

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОГАЗОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

А. С. Мазуренко

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

Директор Института энергетики и компьютерно-интегрированных систем управления
Email: antmaz46@gmail.com

А. Е. Денисова

Доктор технических наук, профессор*
Email: alladenysova@gmail.com

А. А. Климчук

Кандидат технических наук, доцент*
Email: aklimchuk74@rambler.ru

Нго Минь Хиеу

Аспирант*

Email: mhieu85@yahoo.com

П. А. Котов

Кандидат технических наук, ассистент*
Email: p_kotov@ukr.net

*Кафедра тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий
Одесский национальный политехнический университет
просп. Шевченко, 1, г. Одеса, Украина, 65044

Запропоновані теплові схеми біогазових установок. Представлено методіку ексергетичного аналізу різних схем біогазових установок, виконано зіставлення параметрів циклів розглянутих установок і наведено розрахунок і аналіз ексергетичних характеристик газотурбінної установи, парогазової установи зі скиданням газів у котел і парогазової установи з високотемпературним парогенератором і проміжним перегрівом пари

Ключові слова: ексергетичні характеристики, біогазова установка, високотемпературний парогенератор, проміжний перегрів пари

Предложены тепловые схемы биогазовых установок. Представлена методика эксергетического анализа различных схем биогазовых установок, выполнено сопоставление параметров циклов рассматриваемых установок и приведен расчет и анализ эксергетических характеристик газотурбинной установки, парогазовой установки со сбросом газов в котел и парогазовой установки с высокотемпературным парогенератором и промежуточным перегревом пара

Ключевые слова: эксергетической характеристики, биогазовая установка, высокотемпературный парогенератор, промежуточный перегрев пара

1. Введение

Использование биогазовых энергоустановок стимулируется непрерывным ростом цен на традиционные источники энергии, запасы которых ограничены. По оценкам экспертов разведанных запасов природного газа хватит на 50...60 лет [1]. Использование альтернативных топлив в энергоустановках способствует сохранению традиционных энергоресурсов и улучшению состояния окружающей среды в соответствии с принципами энергосберегающих технологий.

Согласно Закону Украины об энергосбережении [2] актуальной задачей является повышение экономической эффективности энергетических установок, использующих альтернативные виды топлива. Биогазовые энергоустановки широкого распространения пока не получили, что объясняется тем, что при использовании природного газа затраты на обслуживание традиционных энергоустановок минимальны, а применение биогаза связано с плохо прогнозируемыми затратами на сбор, транспортировку, хранение и подготовку сырья. Поэтому использование биотоплива экономически целесообразно в местах, расположенных вблизи аграрного производства, где развита инфраструктура

сбора и подготовки биомассы к использованию в энергоустановках [3].

Одним из направлений повышения энергетической эффективности биогазовых установок является применение парогазовых технологий.

2. Постановка проблемы и литературный обзор

Перспективным альтернативным источником энергии является биогаз, который можно получать из отходов жизнедеятельности людей, растительного и животного мира. Кризис мировой экономики, связанный с нехваткой топливно-энергетических ресурсов, стимулирует внедрение энергосберегающих технологий утилизации биологических отходов с выработкой обогащенного биогаза, способного заместить природный газ для электростанций и транспорта. Кроме того, выработка биогаза сопровождается получением дополнительного ценного продукта – экологически чистого удобрения для аграрного сектора, реализация которого сократит срок окупаемости альтернативной установки примерно в 3 раза.

Анализ исследований по использованию биогазовых технологий [4] позволяет сделать заключение о следующих положительных аспектах их применения:

- экономические: за счет конвертации энергия химических связей органических отходов превращается в энергию альтернативного топлива (биогаза) с одновременным получением экологически чистых удобрений, в результате, достигается снижение экологических платежей; генерация собственной электроэнергии и теплоты; производство экологически чистых удобрений;

- энергетические [5]: получение собственной тепловой и электрической энергии при использовании биогаза в когенерационных установках, что положительно влияет на структуру топливно-энергетического баланса страны;

- экологические [6]: утилизация органических отходов и очистка стоков, при этом содержание органических веществ в отходах снижается в 10 раз, за счет переработки и за счет замещения углеводов в энергобалансе, что приводит к сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу – метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂);

- географические: возможность размещения установок в любом регионе Украины, где есть достаточное количество органического сырья вне зависимости от наличия объектов традиционной энергетики, инженерных и транспортных сетей;

- инфраструктурные: при наличии сырья биогазовые установки могут заместить объекты традиционной энергетики (газопроводы, котельные, электросети, трансформаторы) и другие объекты инфраструктуры (хранилища отходов, подъездные пути), а при автономной работе отсутствуют затраты на подключение к энергосетям.

Социальные [7]: возможность обеспечения тепловой и электроэнергией объекты социальной инфраструктуры, расположенные поблизости (жилые дома, школы, больницы, детские сады, базы отдыха и др.), решение проблемы занятости в сельских районах, развитие инфраструктуры села, что положительно сказывается на уровне жизни населения.

В качестве источника альтернативного топлива для парогазовых энергоустановок (ПГУ) необходимо предусмотреть в тепловых схемах эффективные генераторы биогаза. В зависимости от мощности и назначения, тепловые схемы парогазовых установок могут отличаться составом основных элементов.

3. Тепловые схемы парогазовых установок на биотопливе

На рис. 1 представлена принципиальная тепловая схема биогазовой ПГУ мощностью до 1 МВт для фермерских хозяйств и промышленных предприятий, назначением которой является выработка электроэнергии и биоудобрений. При этом отсутствует зависимость объектов от внешних источников энергии, а дополнительная прибыль получается за счет продажи избыточной электроэнергии и экологически чистых удобрений [3].

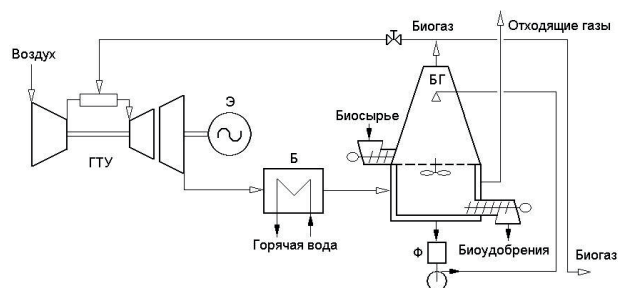


Рис. 1. Схема ПГУ мощностью до 1 МВт с генератором биогаза: ГТУ – газотурбинная установка; Э – электрогенератор; Б – бойлер; БГ – генератор биогаза

На рис. 2 представлена принципиальная тепловая схема биогазовой ПГУ мощностью более 1 МВт, которая в перспективе может заменить энергоблоки на традиционных видах топлива [3].

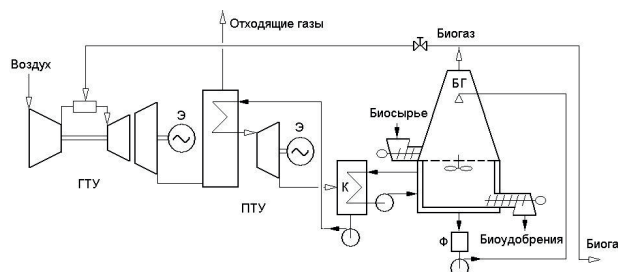


Рис. 2. Схема ПГУ мощностью более 1 МВт с генератором биогаза: ГТУ – газотурбинная установка; ПТУ – паротурбинная установка; Э – электрогенератор; К – конденсатор; БГ – генератор биогаза; Ф – фильтр

На рис. 3 представлена принципиальная схема когенерационной парогазовой установки на биогазе мощностью более 1 МВт, предназначенная для выработки электроэнергии, тепловой энергии для целей отопления и горячего водоснабжения, а также для производства экологически чистых биоудобрений [3].

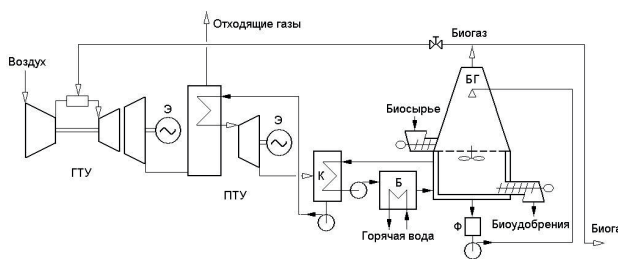


Рис. 3. Схема теплоэлектростанции с генератором биогаза более 1 МВт: ГТУ – газотурбинная установка; ПТУ – паротурбинная установка; Э – электрогенератор; К – конденсатор; Б – бойлер; БГ – генератор биогаза; Ф – фильтр

4. Эксергетический метод анализа тепловых схем биогазовых энергоустановок

Целью статьи является обоснование выбора наиболее эффективной схемы биогазовой установки (рис. 1 – 3) на основе эксергетического метода [8].

Эксергия теплоты определяется наибольшей удельной работой, которую можно получить из располагаемого удельного количества теплоты q , равна удельной работе обратимого цикла Карно

$$l_{ц} = q \eta_{ц}, \quad (1)$$

где $\eta_0 = 1 - \frac{T_0}{T}$ – термический КПД цикла Карно;

q – удельная располагаемая теплота, кДж/кг;

T_0 – температуры теплоприемника (окружающей среды), К;

T – заданная температура теплоотдатчика, К.

При этом, удельная эксергия теплоты заданного потенциала T :

$$ex = q \cdot [1 - (T_0 / T)]. \quad (2)$$

Эксергия потока рабочего тела определяется максимальной полезной работой, которую можно получить при обратимом переходе рабочего тела в состояние термодинамического равновесия с окружающей средой (p_0, T_0):

$$ex = i - i_0 - T_0 \cdot (s - s_0) = l_{пот} + \Delta ex, \quad (3)$$

где $l_{пот} = i - i_0$ – удельная работа потока, кДж/кг;

$\Delta ex = T_0(s - s_0)$ – потеря удельной эксергии рабочего тела в потоке, кДж/кг.

Поскольку работа потока:

$$\delta l_{пот} = - di = - v dp, \quad (4)$$

то удельную работу удобно определить по i - s диаграмме:

$$l_{пот} = \Delta i_{1-a} = i_1 - i_a = - \int_1^2 v dp, \quad (5)$$

где $i_1 - i_a$ – разность удельных энтальпий рабочего тела при расширении в турбине с производством удельной работы потока $l_{пот}$, кДж/кг.

Для источника теплоты – продуктов сгорания, изменяющих свою температуру при движении по газодамам парогенератора, справедливо:

$$ex = T_0 \cdot \Delta S, \quad (6)$$

где $\Delta S = \int_{вх}^{вых} \frac{\delta q}{T}$ – уменьшение удельной энтропии газа

при отдаче теплоты рабочему телу (воде), кДж/(кг·К).

Эксергетический КПД цикла определяется отношением полезно используемой эксергии $\Delta ex_{ц}$ ко всей израсходованной $\Delta ex_{рас}$:

$$\eta_{ц} = \frac{\Delta ex_{ц}}{\Delta ex_{рас}}. \quad (7)$$

Применительно к энергоустановкам полезно используемая эксергия превращается в действительную работу цикла $l_{ц,д}$ с учетом его необратимости, а израс-

ходованная эксергия является разностью подведенной эксергии ex_1 в цикле и отведенной ex_2 :

$$\eta_{ц} = \frac{l_{ц,д}}{ex_1 - ex_2}. \quad (8)$$

По разности удельных эксергий или удельных энтальпий в начальной и конечной точках процесса, можно определить тепловую эффективность соответствующей биогазовой энергоустановки. Определим полезную работу изоэнтропного расширения рабочего тела в газовой турбине:

$$l_{тг} = e_{вх} - e_{вых} = i_1 - i_2, \quad (9)$$

где $e_{вх}, e_{вых}$ – удельные эксергии рабочего тела в потоке на входе и выходе, кДж/кг.

Линии равных значений эксергии в i - s диаграмме прямые и в области насыщенного пара совпадают с линиями $T = const$ ($P = const$). Линия, соответствующая $ex = 0$, касается изобары P_0 в точке окружающей среды 0 . Отрезок по изоэнтропе между точкой, определяющей состояние вещества, и линией окружающей среды представляет собой эксергию относительно нулевого состояния (рис. 4).

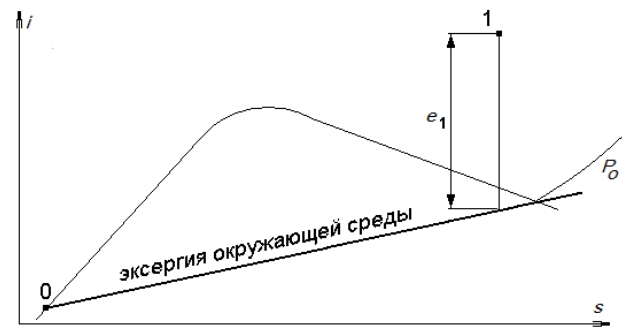


Рис. 4. Эксергия на i - s диаграмме водяного пара: e_1 – эксергия точки 1 относительно нулевого состояния

Удельная работа изоэнтропного расширения газа в газовой турбине

$$l_{тг} = c_{p,г} \cdot \Delta t_{тг}, \quad (10)$$

$$\text{где } \Delta t_{тг} = T_1 \left(1 - \frac{1}{\pi_{тг}^{\frac{1}{k_r - 1}}} \right), \quad (11)$$

$c_{p,г}$ – удельная теплоемкость рабочего тела, кДж/(кг·К);

T_1 – температура газа на входе в турбину, К;

$\pi_{тг}$ – степень расширения газа в турбине;

k_r – коэффициент адиабаты газа.

Удельная работа изоэнтропного сжатия воздуха в воздушном компрессоре:

$$l_{к} = c_{p,в} \cdot \Delta t_{вк}, \quad (12)$$

$$\text{где } \Delta t_K = T_4 \left(\pi_K^{\frac{k_n-1}{k_n}} - 1 \right), \tag{13}$$

$c_{p,v}$ – удельная теплоемкость рабочего тела (воздуха), кДж/(кг·К);

T_4 – температура воздуха на входе в воздушный компрессор, К;

π_K – степень сжатия воздуха в воздушном компрессоре;

k_v – коэффициент адиабаты воздуха.

Удельная работа изоэнтропного сжатия воды в питательном насосе:

$$l_{\text{пн}} = \Delta p \cdot \Delta V, \tag{14}$$

где Δp – разность давлений в насосе, кПа;

ΔV – удельный объем питательной воды, подаваемый питательным насосом в парогенератор, м³/кг.

5. Эксергетические характеристики различных схем биогазовых энергоустановок

Используя приведенные выше расчетные формулы, определим эксергетические КПД для различных схем биогазовых энергоустановок (рис. 5 – 7) [9]. Для учета потерь эксергии на трение рабочего тела в элементах установки, будем использовать адиабатные КПД. Реальные процессы расширения и сжатия в цикле отклоняются от изоэнтроп с увеличением энтропии на ΔS . Для эксергетического анализа эффективности тепловых схем посредством ограничим систему, включающую элементы, которые вырабатывают либо потребляют электрическую либо механическую энергию, контрольной поверхностью для учета входящих и выходящих потоков эксергии, пересекающих указанную поверхность.

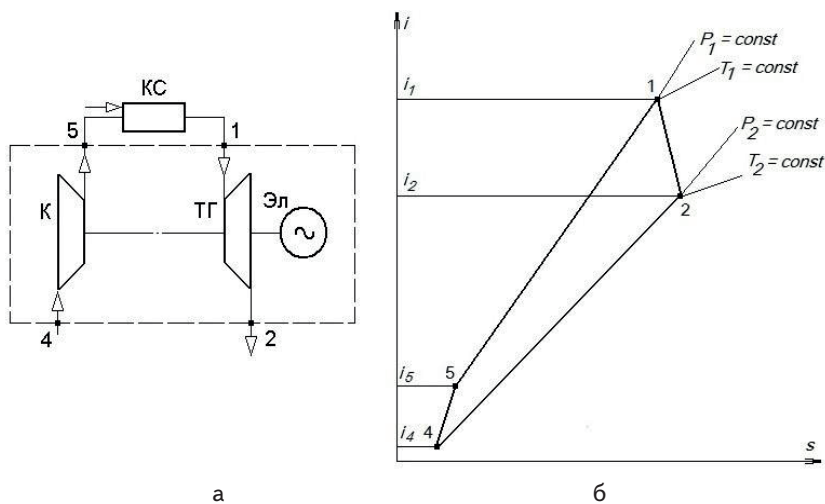


Рис. 5. Газотурбинная установка: а – тепловая схема; б – цикл в координатах $i-s$; К – компрессор; КС – камера сгорания; ТГ – турбина газовая; Эл – электрогенератор

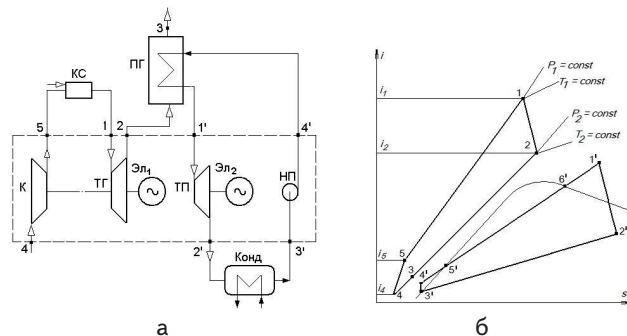


Рис. 6. Парогазовая установка со сбросом газов в парогенератор: а – тепловая схема; б – цикл в координатах $i-s$; К – компрессор; КС – камера сгорания; ТГ – турбина газовая; ТП – турбина паровая; Эл – электрогенератор; НП – питательный насос; Конд – конденсатор; ПГ – парогенератор; Эл – электрогенератор

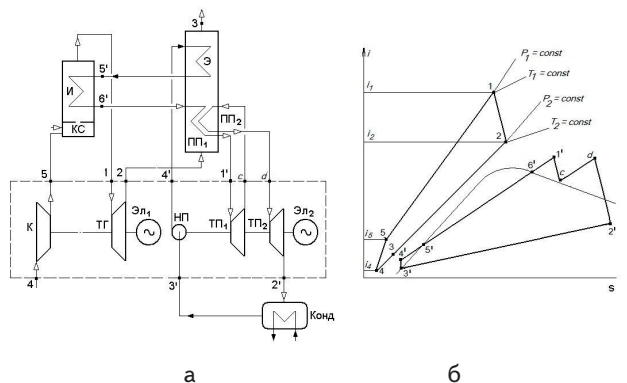


Рис. 7. Схема и цикл ПГУ с высоконапорным парогенератором (ВП) и промежуточным перегревом пара: а – тепловая схема; б – цикл в координатах $i-s$; К – компрессор; КС – камера сгорания; ТГ – турбина газовая; ПП – пароперегреватель; Эл – электрогенератор; И – испаритель парогенератора; ТП – турбина паровая; Конд – конденсатор; НП – питательный насос

6. Результаты расчета эксергетических характеристик различных схем биогазовых энергоустановок

В качестве примера выполним расчет эксергетического КПД для трех циклов (рис. 5 – 7) биогазовых энергоустановок. Параметры цикла газотурбинной установки (ГТУ) для рассматриваемых тепловых схем приняты одинаковыми (табл. 1).

Таблица 1

Параметры ГТУ

№ точки цикла ГТУ (рис. 2)	t, °С	P, бар	i, кДж/кг
1	1000	6,1	1250
2	588	1,02	807
3	20	1,0	21
5	251	6,12	254

6. 1. Эксергетический КПД для ГТУ

Для учета потерь трения при сжатии рабочего тела в компрессоре (рис. 5) адиабатный КПД компрессора принят $\eta_k = 0,85$; газовой турбины – $\eta_{гт} = 0,9$.

Согласно уравнению (8) эксергетический КПД ГТУ:

$$\eta_{цл} = \frac{l_{цл}}{ex_1 - ex_2} = \frac{l_{гт} \cdot \eta_{гт} - l_k / \eta_k}{q} = \frac{(i_1 - i_2) - (i_5 - i_4)}{i_1 - i_5}, \quad (15)$$

где $l_{гт}$ – удельная работа изоэнтропного расширения газа в турбине, кДж/кг;

l_k – удельная работа изоэнтропного сжатия воздуха в компрессоре, кДж/кг;

q – удельная располагаемая теплота, кДж/кг;

i_1, i_4 – энтальпия продуктов сгорания и воздуха в соответствующих точках цикла ГТУ, кДж/кг.

Значения энтальпий i_1 и i_4 (табл. 1) определяются расчетным путем ($i = c_p \cdot t$) по заданной температуре t_1 и t_4 и теплоемкости продуктов сгорания и воздуха [5], соответственно, а значения энтальпий i_2 и i_5 – по формулам (10), (12) с учетом η_k и $\eta_{гт}$.

Окончательно для ГТУ

$$\eta_{цл} = \frac{(1250 - 807) - (254 - 21)}{1250 - 254} = 0,21.$$

6. 2. Эксергетический КПД для парогазовой установки цикла (ПГУ) со сбросом газов в парогенератор

Для паровой турбины ПГУ (рис. 6) адиабатный КПД $\eta_{гтп} = 0,9$; температура газов на выходе из парогенератора $t_3 = 150$ °С; удельная теплоемкость газа, поступающего из ГТ ПГУ в парогенератор, $c_{p,г} = 1,19$ кДж/(кг·К) [10] при температуре $t_2 = 588$ °С. Построение парового цикла ПГУ выполнено с использованием i - s диаграммы водяного пара (табл. 2).

Таблица 2

Параметры ПГУ со сбросом газов в парогенератор

№ точки цикла ПГУ (рис. 3)	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{бар}$	$i, \text{кДж/кг}$
1/	550	10	3600
2/	33	0,05	2510
3/	33	0,05	138
4/	36	10,1	170

С учетом того, что для нагрева 1 кг воды необходимо затратить теплоту m кг газа, из теплового баланса парогенератора

$$m = \frac{G_{г}}{G_{в}} = \frac{i_{г'} - i_{г'}}{i_2 - i_3}, \quad (16)$$

где $G_{г}$ и $G_{в}$ – соответственно расходы газа в газотурбинном цикле и воды в паротурбинном цикле ПГУ.

С учетом формулы (16)

$$m = \frac{3600 - 170}{1,19 \cdot (588 - 150)} = 6,6 \text{ кг газа/кг воды.}$$

Согласно формуле (8), эксергетический КПД ПГУ

$$\eta_{ц2} = \frac{l_{цл}}{ex_1 - ex_2} = \frac{m \cdot (l_{гт} \cdot \eta_{гт} - l_k / \eta_k) + (l_{гтп} \cdot \eta_{гтп} - l_{гтп} / \eta_{гтп})}{q} = \frac{m \cdot [(i_1 - i_2) - (i_5 - i_4)] + (i_{г'} - i_{г'}) - (i_{г'} - i_{г'})}{m(i_1 - i_5)}. \quad (17)$$

После подстановки значений массы газа m и энтальпий в соответствующих точках цикла ПГУ (табл. 1, 2) эксергетический КПД ПГУ со сбросом газов в парогенератор

$$\eta_{ц2} = \frac{6,6 \cdot [(1250 - 807) - (254 - 21)] + (3600 - 2510) - (170 - 138)}{6,6(1250 - 254)} = 0,37$$

6. 3. Эксергетический КПД парогазового цикла с промежуточным перегревом пара и высоконапорным парогенератором (ПГУ с ВП)

Построение парового цикла ПГУ ВП (рис. 7) выполнено с использованием i - s диаграммы водяного пара при тех же параметрах цикла ГТУ (табл. 1).

Из теплового баланса теплообменника, включающего экономайзер и пароперегреватели (рис. 7), можно определить массу газа m' , необходимую для нагрева 1 кг воды:

$$m' = \frac{(i_{5'} - i_{4'}) + (i_{г'} - i_{г'}) + (i_d - i_c)}{i_2 - i_3}. \quad (18)$$

После подстановки значений энтальпий в соответствующих точках цикла ПГУ с ВП (табл. 3) в формулу (18):

$$m' = \frac{(1531 - 170) + (3480 - 2592)}{807 - 165} + \frac{(3600 - 2880)}{807 - 165} = 4,6 \text{ кг газа/кг воды.}$$

Согласно формуле (8) эксергетический КПД ПГУ с ВП

$$\eta_{ц3} = \frac{l_{цл}}{ex_1 - ex_2} = \frac{\Sigma l}{q} = \frac{m \cdot [(i_1 - i_2) - (i_5 - i_4)] + (i_{г'} - i_c) + (i_d - i_{2'}) - (i_{г'} - i_{3'})}{m \cdot [(i_1 - i_5) - (i_{6'} - i_{5'})]}. \quad (19)$$

Таблица 3

Параметры ПГУ с ВП

№ точки цикла ПГУ с ВП (рис. 4)	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{бар}$	$i, \text{кДж/кг}$
1/	550	140	3480
с	220	10,1	2880
в	550	10	3600
2/	33	0,05	2510
3/	33	0,05	138
4/	36	141	170
5/	335	140,5	1531
6/	335	140,5	2592

Подставляя значения m и i для соответствующих точек (табл. 1 – 3), получим КПД ПГУ с ВП

$$\eta_{из} = \frac{4,6 \cdot [(1250 - 807) - (254 - 21)] + (3480 - 2880)}{4,6[(1250 - 254) + (2592 - 1531)]} + \frac{(3600 - 2510) - (170 - 138)}{4,6[(1250 - 254) + (2592 - 1531)]} = 0,47.$$

7. Выводы

Как видно из приведенных выше расчетов, цикл биогазовой ПГУ с промежуточным перегревом пара и использованием высоконапорного парогенератора (рис. 7) является наиболее эффективным по эксергетическим показателям. Это объясняется тем, что традиционная парогазовая установка позволяет повысить КПД за счет использования температурного потенциала газов, уходящих из газовой турбины для генерации рабочего водяного пара в парогенераторе с

подачей его в паровую турбину для привода электрогенератора. Однако, доля тепловой энергии продуктов сгорания, приходящаяся на паровой цикл, примерно в 3 раза меньше доли тепловой энергии продуктов сгорания, приходящейся на газовый цикл. Тепловая схема биогазовой ПГУ (рис. 7) позволяет исправить этот недостаток за счет применения высоконапорного парогенератора, который реализует столько же тепловой энергии продуктов сгорания, сколько и парогенератор, стоящий на выходе из газовой турбины. Таким образом, доля тепловой энергии продуктов сгорания, потребляемая паровым циклом, удваивается. В результате перераспределения тепловой энергии продуктов сгорания между газовым и паровым циклами в пользу парового цикла, как более эффективного, КПД парогазовой установки увеличивается по сравнению с традиционной схемой на 6 %. При оптимальных параметрах по давлению и температуре для парогазового цикла (рис. 7 и табл. 3) КПД повышается на 10 %, что подтверждается расчетами для каждой схемы (рис. 5 – 7).

Литература

1. Кожевников, Н. Н. Экономика и управление энергетическими предприятиями [Текст] / Н. Н. Кожевников – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 432 с.
2. Закон України про енергозбереження: №74/94 від 1.07.1994 р. // Закони України. – Київ, 1997. – Т.7. – С. 281 – 291.
3. Мазуренко, А. С. Економічна ефективність парогазових установок на біопаливі [Текст] / А. С. Мазуренко, А. С. Денисова, Нго Минь Хіеу // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013 (32). – № 1. – С.15 – 19.
4. Блинова, Л. А. Биогазовые установки как альтернативный источник энергии в АПК [Текст] / Л. А. Блинова // Проблемы современной экономики: материалы II междунар. науч. конф. октябрь 2012 – Челябинск, 2012. – С. 41-44.
5. Денисова, А. Е. Оценка эффективности биогазовых электростанций [Текст] / А. Е. Денисова, Нго Минь Хіеу // Матеріали конференції «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації». Ч. 2 : НУК, 2013. – С. 251–256
6. Объединение «Альтернативная технология» представляет технологию и установки для производства биоудобрений и биогаза [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www/biogas.vn.ua> – Установки для получения биоудобрений и биогаза.
7. Климчук, О. А. Установка комбінованої системи альтернативного тепlopостачання навчального корпусу ОНПУ [Текст] / О. А. Климчук, Нго Минь Хіеу, А. С. Мазуренко, А. С. Денисова // Матеріали IV міжнародної конференції магістрів, аспірантів та науковців. – 2013. – Т. 2. – С. 92 – 94.
8. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа [Текст] / В. М. Бродянский – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
9. Денисова, А.Е., Нго Минь Хіеу. Эксергетические характеристики биогазовых энергоустановок [Текст] / А. С. Денисова, Нго Минь Хіеу // Тр. Одес. политехн. ун-та., 2013. – Вып.2 (41). – С. 151–156.
10. Арсеньев, Л. В. Стационарные газотурбинные установки [Текст] / Л. В. Арсеньев, В. Г. Тырышкин, И. А. Богов – Л.: Машиностроение, 1989. – 513 с.