трубопроводах устанавливаются в закрытом положении.

До частичной загрузки субстрата в биореактор II определяют дату начала периода избыточного производства тепловой энергии солнечными коллекторами, когда выработанная ими однодневная тепловая энергия превышает необходимые суточные энергозатраты на технологические нужды биореактора I. Непосредственно начало этого периода определяется по показаниям термодатчика T₂, установленного в резервуаре с жидкостью вокруг биореактора I. Такой датой является день, начиная с которого температура термодатчика T₂ превышает заданное значение температуры жидкости в резервуаре более чем на 1°C. После этого ежедневно весь избыток тепловой энергии по сигналам термоконтроллера на соответствующие сервоприводы переводится в контур циркуляции теплоносителя через резервуар с жидкостью вокруг биореактора II, который еще остается не загруженным субстратом исходного сырья.

Дата начала частичной загрузки в биореактор II дозы сброживаемого субстрата определяется по температуре T₃, значение которой должно превышать температуру жидкости в резервуаре вокруг биореактора II более чем на 1°C. Начиная с этой даты ежедневная доза субстрата исходного сырья, подаваемая в биореактор II, увеличивается с каждым днем в соответствии с нарастающим суточ-

ным изменением солнечной радиации. Максимальная загрузка субстратом соответствует периоду года с наибольшим поступлением солнечной энергии.

С момента снижения солнечной радиации производится постепенное уменьшение объема ежедневно направляемой в биореактор II дозы субстрата исходного сырья вплоть до полного прекращения его подачи, что должно соответствовать началу периода наименьшего поступления солнечной радиации.

Ежесуточная зарядка всей массы теплоаккумулирующего материала и поддержание заданной температуры в обоих биореакторах производятся в дневное время циркуляцией теплоносителя через резервуар с жидкостью посредством тепловой энергии, выработанной солнечными коллекторами.

В зимний период при длительном отсутствии поступления солнечной радиации теплотери биореактора I компенсируются подачей тепловой энергии, выделившейся при полной кристаллизации расплавленной массы соответствующего фазопереходного ТА. Только в это время подогрев ежесуточно подаваемых в биореактор I доз субстрата осуществляется сжиганием собственного биогаза.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ УСТАНОВКИ

В расчетной части работы представлена методика определения оптимальных значений площади солнечных коллекторов, а также габаритов каждого биореактора и количества теплоаккумулирующего материала. В качестве исходного сырья при проведении расчетов был принят навоз КРС, из 1 т сухого вещества которого выделяется биогаз в объеме 300 м³ с содержанием метана 58%. Длительность полного сбраживания исходного сырья составляет 15 сут.

На основе уравнений теплового баланса процессов теплообмена, протекающих в различные периоды функционирования БГУ, а также с учетом выполнения условия превышения ее годовой производительности по биогазу над годовой потребностью конкретного потребителя в биогазе выводятся формулы взаимозависимостей определенных параметров основных узлов установки. После этого с использованием минимального числа неизвестных составляется система уравнений. По полученным численным значениям выбранных неизвестных параметров, являющихся корнями этой системы уравнений, рассчитываются искомые параметры узлов БГУ.

В качестве неизвестных параметров для расчетов приняты V_d – объем ежесуточно подаваемой в биореактор I дозы субстрата (с постоянным круг-

логодичным значением), m^3 , и ${}^{II}\bar{V}_d$ – осредненное за месяц с максимальным поступлением солнечной радиации значение объема ежесуточно подаваемой в биореактор II дозы субстрата, m^3 . Следовательно, для составления системы уравнений с двумя переменными (${}^I\bar{V}_d$ и ${}^{II}\bar{V}_d$) должны быть получены их две функциональные зависимости.

Для проведения расчетов приняты габариты каждого из биореакторов и резервуаров с жидкостью в виде цилиндров, имеющих одинаковые диаметры основания и высоту, причем диаметр основания резервуара на 15% больше, чем биореактора. Принято также, что полный объем V^f каждого из биореакторов на 40% больше его рабочего объема V^{wor} : $V^f = 1.4V^{wor}$. Тогда для каждого биореактора с учетом принятого времени полного сбраживания исходного сырья τ_{fer} , сут, рабочий и полный объемы составят:

$${}^iV^{wor} = {}^iV_d \tau_{fer} = 15{}^iV_d; \quad {}^iV^f = 21{}^iV_d,$$

где ${}^iV^{wor}$, ${}^iV^f$ – соответственно рабочий и полный объем i -го биореактора (I или II), m^3 ; iV_d – объем ежесуточно подаваемой в i -й биореактор дозы субстрата, m^3 .

Общая площадь поверхности теплопотерь БГУ определяется как ${}^iS_{h,l}^{tot} = 56.1({}^iV_d)^{2/3}$.

Составляются уравнения теплового баланса процессов теплообмена для различных периодов функционирования БГУ. Для дневного времени периода совместной работы обоих биореакторов тепловой баланс можно представить в виде

$$Q_{s,c} + Q_{f,r}^{day} = {}^I Q_d^{sub} + {}^I Q_{h,l}^{day} + {}^I Q_{ch}^{ac} + {}^{II} Q_d^{sub} + {}^{II} Q_{h,l}^{day} + {}^{II} Q_{ch}^{ac}, \quad (1)$$

где $Q_{s,c}$ – тепло, вырабатываемое солнечными коллекторами за 1 сут, МДж; $Q_{f,r}^{day}$ – тепловой эффект реакции брожения биомассы за период солнечного сияния в течение 1 сут, МДж; Q_d^{sub} – тепло, необходимое для подогрева ежесуточно подаваемой в биореактор дозы субстрата до заданной температуры, МДж; $Q_{h,l}^{day}$ – теплопотери через наружную поверхность корпусов биореактора и резервуара в дневное время, МДж; Q_{ch}^{ac} – тепло, необходимое для полной зарядки ТА, МДж; индексы I и II соответствуют первому (круглогодичному) и второму (периодично работающему) биореактору.

Тепловой эффект реакции брожения в (1) определяется по формуле

$$Q_{f,r}^{day} = 15({}^I V_d + {}^{II} V_d) \times 100 \times 1.5 \tau_i^{day} / (24 \times 15) = 6.25({}^I V_d + {}^{II} V_d) \tau_i^{day},$$

где $15({}^I V_d + {}^{II} V_d)$ – суммарный объем субстрата в обоих биореакторах, m^3 ; 100 – масса абсолютно сухого вещества биомассы в $1 m^3$ субстрата с 90%-ной влажностью, кг; 1.5 – тепловой эффект реакции брожения 1 кг сухого вещества биомассы, МДж [8]; 24×15 – количество часов в 15 сут (период полного сбраживания), ч; τ_i^{day} – продолжительность солнечного сияния в 1 сут, ч.

Уравнение теплового баланса для дневного времени периода функционирования только биореактора I имеет вид

$$Q_{s,c} + 6.25{}^I V_d \tau_i^{day} = {}^I Q_d^{sub} + {}^I Q_{h,l}^{day} + {}^I Q_{ch}^{ac}. \quad (2)$$

Площадь солнечных коллекторов для БГУ рассчитывается из условия превышения минимальной (за наиболее холодный месяц года) тепловой энергии $Q_{s,c}^{min}$, вырабатываемой коллекторами за 1 сут, над всеми энергозатратами на технологические нужды биореактора I с учетом возможных теплопотерь за время отсутствия поступления солнечной энергии. Данное условие можно записать в виде следующего неравенства:

$$Q_{s,c}^{min} + {}^I Q_{f,r}^{day} \geq {}^I Q_d^{sub} + {}^I Q_{h,l}^{n day} + {}^I Q_{ch}^{ac}, \quad (3)$$

где ${}^I Q_{h,l}^{n day}$ – теплопотери за возможные периоды (в n сутках) практического отсутствия поступления солнечной энергии в конкретной местности расположения БГУ, МДж. Значения n для расчетов можно принять по данным многолетних метеорологических наблюдений, приведенным в [9].

Все составляющие неравенства (3) выражаются через ${}^I V_d$. Значение ${}^I Q_{f,r}^{day}$ за весь период (n суток) практического отсутствия поступления солнечной энергии составляет

$${}^I Q_{f,r}^{day} = 15{}^I V_d \times 100 \times 1.5n / 15 = 150{}^I V_d n.$$

Для определения ${}^I Q_d^{sub}$ допускается принимать значения плотности и удельной теплоемкости субстрата такими же, как и для воды. Тогда

$${}^I Q_d^{sub} = {}^I m_d^{sub} c_p^{sub} \Delta t = {}^I V_d \times 1000 \times 4.2 \times 10^{-3} (t_{in} - t_1) = 4.2{}^I V_d (t_{in} - t_1), \quad (4)$$

где ${}^I m_d^{sub}$ – масса ежесуточно подаваемой в биореактор дозы субстрата, кг; c_p^{sub} – удельная теплоемкость субстрата, принятая равной $4.2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; Δt – разница между температурой жидкости внутри резервуара t_{in} , равной температуре плавления принятого фазопереходного теплоаккумулирующего состава, и расчетной температурой субстрата в резервуаре подготовки исходного сырья t_1 до подогрева, $^\circ\text{C}$.

Теплопотери за возможные периоды (n суток) отсутствия поступления солнечной энергии в наиболее холодном месяце года определяются следующим образом:

$${}^I Q_{h,l}^{n\text{ day}} = n q_{col,m} {}^I S_{h,l}^{tot} = 24n \times 3600 \times 10^{-6} q_{col,m} \times 56.1 ({}^I v_d)^{2/3} = 4.85n q_{col,m} ({}^I v_d)^{2/3}, \quad (5)$$

где $q_{col,m}$ – плотность теплового потока, проходящего через многослойную стенку ограждающей конструкции корпуса резервуара с жидкостью вокруг биореактора в наиболее холодном месяце года, вычисляемая по формуле из [10].

Количество теплоаккумулирующего материала для каждого биореактора рассчитывается из условия превышения тепловой энергии потенциала разовой разрядки ТА над теплопотерями через соответствующие наружные поверхности резервуара с жидкостью и биореактора за возможное время отсутствия солнечного излучения в расчетный период с учетом теплового эффекта реакции брожения:

$$m_{h,ac} \geq (Q_{h,l}^{nig} - Q_{f,r}) / \Delta H_{h,ac}, \quad (6)$$

где $m_{h,ac}$ – масса фазопереходного ТА, кг; $Q_{h,l}^{nig}$ – теплопотери через наружные поверхности корпусов биореактора и резервуара за время отсутствия солнечного излучения в течение 1 сут, МДж; $Q_{f,r}$ – тепловой эффект реакции брожения биомассы, равный 1.5 МДж с 1 кг абсолютно сухого вещества исходного сырья [8]; $\Delta H_{h,ac}$ – энтальпия плавления теплоаккумулирующего состава, МДж/кг.

Значение ${}^I Q_{ch}^{ac}$ должно превышать теплопотери биореактора I за периоды возможного отсутствия поступления солнечного излучения в n сутках:

$${}^I Q_{ch}^{ac} \geq {}^I Q_{h,l}^{n\text{ day}} - {}^I Q_{f,r}^{day} = 4.85n q_{col,m} ({}^I v_d)^{2/3} - 150 {}^I v_d n. \quad (7)$$

Для массы теплоаккумулирующего материала биореактора I справедливо соотношение

$${}^I m_{h,ac} \geq (4.85n q_{col,m} ({}^I v_d)^{2/3} - 150 {}^I v_d n) / \Delta H_{h,ac}.$$

С учетом (4), (5) и (7) неравенство (3) можно записать в виде

$$Q_{s,c}^{\min} \geq 4.2 {}^I v_d (t_{in} - t_1) + 4.85n q_{col,m} ({}^I v_d)^{2/3} + 4.85n q_{col,m} ({}^I v_d)^{2/3} - 150 {}^I v_d n,$$

откуда следует, что площадь солнечных коллекторов должна быть не менее

$$S_{s,c} = \frac{Q_{s,c}^{\min}}{E_{\min}^{s,c}} \geq \frac{4.2 {}^I v_d (t_{in} - t_1) + 9.7n q_{col,m} ({}^I v_d)^{2/3} - 150 {}^I v_d n}{E_{\min}^* \eta_{\min}},$$

где $E_{\min}^{s,c}$, E_{\min}^* – соответственно минимальные (за наиболее холодный месяц года) значения однодневной тепловой энергии, вырабатываемой солнечными коллекторами, МДж/м², и средневневной суммарной солнечной радиации, поступающей на площадку с оптимальным углом наклона, МДж/м² (значения E_{\min}^* для расчетов принимаются по данным [11, 12]); η_{\min} – КПД солнечных коллекторов, %.

За расчетный период для получения первой формулы зависимости ${}^I v_d$ от ${}^{II} \bar{v}_d$ удобно принимать месяц с наибольшим поступлением солнечной энергии (и плотностью теплового потока $q_{war,m}$), так как принято, что ${}^{II} \bar{v}_d = {}^{II} \bar{v}_{war,m}$, где ${}^{II} \bar{v}_{war,m}$ – осредненное за период наиболее жаркого месяца значение объема ежесуточно подаваемой в биореактор II дозы субстрата (индекс war,m от англ. warm month – теплый месяц или месяц с наибольшим поступлением солнечной энергии). Объем биореактора II определяют из условия превалирования рабочего объема биореактора II над объемом, занимаемым именно в этом периоде всем субстратом сбрасываемой биомассы. Общая площадь солнечных коллекторов остается неизменной и равной ранее полученному значению $S_{s,c}$.

Составляется уравнение теплового баланса для дневного времени этого периода:

$$Q_{s,c}^{\max} + 6.25 ({}^I v_d + {}^{II} \bar{v}_d) \tau_{war,m}^{day} = {}^I Q_d^{sub} + {}^I Q_{h,l}^{day} + {}^I Q_{ch}^{ac} + {}^{II} Q_d^{sub} + {}^{II} Q_{h,l}^{day} + {}^{II} Q_{ch}^{ac}, \quad (8)$$

где $\tau_{war,m}^{day}$ – продолжительность солнечного сияния в 1 сут за наиболее жаркий месяц года, ч.

Значения всех составляющих уравнения (8) определяются как

$$Q_{s,c}^{\max} = E_{\max}^{s,c} S_{s,c} = E_{\max}^{s,c} \eta_{\max} \times \frac{4.2 {}^I v_d (t_{in} - t_1) + 9.7n q_{col,m} ({}^I v_d)^{2/3} - 150 {}^I v_d n}{E_{\min}^* \eta_{\min}},$$

здесь индексы \max и \min относятся соответственно к наиболее жаркому и наиболее холодному месяцу года;

$${}^I Q_d^{sub} = 4.2 {}^I v_d (t_{in} - t_1);$$

$${}^I Q_{h,l}^{day} = 0.202 \tau_{war,m}^{day} q_{war,m} ({}^I v_d)^{2/3},$$

где $q_{war.m}$ – плотность теплового потока через многослойную стенку корпуса резервуара БГУ за наиболее жаркий месяц года, Вт/м²;

$$\begin{aligned} Q_{ch}^{ac} &= \tau_{war.m}^{nig} q_{war.m} S_{hl}^{tot} - 6.25 V_d \tau_{war.m}^{nig} = \\ &= 3600 \tau_{war.m}^{nig} \times 10^{-6} q_{war.m} \times 56.1 (V_d)^{2/3} - \\ &- 6.25 V_d \tau_{war.m}^{nig} = 0.202 \tau_{war.m}^{nig} q_{war.m} (V_d)^{2/3} - \\ &- 6.25 V_d \tau_{war.m}^{nig}, \end{aligned}$$

здесь $\tau_{war.m}^{nig}$ – время отсутствия солнечного излучения в 1 сут наиболее жаркого месяца года, ч;

$$\begin{aligned} Q_d^{sub} &= 4.2 \bar{V}_d (t_{in} - t_1); \\ Q_{hl}^{day} &= 0.202 \tau_{war.m}^{day} q_{war.m} (\bar{V}_d)^{2/3}. \end{aligned}$$

Из всех составляющих правой части (1) остается неопределенным лишь значение Q_{ch}^{ac} .

Согласно (6), для биореактора II

$$m_{hac} \geq (Q_{hl}^{nig} - Q_{f.r}^{day}) / \Delta H_{hac},$$

где Q_{hl}^{nig} – наибольшие за весь период функционирования биореактора II теплотери через его корпус в темное время суток (с максимальной плотностью теплового потока q_{max}^{II}), рассчитываемые по наименьшей средней температуре наружного воздуха этого периода.

Для получения конкретного значения Q_{hl}^{nig} необходимо уточнить даты начала и конца периода функционирования биореактора II, которые задаются изначально с последующим уточнением методом последовательного приближения. Даты начала и конца загрузки биореактора II сбраживаемой биомассой определяются из условия превышения части тепловой энергии, выработанной солнечными коллекторами в течение одного дня отдельно для нужд биореактора II ($Q_{s.c}^{II}$), над суммой энергозатрат на зарядку всей массы теплоаккумулирующего материала с учетом дневных теплотерь. Следовательно, для любого дня в период функционирования биореактора II должно выполняться условие в виде неравенства

$$Q_d^{sub} = Q_{s.c}^{II} + Q_{f.r}^{day} - Q_{hl}^{day} - Q_{ch}^{ac} > 0. \quad (9)$$

Тепло, необходимое для полной зарядки ТА, установленного в резервуаре вокруг биореактора II, можно найти по соотношению

$$\begin{aligned} Q_{ch}^{ac} &\geq Q_{hl}^{nig} - Q_{f.r}^{day} = Q_{max}^{nig} q_{max} S_{hl}^{tot} - \\ &- 6.25 \bar{V}_d Q_{max}^{nig} = 0.202 \tau_{war.m}^{nig} q_{war.m} (\bar{V}_d)^{2/3} - \\ &- 6.25 \bar{V}_d Q_{max}^{nig}. \end{aligned}$$

Массу теплоаккумулирующего материала для биореактора II можно вычислить по формуле

$$m_{hac} \geq \left(0.202 Q_{max}^{nig} q_{max} (\bar{V}_d)^{2/3} - 6.25 V_i Q_{max}^{nig} \right) / \Delta H_{hac}.$$

После определения значений всех составляющих уравнение (8) можно записать в виде

$$\begin{aligned} &E_{max}^{*s.c} \eta_{max} \times \\ &\times \frac{4.2 V_d (t_{in} - t_1) + 9.7 n q_{col.m} (V_d)^{2/3} - 150 V_d n}{E_{min}^* \eta_{min}} + \\ &+ 6.25 (V_d + \bar{V}_d) \tau_{war.m}^{day} = 4.2 V_d (t_{in} - t_1) + \\ &+ 0.202 \tau_{war.m}^{day} q_{war.m} (V_d)^{2/3} + \quad (10) \\ &+ 0.202 \tau_{war.m}^{nig} q_{war.m} (V_d)^{2/3} - 6.25 V_d \tau_{war.m}^{nig} + \\ &+ 4.2 \bar{V}_d (t_{in} - t_1) + 0.202 \tau_{war.m}^{day} q_{war.m} \times \\ &\times (\bar{V}_d)^{2/3} + 0.202 \tau_{war.m}^{nig} q_{war.m} (\bar{V}_d)^{2/3} - 6.25 \bar{V}_d Q_{max}^{nig}. \end{aligned}$$

Неизвестными в полученном уравнении являются только V_d и \bar{V}_d . После подстановки численных значений всех исходных данных в (10) и некоторых упрощений первую формулу зависимости V_d от \bar{V}_d можно записать в следующем виде:

$$a_1 V_d + b_1 (V_d)^{2/3} = c_1 \bar{V}_d + d_1 (\bar{V}_d)^{2/3}, \quad (11)$$

где a_1 , b_1 , c_1 и d_1 – коэффициенты с определенными численными значениями.

Вторую формулу зависимости V_d от \bar{V}_d можно вывести из условия превышения количества тепловой энергии, полученной при сжигании годового объема произведенного биогаза, над годовой потребностью в тепловой энергии для полного энергоснабжения потребителя. При этом должны быть учтены возможные дополнительные энергозатраты для подогрева ежесуточно подаваемых в биореактор I доз субстрата в наиболее холодный период года.

Для дальнейших расчетов по выводу второй формулы необходимо иметь значение теплоты сгорания биогаза, вырабатываемого из 1 м³ сбраживаемого субстрата. Учитывая данные по выходу биогаза из исходного сырья, содержание в произведенном биогазе метана, а также теплоту его сгорания (36 МДж/м³) и влажность сбраживаемого

субстрата (90%), можно вычислить теплоту сгорания биогаза, получаемого из 1 м³ сбраживаемого субстрата: $0.1 \times 300 \times 36 \times 0.58 = 626.4$ МДж/м³.

Тепловая энергия, необходимая для подогрева ежесуточно подаваемых в биореактор I доз субстрата за периоды возможной длительной пасмурной погоды в наиболее холодные месяцы года общей продолжительностью N_{day}^{cl} суток, составляет

$$Q_{add}^{an} = N_{day}^{cl} Q_d^{sub} = N_{day}^{cl} 4.2^1 V_d (t_{in} - t_1).$$

Значения N_{day}^{cl} для расчетов можно принять по данным [8].

Для годовой потребности потребителя в сбраживаемом сырье справедливо неравенство

$$V_{sub}^{an} \geq \frac{Q_{then}^{an} + N_{day}^{cl} 4.2^1 V_d (t_{in} - t_1)}{626.4}, \quad (12)$$

где Q_{then}^{an} – общая годовая потребность в тепловой энергии для полного энергоснабжения потребителя, МДж.

Данная годовая потребность определяется как сумма годовых потребностей каждого биореактора:

$$V_{sub}^{an} = {}^I V_{sub}^{an} + {}^{II} V_{sub}^{an} \quad \text{или} \quad V_{sub}^{an} = 365^1 V_d + {}^{II} V_{sub}^{an}. \quad (13)$$

Для первоначально заданного периода функционирования биореактора II суммарный годовой объем ежесуточно подаваемых отдельно в этот биореактор доз субстрата можно записать в общем виде:

$$\begin{aligned} {}^{II} V_{sub}^{an} = & n_{feb} {}^{II} \bar{V}_{feb} + n_{mar} {}^{II} \bar{V}_{mar} + 30 {}^{II} \bar{V}_{apr} + 31 {}^{II} \bar{V}_{may} + \\ & + 30 {}^{II} \bar{V}_{jun} + 31 {}^{II} \bar{V}_{jul} + 31 {}^{II} \bar{V}_{aug} + 30 {}^{II} \bar{V}_{sep} + \\ & + n_{oct} {}^{II} \bar{V}_{oct} + n_{nov} {}^{II} \bar{V}_{nov}, \end{aligned} \quad (14)$$

где n_i – число суток в i -м месяце, приходящихся на начало (или конец) периода функционирования биореактора II; ${}^{II} \bar{V}_i$ – осредненное за период i -го месяца (или за i -й период отдельного месяца) значение объема ежесуточно подаваемой в биореактор II дозы субстрата.

Значение каждого из ${}^{II} \bar{V}_i$, входящего в правую часть (14), определяется также по уравнению теплового баланса (1), составленному для одних суток середины соответствующего периода. Порядок вычисления этих значений точно такой же, как и для аналогичной формулы (10).

Значения ${}^{II} \bar{V}_i$, полученные в результате таких расчетов для всех месяцев, кроме месяца с макси-

мальным поступлением солнечной энергии, и выраженные через ${}^I V_d$ и ${}^{II} \bar{V}_d$, можно записать в общем виде:

$${}^{II} \bar{V}_i = a_i {}^I V_d + b_i ({}^I V_d)^{2/3} + d_i ({}^{II} \bar{V}_d)^{2/3}, \quad (15)$$

где a_i, b_i, d_i – коэффициенты с определенными численными значениями. Для месяца с максимальным поступлением солнечной энергии ${}^{II} \bar{V}_{war.m} = {}^{II} \bar{V}_d$.

Если подставить в (14) полученные из соотношения (15) значения ${}^{II} \bar{V}_i$, выражение (13) после некоторых упрощений [с учетом (12)] будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} a_2 {}^I V_d + b_2 ({}^I V_d)^{2/3} + \\ + c_2 {}^{II} \bar{V}_d + d_2 ({}^{II} \bar{V}_d)^{2/3} = Q_{then}^{an} / 626.4, \end{aligned} \quad (16)$$

где a_2, b_2, c_2, d_2 – также коэффициенты с определенными численными значениями.

Выведенные формулы (11) и (16) можно представить в виде системы уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} a_1 {}^I V_d + b_1 ({}^I V_d)^{2/3} = c_1 {}^{II} \bar{V}_d + d_1 ({}^{II} \bar{V}_d)^{2/3}; \\ a_2 {}^I V_d + b_2 ({}^I V_d)^{2/3} + c_2 {}^{II} \bar{V}_d + d_2 ({}^{II} \bar{V}_d)^{2/3} = Q_{then}^{an} / 626.4, \end{cases}$$

решение которой позволяет получить значения ${}^I V_d$ и ${}^{II} \bar{V}_d$ для заданного периода функционирования биореактора II.

Уточнение дат начала и конца периода работы биореактора II методом последовательного приближения производится следующим образом. По полученным отдельно для дат начала и конца заданного первоначального периода функционирования биореактора II значениям ${}^I V_d$ и ${}^{II} \bar{V}_d$ рассчитывают ${}^{II} \bar{V}_i$ по соотношению (15). Если полученное значение хотя бы одного из этих объемов отрицательно, то условие (9) для этой даты не выполняется. При этом нужно задаться новыми датами начала и конца (или одной из этих дат) периода функционирования биореактора II и произвести новый расчет, и так до тех пор, пока не будет справедливо неравенство ${}^{II} \bar{V}_i > 0$ для каждой из этих дат.

После подстановки принятых ${}^I V_d$ и ${}^{II} \bar{V}_d$ в соответствующие формулы определяются значения параметров основных узлов БГУ: общей площади солнечных коллекторов ($S_{s.c}$), полного объема (${}^I V^f$ и ${}^{II} V^f$) и массы теплоаккумулирующего материала для каждого биореактора (${}^I m_{nac}$ и ${}^{II} m_{nac}$).

По приведенной методике были проведены расчеты параметров основных узлов разработанной БГУ для климатических условий Дагестана при следующих исходных данных: $n = 2$ сут; $N_{day}^{cl} = 60$ сут; $Q_{th.en}^{an} = 190$ ГДж. Были получены следующие значения параметров основных узлов БГУ:

Площадь солнечных коллекторов $S_{s.c}$, м ²	25
Полный объем, м ³ :	
биореактора I	1.1
биореактора II	52
Масса теплоаккумулирующего материала, кг:	
для биореактора I $m_{h.ac}^I$	245
для биореактора II $m_{h.ac}^{II}$	723

Доля биогаза для подогрева ежесуточно подаваемых в биореактор I доз субстрата в зимний период года составила менее 0.3% годового объема биогаза, производимого БГУ.

Для аналогичной БГУ с одним биореактором и с такими же значениями исходных данных были получены следующие значения параметров: $S_{s.c} = 144$ м²; $V^f = 18$ м³; $m_{h.ac} = 1648$ кг.

ВЫВОДЫ

1. В разработанной принципиально новой технологической схеме солнечной биогазовой установки с двумя биореакторами первый полноценно задействован в производстве биогаза непрерывно в течение года, а функционирование второго биореактора регулируется изменением расхода перерабатываемой биомассы в зависимости от изменяющихся по сезонам года климатических и актинометрических условий.

2. Единственным источником тепловой энергии, компенсирующим все энергозатраты на технологические нужды БГУ, является энергоустановка на основе солнечных коллекторов, площадь которых выбирается из условия достаточного обеспечения биогазовой установки тепловой энергией в наиболее холодный зимний период без резервного нагревателя.

3. Приведена методика расчетов оптимальных значений параметров каждого биореактора БГУ, площади солнечных коллекторов и массы теплоаккумулирующего материала.

4. Применение предложенной БГУ позволяет снизить общую площадь солнечных коллекторов более чем в 2 раза и на 25% суммарную себестоимость

солнечных коллекторов, биореакторов и массы теплоаккумулирующего материала.

5. Разработанная установка и приведенная методика расчетов основных узлов солнечных БГУ найдут широкое применение при проектировании биогазовых установок в регионах России с достаточным поступлением солнечного излучения (южные районы европейской части, юг Сибири и Дальнего Востока).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. М.: Физматлит, 2010.
2. Ковалев А.А., Макаров А.Г. Использование солнечных коллекторов для повышения энергоэффективности системы теплоснабжения фермы КРС от биогазовой установки // Вестник ВНИИМЖ. 2019. № 4 (36). С. 20–23.
3. Алхасов А.Б., Дибиров Я.А., Дибиров К.Я. Энергоэффективные солнечные биогазовые установки с тепловыми аккумуляторами // Промышленная энергетика. 2020. № 5. С. 35–43. <https://doi.org/10.34831/EP.2020.75.74.005>
4. Осадчий Г.Б. Гелиометантенк-реактор биогазовой установки // Промышленная энергетика. 2006. № 12. С. 42–43.
5. Пат. РФ № 166736 МПК С 02F 11/04, А 01С 3/00. Гелиобиогазовая установка / Я.А. Дибиров, М.Г. Дибиров, Э.Г. Искендеров, М.Ш. Зейналов. Опубл. 10.12.2016 // Б.И. 2016. № 34.
6. Пат. РФ № 2664457 МПК С 02F 11/04, С 12М 1/02, С 12М 1/38. Солнечная биогазовая установка / Я.А. Дибиров, М.Г. Дибиров, К.Я. Дибиров, М.М. Дибирова. Опубл. 17.08.2018 // Б.И. 2018. № 23.
7. Пат. РФ № 2734456 МПК С 02F 11/04, С 12М 1/107, F 24S 20/00. Автономная солнечная биогазовая установка / Я.А. Дибиров, А.Б. Алхасов, К.Я. Дибиров, Э.Г. Искендеров. Опубл. 16.10.2020 // Б.И. 2020. № 29.
8. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Прогноз погоды. Дневник наблюдений. <https://www.gismeteo.ru/>
10. Малявина Е.Г. Теплотери здания: справ. пособие. М.: АВОК-пресс, 2007.
11. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории Российской Федерации / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиц, С.В. Киселева, Е.Н. Терехова. М.: ОИВТ РАН, 2010.
12. Инсоляция для разных регионов в таблицах. <http://www.solbat.su/meteorology/insolation>

Solar Biogas Plant Using Heat Accumulators and the Calculation Technique for the Main Units' Parameters

A. B. Alkhasov^a, Ya. A. Dibirov^{a, *}, and K. Ya. Dibirov^a

^a *Institute of Geothermal and Renewable Energy Problems, Branch of the Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, 367030 Russia*

**e-mail: jakhya@yandex.ru*

Abstract—The energy efficiency of existing biogas plants (BGP) can be improved using solar energy. At present, more than half of the thermal energy generated by solar collectors in solar biogas plants remains unclaimed for directly covering the technological needs of biogas plants. A schematic diagram of a bioreactor plant with two bioreactors has been developed, which allows, regardless of the seasonal and daily irregularities in the supply of solar energy, to maximize the full potential of the thermal energy generated by solar collectors to ensure all the energy consumption of the technological scheme of fermentation of the feedstock. One bioreactor is fully operational all year round and the second during a period when the amount of thermal energy generated by solar collectors exceeds the total level of thermal energy required to compensate for all energy costs for biogas production in the first bioreactor. The connection (or disconnection) of the second bioreactor is carried out by a thermocontroller with servo drives installed on the pipelines for the circulation of the coolant, the supply of a daily dose of the raw material substrate to the bioreactor, and the discharge hatch into the liquid fertilizer tank. The round-the-clock maintenance of the optimal thermal mode of biomass fermentation in each bioreactor during periods of absence of solar energy is ensured by supplying the thermal energy of the discharge of a phase-transition heat accumulator installed in a reservoir with a liquid around each bioreactor. Using the example of raw materials—cattle manure (cattle) with a thermophilic mode of fermentation—the method of calculating the optimal values of the parameters of each bioreactor of a bioreactor, the area of solar collectors, and the amount of heat storage material is considered. Implementation of the proposed biogas plant makes it possible to reduce the area of solar collectors by more than two times and by 25% the total cost of the main biogas units.

Keywords: biogas plants, solar collector, thermocontroller, heat accumulator, dose volume of the initial substrate, thermal energy