

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

THERMODYNAMIC ANALYSIS

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АЭ

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF BASIC
ENERGY GENERATION PROCESSING IN AE

Статья поступила в редакцию 27.03.15. Ред. рег. № 2213

The article has entered in publishing office 27.03.15. Ed. reg. No. 2213

УДК 631.1.004.18:636.22/28

**АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОГАЗОВОЙ
УСТАНОВКИ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ОТБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ
ЭФФЛЮЕНТА**

Д.А. Ковалев¹, А.А. Ковалев¹, Ю.В. Караева², И.А. Трахунова²

¹ФГБНУ ВИЭСХ

Россия 109456, Москва, 1-й Вешняковский проезд, д. 2

тел.: (499) 171-13-72; e-mail: kovalev_da80@mail.ru

²КазНЦ РАН

Россия 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 190

тел.: (843) 273-92-31; e-mail: julieenergy@list.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.05.005

Заключение совета рецензентов: 30.03.15 Заключение совета экспертов: 03.04.15 Принято к публикации: 08.04.15

В данной работе рассмотрена технология метанового брожения биоотходов с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента*. Для повышения энергетической эффективности биогазовой установки предложена технологическая схема с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента, которая позволяет использовать биогазовые установки в регионах с низкой среднегодовой температурой окружающего воздуха. На основании методики теплового и термодинамического анализа проведена сравнительная оценка энергетической эффективности двух биогазовых установок: традиционной и с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента. Ключевым аппаратом схемы является метантенк, поэтому представлен детальный расчет его теплового и эксергетического КПД. Применение теплового насоса в системе теплоснабжения БГУ позволит увеличить тепловой КПД схемы с 39 % до 46 %, а эксергетический КПД с 6 % до 31 %.

Ключевые слова: биогазовая установка, энергетическая эффективность, рекуперация отбросной теплоты эффлюента.

**ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF A BIOGAS PLANT WITH HEAT RECOVERY
OF WASTE EFFLUENT HEAT**

D.A. Kovalev¹, A.A. Kovalev¹, Yu.V. Karaeva², I.A. Trakhunova²

* Жидкие и твердые продукты переработки биоотходов в метантенке [ГОСТ Р 52808 2007].



¹All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture
2, 1-st Veshnyakovskiy Str., Moscow, 109456 Russian Federation
ph.: (499) 171-13-72; e-mail: kovalev_da80@mail.ru

²KazanSC of RAS
2/31 Lobachevskiy Str., Kazan, 420111 Russian Federation
ph.: (843) 273-92-31; e-mail: julieenergy@list.ru

Referred 30 March 2015 Received in revised form 3 April 2015 Accepted 8 April 2015

The paper considers methane fermentation technology of bio waste fermentation with heat recovery of waste effluent heat. In order to improve the energy efficiency of a biogas plant the authors propose technological scheme of waste heat recovery effluent, which allows using biogas plants in regions with low average annual temperature. Based on the technique of thermal and thermodynamic analysis it is comparatively assessed the energy efficiency of two biogas plants: the traditional and the recovery of waste heat of the effluent. The paper presents a detailed calculation of digester thermal and energetic efficiency, because it is a key unit of the scheme of the apparatus. The use of heat pump in biogas plant heating system will increase the thermal efficiency of the scheme from 39% to 46%, and the exergy efficiency from 6% to 31%.

Keywords: biogas plant, energy efficiency, recovery of waste heat.



*Ковалев Дмитрий Александрович
Dmitry A. Kovalev*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заведующий отделом биоэнергетики, охраны окружающей среды и нанотехнологий ФГБНУ ВИЭСХ.

Образование: Московский государственный индустриальный университет (МГИУ) 2003 г., инженер.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; анаэробная переработка отходов животноводства, технические инновации в сельском хозяйстве и защите окружающей среды, производство биогаза из биомассы.

Публикации: 45.

Information about the author: PhD (technics), Head of the Department of Bioenergy, Environment and Nanotechnology of All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture (ARIEA).

Education: Moscow State Industrial University (MSIU) 2003, engineer.

Research area: renewable energy, anaerobic digestion of animal waste, technical innovations in agriculture and environmental protection, the production of biogas from biomass.

Publications: 45.



*Ковалев Андрей Александрович
Andrey A. Kovalev*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории биоэнергетических установок ФГБНУ ВИЭСХ.

Образование: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) 2009г., инженер.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; анаэробная переработка отходов животноводства, производство биогаза из биомассы, теплоэнергетические установки, тепломас-сообмен.

Публикации: 22.

Information about the author: PhD (technics), Senior Researcher of the Laboratory of Bioenergy Plants of All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture (ARIEA).

Education: Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) 2009, engineer.

Research area: renewable energy, anaerobic digestion of animal waste, biogas production from biomass heat and power plants, heat and mass transfer.

Publications: 22.



Караева Юлия
Викторовна
Julia V. Karaeva

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории энергосберегающих технологий и перспективных источников энергии КазНЦ РАН.

Образование: Казанский государственный энергетический университет, специальность «Экономика и управление на предприятии (энергетика)» (2000–2005 гг.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; математическое моделирование, гидродинамика, тепломассоперенос.

Публикации: 41.

Information about the author: PhD (technics), Senior Researcher of the Laboratory of Energy-Saving Technologies and Advanced Energy Sources, KazanSC of RAS.

Education: Kazan State Energy University, specialty "Economics and Management at Enterprise (energy)" (2000-2005).

Research area: renewable energy, mathematical modeling, hydrodynamics, heat and mass transfer.

Publications: 41.



Трахунова Ирина
Александровна
Irina A. Trakhunova

Сведения об авторе: младший научный сотрудник лаборатории энергосберегающих технологий и перспективных источников энергии КазНЦ РАН.

Образование: Казанский государственный технологический университет, специальность «Биотехнология» (2004–2009гг.), Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН, аспирантура (2009–2012 гг.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; биогазовые установки, математическое моделирование, тепловой и эксергетический анализ.

Публикации: 22.

Information about the author: Junior Researcher of the Laboratory of Energy-Saving Technologies and Advanced Energy Sources, KazanSC of RAS.

Education: Kazan State Technological University, specialty "Biotechnology" (2004-2009), Research Center for Power Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, graduate school (2009-2012).

Research area: biogas plant, mathematical modeling, thermal and exergy analysis.

Publications: 22.

Введение

Основной причиной ограниченного применения биогазовых установок являются большие энергетические затраты на технологические нужды оборудования. Наиболее энергоемкий – процесс нагрева суточной дозы загрузки метантенка, на который идет около 95 % энергии, расходуемой на собственные нужды установки. Опыт применения систем подогрева субстрата в системах теплоснабжения биогазовых установок (БГУ) незначителен, а имеющиеся сведения в научно-технической литературе не позволяют создать эффективные энергосберегающие установки [1].

Для повышения эффективности БГУ предложена технологическая схема с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента, эффективность которой подтверждена на основании экспериментальных данных,

полученных в ФБГНУ ВИЭСХ на лабораторной установке [2, 3, 4, 5].

Объективная оценка степени энергетического совершенства любого технологического процесса или аппарата может быть сделана лишь на основе термодинамического анализа. Однако представленные в литературе методики [6–11] не учитывают технологические особенности производства биогаза. В работе предлагается порядок расчета энергетической эффективности биогазовой установки с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента.

Технологическая схема метанового брожения биоотходов

Рассмотрим технологические схемы получения биогаза из навоза, поступающего в количестве 25 тонн в сутки. Температурный режим термофиль-



ный (55 °С). Гидравлическое время удержания 10 суток.

Рассмотрим наиболее распространенную технологическую схему получения биогаза (рис. 1). Технологический процесс осуществляется следующим образом. Органические отходы с животноводческого комплекса поступают в приемную емкость 1, а затем фекальным насосом 2 подаются в метантенк 3, где в

процессе анаэробной ферментации получают два первичных продукта: биогаз и эффлюент. Перемешивание в метантенке гидравлическое. Поддержание температуры технологического процесса осуществляется с помощью стационарного подогревателя 4. Из метантенка эффлюент самотеком поступает в отстойник 5, а образовавшийся биогаз подается в водогрейный котел 6.

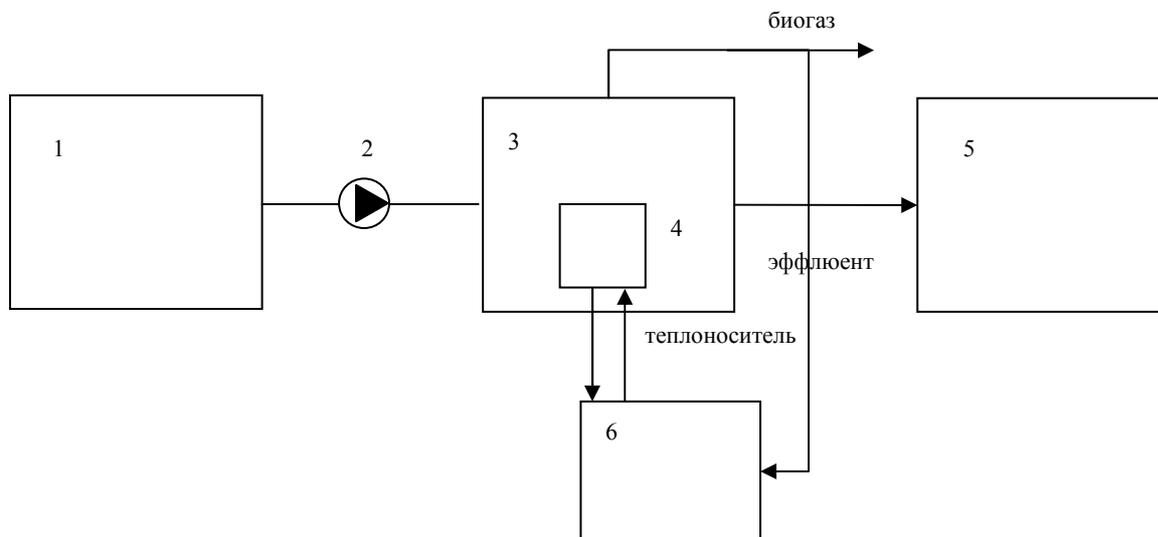


Рис. 1. Схема традиционной БГУ:

1 – приемная емкость; 2 – фекальный насос; 3 – метантенк; 4 – теплообменник в метантенке;
5 – отстойник эффлюента; 6 – водогрейный котел

Fig. 1. Scheme of the traditional biogas plant:

1 - receiving tank; 2 - pump; 3 - digester; 4 - heat exchanger in the digester; 5 – clarifier effluent; 6 – water heating boiler

На рис. 2 представлена предлагаемая БГУ с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента. Схема метанового брожения включает емкость предварительного нагрева поступающего с фермы субстрата 1 с вмонтированным теплообменником 2, откуда фекальным насосом 10 органические отходы подаются в метантенк 11. В метантенке смонтирован теплообменник 12, поддерживающий температурный режим процесса метанового сбраживания. Перемешивание субстрата осуществляется гидравлическим способом с помощью циркуляционного насоса. Образовавшийся биогаз поступает в двигатель внутреннего сгорания (ДВС) 14. Теплота из блока утилизации

теплоты от ДВС, включающего теплообменный аппарат системы охлаждения двигателя 15 и экономайзер 16, используется для компенсации тепловых потерь через ограждающие поверхности метантенка. Эффлюент самотеком поступает в отстойник 8, в котором смонтирован теплообменник для отбора тепловой энергии 9. Теплообменник 9 посредством трубопроводов соединен с испарителем теплового насоса 6. В испарителе теплового насоса (ТНУ) происходит теплообмен между теплоносителем и низкопотенциальным хладагентом, который после повышения энергетического потенциала компрессором 5 направляется в конденсатор теплового насоса 4.

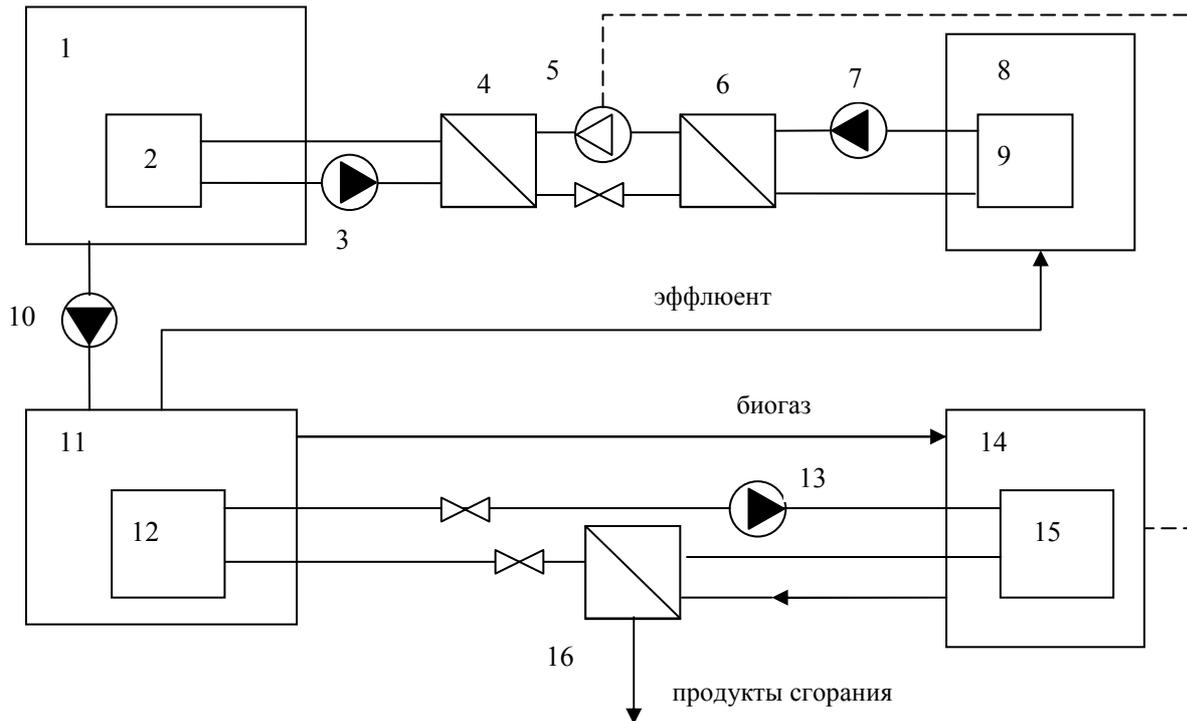


Рис. 2. Схема БГУ с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента:

1 – бак предварительного нагрева; 2 – теплообменник в баке предварительного нагрева (ТА 1); 3, 13 – насос циркуляции греющего теплоносителя; 4 – конденсатор теплового насоса; 5 – компрессор теплового насоса; 6 – испаритель теплового насоса; 7 – насос циркуляции охлаждающего теплоносителя; 8 – отстойник эффлюента; 9 – теплообменник в отстойнике эффлюента (ТА 2); 10 – фекальный насос; 11 – метантенк; 12 – теплообменник в метантенке; 14 – ДВС; 15 – теплообменный аппарат системы охлаждения ДВС (ТА 3); 16 – экономайзер (ТА 4)

Fig. 2. Scheme of the biogas plant with recovery of waste heat of the effluent:

1 - preheating tank; 2 - the heat exchanger in a preheating tank (TA 1); 3, 13 - circulation pump for the heating medium; 4 - condenser heat pump; 6 - heat pump evaporator; 7 - pump for circulating coolant cooling; 8 - clarifier effluent; 9 - heat exchanger in clarifier effluent (TA 2); 10 - pump; 11 - digester; 12 - heat exchanger in the digester; 14 - internal combustion engine; 15 - a heat exchanger cooling the internal combustion engine (TA 3); 16 - economizer (TA 4)

В конденсаторе теплового насоса 4 происходит теплообмен между высокопотенциальным хладагентом и греющим теплоносителем, который затем направляется в теплообменник емкости предварительного нагрева 2, где происходит теплообмен между греющим теплоносителем и инфлюентом*, в результате чего инфлюент нагревается до рабочей температуры процесса сбраживания и подается в метантенк 11. Образующийся в результате метаногенеза биогаз используется в ДВС 14 для привода электрогенератора и компрессионного теплового насоса.

Анализ энергетической эффективности технологической схемы производства биогаза проводился на основании методики теплового и термодинамического анализа.

Тепловой и эксергетический методы анализа технологических схем производства биогаза

Ключевым аппаратом схемы является метантенк, поэтому представим детальный расчет его теплового

и эксергетического КПД. Для этого определим площадь поверхности метантенка с плоским покрытием:

$$S_p = 2\pi r \cdot h + \pi r^2, \quad (1)$$

где r – радиус метантенка ($r = 3,5$ м); h – высота метантенка ($h = 7,5$ м).

Зададим коэффициент теплопередачи от субстрата в воздух $k_p = 0,2$ Вт/(м²·К) и теплоемкость субстрата $c_p = 4098$ Дж/кг·К. Показатель (темп) охлаждения органического субстрата m [12]

$$m = S_p k_p \tau_p / G_p c_p, \quad (2)$$

где G_p – масса субстрата в метантенке ($G_p = 250\,000$ кг); τ_p – продолжительность подогрева субстрата в метантенке ($\tau_p = 864\,000$ с).

Рассчитаем вероятную температуру субстрата t_x в метантенке по формуле [12]:

* Биоотходы, поступающие на обработку в метантенк

$$t_x = t_{o.ср.} + (t_c'' - t_{o.ср.}) / \exp(m), \quad (3)$$

где температура окружающей среды $t_{o.ср.} = 4,1^\circ\text{C}$; температура субстрата на выходе из теплообменника $t_c'' = 55^\circ\text{C}$.

Средняя температура субстрата в метантенке за период подогрева $\tau_{\text{подогрев}}$ [12]

$$\bar{t}_{c.p.} = \frac{t_c'' - t_x \cdot \exp(-m)}{1 - \exp(-m)} - \frac{t_c'' - t_x}{m}. \quad (4)$$

Находим количество теплоты, необходимое для подогрева субстрата в метантенке от t_x до t_c'' (кДж) [12]:

$$Q_{\text{под}}^M = G_p c_p (t_c'' - t_x) 10^{-3}. \quad (5)$$

Определяем тепловые потери в окружающую среду, кВт:

$$q_{\text{пот}} = S_p k_p (\bar{t}_{c.p.} - t_{o.ср.}) / 1000. \quad (6)$$

В традиционной БГУ дополнительно учтем потери, связанные с подгревом субстрата до температуры технологического режима, кВт:

$$q_{\text{пот}} = S_p k_p (\bar{t}_{c.p.} - t_{o.ср.}) / 1000 + \frac{G_p c_p (t_c'' - 10)}{86\,400 \cdot 1000}. \quad (7)$$

Время, необходимое для подогрева субстрата в метантенке от вероятной температуры субстрата t_x до температуры t_c'' [12], с:

$$\tau_{\text{подогрев}} = \frac{Q_{\text{под}}^M}{(i_B^{70} - i_B^{50}) g_{\text{вод}} - q_{\text{пот}}}, \quad (8)$$

где $g_{\text{вод}}$ – расход сетевой воды в подогревателе метантенка ($g_{\text{вод}} = 1,1$ кг/с для традиционной БГУ; $g_{\text{вод}} = 0,23$ кг/с для БГУ с рекуперацией отбросной теплоты); i_B^{70} – энтальпия сетевой воды при $t_B = 70^\circ\text{C}$ ($i_B^{70} = 293,4$ кДж/кг); i_B^{50} – энтальпия сетевой воды при $t_B = 50^\circ\text{C}$ ($i_B^{50} = 209,6$ кДж/кг).

Определим среднее количество теплоты, передаваемое субстрату в единицу времени в процессе его нагрева [12], кВт:

$$q_{\text{под1}} = \frac{Q_{\text{под}}^M}{\tau_{\text{подогрев}}} + q_{\text{пот}}. \quad (9)$$

Тепловой КПД метантенка:

$$\eta_M = (q_{\text{под1}} - q_{\text{пот}}) / q_{\text{под1}}. \quad (10)$$

В традиционной схеме общий тепловой КПД равен КПД метантенка.

При проведении теплового и термодинамического анализа исследовались теплообменные аппараты в баке предварительного нагрева (ТА 1), в отстойнике (ТА 2), в метантенке, в системе охлаждения ДВС (ТА 3), а также метантенк, теплонасосная установка (ТНУ), ДВС и экономайзер (ТА 4). Поскольку через насосы, компрессоры, газгольдер проходят транзитные потоки энергии, потери энергии в которых минимальные (КПД составляет 99 %), они не оказывают влияния на КПД схемы и не учитываются при проведении теплового и термодинамического анализа.

Тепловой КПД БГУ с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента определялся по следующей формуле:

$$\eta = \frac{Q_{\text{от}}}{Q_{\text{пр}} + Q_{\text{эж}}}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{от}}$ – теплота, вносимая с эффлюентом в отстойник, кВт; $Q_{\text{пр}}$ – теплота, вносимая с подогретым субстратом из бака предварительного нагрева, кВт; $Q_{\text{эж}}$ – теплота, вносимая с горячей водой из экономайзера, кВт.

Теплового анализа недостаточно для того, чтобы оценить энергетическую эффективность технологии метанового брожения. Эксергетический анализ тепловых потерь дополняет тепловой баланс, позволяя точнее оценить качественную картину энергетических потерь в технологической схеме.

Эксергетический метод термодинамического анализа технологической схемы производства биогаза

Определим эксергию, подводимую к метантенку. Химическая составляющая эксергии, кВт

$$E_{\text{М}}^{\text{хим}} = E_{\text{суб}}^{\text{хим}} - E_{\text{эф}}^{\text{хим}}. \quad (12)$$

Химическая эксергия, подводимая к метантенку с субстратом,

$$E_{\text{суб}}^{\text{хим}} = G_p Q_{\text{ст}}^H \omega'_{\text{суб.в}} / 86\,400, \quad (13)$$



где $Q_{ст}^H$ – низшая теплота сгорания сухого вещества в субстрате ($Q_{ст}^H = 19148$ Дж/кг); $\omega'_{сух.в}$ – содержание сухого вещества в субстрате ($\omega'_{сух.в} = 0,05$).

Химическая эксергия, отводимая от метантенка с эффлюентом,

$$E_{эф}^{хим} = G_{эф} Q_{ст}^H \omega''_{сух.в}, \quad (14)$$

где $G_{эф}$ – расход эффлюента, кг/с; $Q_{ст.эф}^H$ – низшая теплота сгорания сухого вещества в эффлюенте ($Q_{ст.эф}^H = 12055$ Дж/кг); $\omega''_{сух.в}$ – содержание сухого вещества в эффлюенте ($\omega''_{сух.в} = 0,035$).

Тепловая составляющая эксергии, подводимая к метантенку с водой (теплоносителем), кВт,

$$E_{вод}^{тепл} = E_{вод}^{тепл} - E_{вод}^{тепл}, \quad (15)$$

$$E_{вод}^{тепл} = g_{вод} c'_{р.в} \left(T'_{вод} - T_0 - T_0 \ln \frac{T'_{вод}}{T_0} \right) 10^{-3}, \quad (16)$$

где $c'_{р.в}$ – теплоемкость теплоносителя на входе, Дж/(кг·К); $T'_{вод}$ – температура теплоносителя в стационарном подогревателе на входе ($T'_{вод} = 343$ К).

$$E_{вод}^{тепл} = g_{вод} c''_{р.в} \left(T''_{вод} - T_0 - T_0 \ln \frac{T''_{вод}}{T_0} \right) 10^{-3}, \quad (17)$$

где $c''_{р.в}$ – теплоемкость сетевой воды на выходе, Дж/(кг·К); $T''_{вод}$ – температура воды на выходе из стационарного подогревателя метантенка ($T''_{вод} = 323$ К).

Мощность, подводимая к метантенку, составляет N_M .

Определяем сумму эксергий на входе в метантенк:

$$E_{вх}^M = E_M^{хим} + E_{вод}^{тепл} + N_M. \quad (18)$$

Определяем химическую эксергию, отводимую от метантенка с биогазом:

$$E_{биогаз}^{хим} = 0,975 \cdot G_{бр} \cdot Q_H^6, \quad (19)$$

где Q_H^6 – низшая теплота сгорания биогаза ($Q_H^6 = 20000$ Дж/кг); $G_{бр}$ – расход биогаза, кг/с.

$$G_{бр} = \frac{G_p \omega_{сух.в} \omega_{орг.в} \omega_{беззол.в} \eta_{эф}}{86400}, \quad (20)$$

где $\omega_{сух.в}$ – содержание сухого вещества в субстрате ($\omega_{сух.в} = 0,05$); $\omega_{орг.в}$ – содержание в сухом веществе органического вещества ($\omega_{орг.в} = 0,8$); $\omega_{беззол.в}$ – содержание беззольного вещества в органическом веществе ($\omega_{беззол.в} = 0,99$); $\eta_{эф}$ – эффективность процесса метанового брожения ($\eta_{эф} = 0,84$).

Таким образом, эксергия на выходе из метантенка

$$E_{вых}^M = E_{биогаз}^{хим}$$

Эксергетический КПД метантенка

$$\eta_M = \frac{E_{вых}^M}{E_{вх}^M}. \quad (21)$$

В традиционной БГУ положительным технологическим эффектом является подогрев сетевой воды и субстрата. Таким образом, эксергетический КПД определялся следующим образом:

$$\eta_{ex} = \frac{(E_{суб}^{тепл} - E_{суб}^{тепл}) + (E_{вод}^{ТО} - E_{вод}^{ТО})}{E_{суб}^{хим}}, \quad (22)$$

где $E_{эф}^{тепл}$ – тепловая эксергия, подводимая в метантенк с субстратом, кВт; $E_{эф}^{тепл}$ – тепловая эксергия, отводимая из метантенка с субстратом, кВт; $E_{вод}^{ТО}$ – тепловая эксергия, отводимая с горячей водой из водогрейного котла в теплообменный аппарат метантенка для поддержания температурного режима, кВт; $E_{вод}^{ТО}$ – тепловая эксергия, отводимая с водой из теплообменного аппарата метантенка, кВт.

В биогазовой установке с рекуперацией отбросной теплоты положительным технологическим эффектом является подогрев сетевой воды, охлаждение продуктов сгорания и эффлюента, а также получение электроэнергии. Таким образом, эксергетический КПД определялся следующим образом:

$$\eta_{ex} = \frac{(E_{эф}^{тепл} - E_{эф}^{тепл}) + (E_{вод}^{ТО} - E_{вод}^{ТО}) + (E_{пр.сг}^{тепл} - E_{пр.сг}^{тепл}) + E_{эл}}{E_{суб}^{хим}}, \quad (23)$$

где $E_{эф}^{тепл}$ – тепловая эксергия, подводимая в отстойник с эффлюентом, кВт; $E_{эф}^{тепл}$ – тепловая эксергия, отводимая из отстойника с эффлюентом, кВт; $E_{вод}^{ТО}$ – тепловая эксергия, отводимая из экономайзера с горячей водой, кВт; $E_{вод}^{ТО}$ – тепловая эксергия, подводимая с водой в теплообменник системы охлаждения ДВС, кВт; $E_{пр.сг}^{тепл}$ – тепловая эксергия, подводимая к экономайзеру с продуктами сгорания, кВт; $E_{пр.сг}^{тепл}$ – тепловая эксергия, отводимая из экономайзера с продуктами сгорания, кВт.

Результаты

Результаты теплового анализа показали, что тепловой КПД метантенка в БГУ с рекуперацией отбросной теплоты эфлюента равен 88 %. Тепловой КПД метантенка в традиционной БГУ в 2 раза мень-

ше, он составил 39 % (рис. 3). Следует отметить, что эксергетический КПД метантенка – основного аппарата в технологии производства биогаза – при рекуперации отбросной теплоты эфлюента увеличивается на 14 % (с 40 % до 54 %).

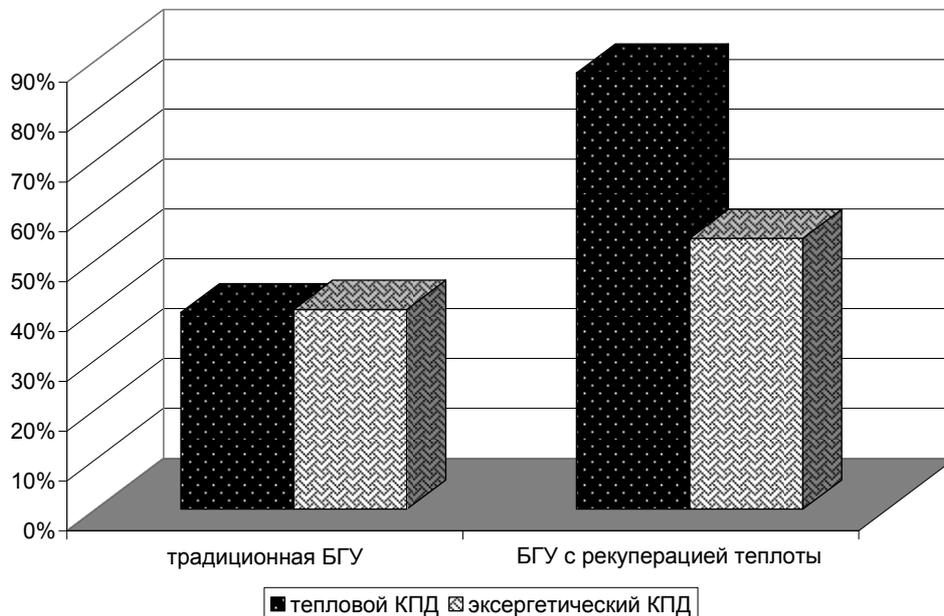


Рис. 3. Энергетическая эффективность метантенка
Fig. 3. The energy efficiency of the digester

Результаты теплового и эксергетического расчета для БГУ с рекуперацией отбросной теплоты эфлюента представлены на рис. 4.

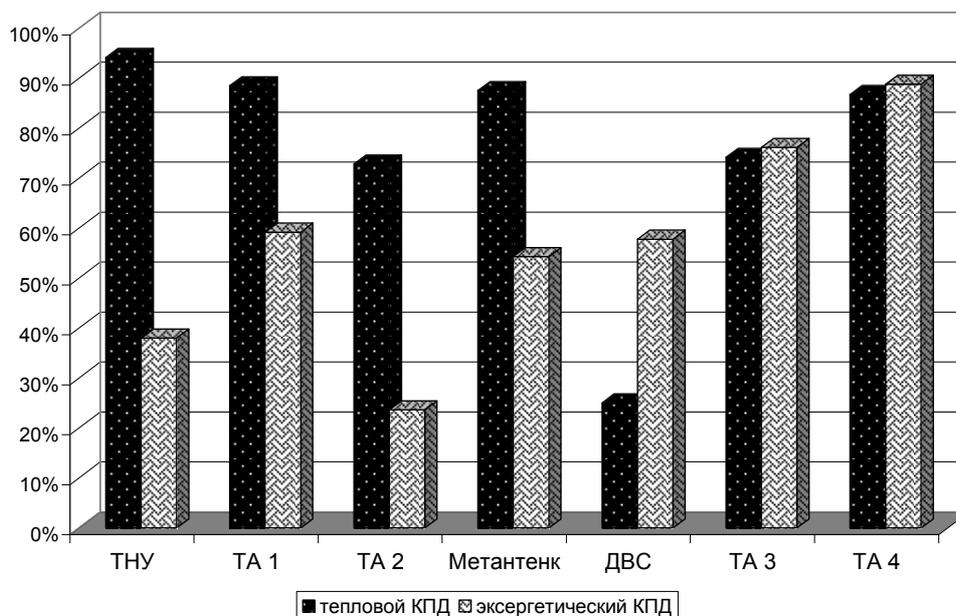


Рис. 4. КПД аппаратов БГУ с рекуперацией отбросной теплоты эфлюента
Fig. 4. The efficiency of the apparatus of a biogas plant with recovery of waste heat of the effluent

Энергетическая эффективность рассмотренных установок представлена на рис. 5. Тепловой анализ работы БГУ показал, что количество подводимой теплоты для компенсации собственных нужд установки в

традиционной схеме составило 92,18 кВт, а в схеме с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента 131,45 кВт применительно к ферме на 400 голов КРС.

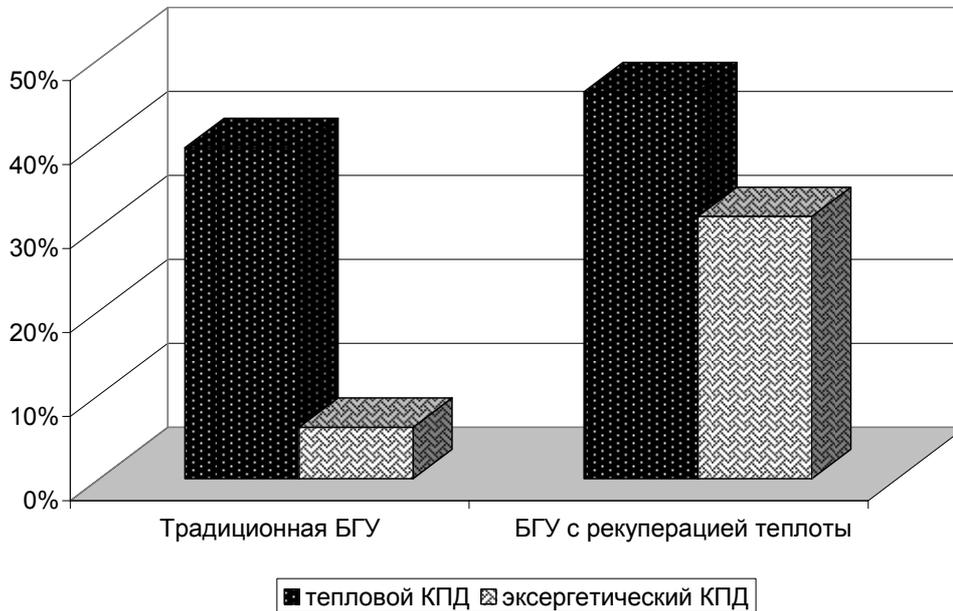


Рис. 5. Энергетическая эффективность БГУ
Fig. 5. The energy efficiency of a biogas plant

Тепловой КПД первой схемы составил 39 %, а второй схемы 46 %. Следует отметить, что обе схемы после запуска метантенка будут полностью покрывать свои потребности в энергии, однако, для регионов со среднегодовыми температурами окружающего воздуха ниже рассматриваемой, традиционная биогазовая установка требует подвода дополнительной тепловой энергии для ее функционирования. Термодинамический анализ показал, что схема производства биогаза с рекуперацией тепловой энергии является более эффективной, так как ее эксергетический КПД составляет 31 %, т. е. в 5 раз выше, чем в традиционной БГУ.

Заключение

Для повышения энергетической эффективности биогазовой установки предложена технологическая схема с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента, которая позволяет использовать биогазовые установки в регионах с низкой среднегодовой температурой окружающего воздуха.

Тепловой КПД традиционной БГУ составил 39 %, а БГУ с рекуперацией отбросной теплоты эффлюента 46 %. Следует отметить, что использование вторичных энергоресурсов при производстве биогаза позволит полностью покрывать свои потребности в энергии.

Применение теплового насоса в системе теплоснабжения БГУ позволяет увеличить эксергетический КПД схемы в целом с 6 % до 31 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России, идентификационный номер RFMEFI60714X0024

Список литературы

1. Арбузова Е.В., Щеклеин С.Е. К проблеме энергетической эффективности биогазовых технологий в климатических условиях России // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2011. № 7. С. 129–134.
2. Ковалев А.А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 119 с.
3. Ковалев А.А., Ковалев Д.А., Харченко В.В. Система теплоснабжения биогазовой установки блочно-модульной конструкции с использованием рекуперации теплоты эффлюента для фермы на 400 голов КРС // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2013. № 5. С. 61–67.
4. Ковалев А.А., Харченко В.В. Показатели работы тепловых насосов компрессионного и абсорбционного

типа в системе теплоснабжения биогазовой установки // Вестник ВИЭСХ. 2012. Т. 3, № 8. С. 30–33.

5. Ковалев А.А. Энергонезависимая установка для переработки органических отходов животноводства // Вестник ВИЭСХ. 2013. № 2 (11). С. 66–70.

6. Basrawi F., Yamada T., Nakanishi K. Effect of ambient temperature on the energy balance of anaerobic digestion plants // Journal of environment and engineering. 2010. Vol. 5, № 3. P. 526–538.

7. Dikici A. Energy and Exergy Analysis of Biogas Reactor Which Used Different Organic Manure Aided Solar Energy, Heat Controlling and Phase Change Material // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. Vol. 5, №12. P. 1909–1916.

8. Sallustio L., Sciubba E. Energy Recovery from Biomass: Process Simulation and Second Law Analysis of an Anaerobic Digester Coupled with an Internal Combustion Engine // International Journal of Thermodynamics. 2013. Vol. 16, Issue 3. P. 145–154.

9. Агабабов В.С., Байдакова Ю.О., Захарова А.О., Смирнова У.И. О возможности применения разностного метода эксергетического анализа для определения эффективности внедрения энергосберегающего мероприятия // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 5 (61). С. 63–65.

10. Мазуренко А.С., Денисова А.Е., Климчук А.А., Нго Минь Хиеу, Котов П.А. Эксергетические характеристики биогазовых установок // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 1, № 8 (67). С. 7–12.

11. Parsapour A. Biogas Production System as an “Upcycler”. Exergy Analysis and Economic Evaluation: M.sci. thesis. Linköping, Sweden, 2012. 52 p.

12. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС. М.: Издательство МЭИ, 2002. 612 с.

References

1. Arbuzova E.V., Sheklein S.E. K probleme ènergetičeskoj èffektivnosti biogazovyh tehnologij v klimatičeskih usloviâh Rossii. *International Scientific Journal for Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ* (IS-JAEE), 2011, no. 7, pp. 129–134 (in Russ.).

2. Kovalev A.A. Povyšenie ènergetičeskoj èffektivnosti biogazovyh ustanovok: PhD Summary. Moscow, 2014. 119 p. (in Russ.).

3. Kovalev A.A., Kovalev D.A., Harchenko V.V. Sistema teplosnabženiâ biogazovoj ustanovki bločno-modul'noj konstrukcii s ispol'zovanie rekuperacii teploty èfflûenta dlâ fermy na 400 golov KRS. *International Scientific Journal “Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ”* (ISJAEE), 2013, no. 5, pp. 61–67 (in Russ.).

4. Kovalev A.A., Harchenko V.V. Pokazateli raboty teplovyh nasosov kompressionnogo i absorbcionnogo tipa v sisteme teplosnabženiâ biogazovoj ustanovki. *Vestnik VIÈSH*, 2012, vol. 3, no. 8, pp. 30–33 (in Russ.).

5. Kovalev A.A. Ènergonezavisimaâ ustanovka dlâ pererabotki organičeskih othodov životnovodstva. *Vestnik VIÈSH*, 2013, no. 2 (11), pp. 66–70 (in Russ.).

6. Basrawi F., Yamada T., Nakanishi K. Effect of ambient temperature on the energy balance of anaerobic digestion plants. *Journal of environment and engineering*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 526–538 (in Eng.).

7. Dikici A. Energy and Exergy Analysis of Biogas Reactor Which Used Different Organic Manure Aided Solar Energy, Heat Controlling and Phase Change Material. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2011, vol. 5, no. 12, pp. 1909–1916 (in Eng.).

8. Sallustio L., Sciubba E. Energy Recovery from Biomass: Process Simulation and Second Law Analysis of an Anaerobic Digester Coupled with an Internal Combustion Engine. *International Journal of Thermodynamics*, 2013, vol. 16, issue 3, pp. 145–154 (in Eng.).

9. Agababov V.S., Baidakova Yu.O., Zaharova A.O., Smirnova U.I. O vozmožnosti primeneniâ raznostnogo metoda èksergetičeskogo analiza dlâ opredeleniâ èffektivnosti vnedreniâ ènergosberegaušego meropriâtiâ. *Ènergosbereženie i vodopodgotovka*, 2009, vol. 5 (61), pp. 63–65 (in Russ.).

10. Mazurenko A.S., Denisova A.E., Klimchuk A.A., Ngo Min' Hieu, Kotov P.A. Èksergetičeskie harakteristiki biogazovyh ustanovok. *Vostočno-Evropejskij žurnal peredovyh tehnologij*, 2014, vol. 1, no. 8(67). pp. 7-12 (in Eng.).

11. Parsapour A. Biogas Production System as an “Upcycler”. Exergy Analysis and Economic Evaluation: M. sci. thesis. Linköping, Sweden, 2012, 52 p. (in Eng.).

12. Nazmееv Yu.G. Mazutnye hozâjstva TÈS. Moscow: Izdatel'stvo MÈI Publ., 2002, 612 p (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

