



*Лобунец Ю.Н.*

**Лобунец Ю.Н.**

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

## **ТЭГ ТЕПЛООБМЕННОГО ТИПА ДЛЯ МИКРО-ТЭС**

---

*Рассмотрена возможность использования ТЭГ теплообменного типа в схемах микро-ТЭС. Очерчены перспективы применения подобных ТЭГ.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, микро-теплоэлектростанция, когенерация

*The possibilities of using TEG in micro-chp schemes. Prospects of use of such TEG.*

**Key words:** thermoelectric generator, micro-chp, cogeneration

### **Введение**

Общее производство теплоты и электроэнергии (когенерация) является одним из наиболее эффективных направлений энергосбережения, которое имеет чрезвычайно широкое поле внедрения. Это направление базируется на том, что все потребители тепловой энергии используют низкопотенциальные носители теплоты (горячая вода, насыщенный пар), в то время как в производстве таких теплоносителей используются высокопотенциальные источники энергии (продукты сгорания органических топлив). Использование части тепловой энергии в высокотемпературном диапазоне для генерации электроэнергии позволяет значительно повысить эффективность использования топлива и снизить себестоимость тепловой и электрической энергии. Когенерационные схемы прежде всего нашли применение в промышленности, где для этого существовали все предпосылки, а потом начали распространяться и на коммунальное хозяйство, которое является одним из самых больших потребителей органического топлива. В первую очередь это касается систем централизованного теплоснабжения, где существуют возможности надстройки водонагревательных котлов парогазовыми или газопоршневыми установками. Одновременно совершенствуются методы экономического стимулирования ресурсосберегающих технологий. Научно-технический прогресс в области использования возобновляемых источников энергии (ветровой, солнечной, геотермальной энергии, энергии биомассы) неотвратимо приводит к распространению и практической реализации концепции децентрализованного энергоснабжения, где наравне с мощными электроцентралями значительную роль играют маломощные распределенные источники электроэнергии, работающие на единую сеть. В наиболее развитых странах этот процесс поощряется специальными законодательными актами и системой ценообразования, обеспечивающими рентабельность таких источников энергии и соответствующий приток инвестиций в эту область, что также стимулирует разработку новых технологий и оборудования для микро-систем когенерации (по правилам, принятым в ЕС, к

микро-теплоэлектростанциям относят системы мощностью до 50 кВт). В качестве примера можно привести системы микро-ТЭС на базе бытовых газовых котлов, работающие с использованием циклов Дизеля [1], Стирлинга [2] и Ренкина [3]. Чрезвычайно широкий рынок для таких систем в странах ЕС, в США и Японии поддерживают законодательные акты, позволяющие поставлять генерированную мощность в электрическую сеть по тарифам, обеспечивающие окупаемость оборудования. Предварительный анализ технико-экономических показателей таких систем показывает, что и термоэлектрические генераторы могут найти свою нишу на этом рынке.

На рис. 1 приведена когенерационная схема газового котла, который работает с использованием органического цикла Ренкина (ОЦР) [3]. Высокотемпературные продукты сгорания газового топлива 1 поступают в парогенератор 2, где генерируется перегретый пар органического теплоносителя 3, который приводит в действие турбогенератор с рабочим колесом спирального типа 4. Далее пар поступает в конденсатор 5, где отдает теплоту теплоносителю системы отопления, и конденсируется. Конденсат возвращается в парогенератор, цикл замкнут. Обязательным условием для рассмотренной схемы является наличие бака-аккумулятора в системе отопления, что позволяет обеспечить более равномерный режим работы генератора.

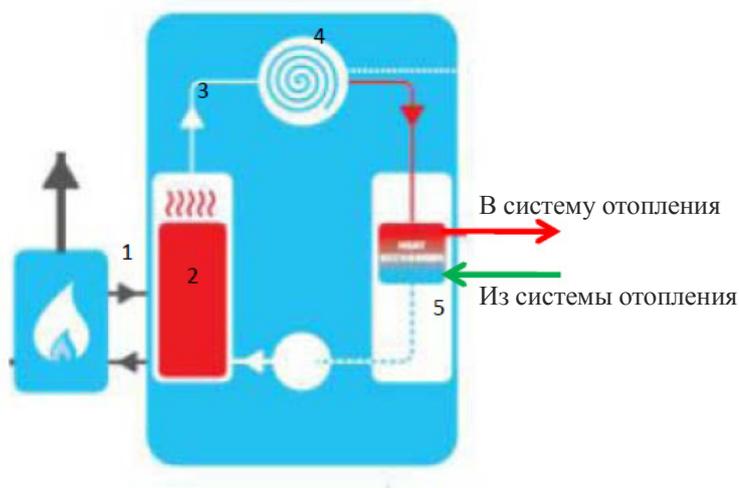


Рис. 1. Схема микро-ТЭС с ОЦР [3].

Такая микро-ТЭС производства компании Flow Energy [3], имеет следующие характеристики:

- тепловая мощность – 16.9 кВт;
- электрическая мощность – 1000 Вт;
- средняя производительность – 2000 кВт-часов/год;
- снабжение горячей воды в систему отопления – 0.217 кг/сек;
- максимальная температура воды – 82 °С;
- затраты газа – 1.8 м<sup>3</sup>/час;
- КПД тепловой – 92%;
- розничная стоимость – 3675£ (5700 \$US);
- тариф на электроэнергию 0.1345 £/ кВт – час (0.2 \$US/кВт-час) [4].

Как видно из приведенных выше данных, коэффициент преобразования тепловой энергии в электрическую для этой микро-ТЭС составляет около 6%, то есть характеристики

генерирующей части целиком коррелируются с уровнем характеристик современных ТЭГ. Ниже рассмотрена одна из возможных схем ТЭГ для микро-ТЭС и приведены результаты анализа ее технико-экономических характеристик.

### Схема ТЭГ для микро-ТЭС

Анализируемая схема микро-ТЭС/ТЭГ, показана на рис. 2. В отличие от рассмотренной выше, она нуждается в минимальной модификации бойлера и может быть адаптирована к любому газовому котлу путем изменения его температурного режима. Газовый котел 1 нагревает промежуточный теплоноситель до температуры  $t_{ho}$ , после чего тот поступает в горячие каналы ТЭГ теплообменного типа 2 [5]. Теплоноситель из бака-аккумулятора системы отопления 3 с температурой  $t_{xo}$  поступает в холодные каналы ТЭГ, где догревается до необходимой температуры  $t_{xe}$ , после чего возвращается в систему отопления. Часть энергии теплового потока, протекающего между теплоносителями, превращается в электрическую. В схеме также следует применить инвертор 4 для преобразования постоянного тока ТЭГ в переменный ток необходимых параметров.



Рис. 2. Схема микро-ТЭС/ТЭГ.

Рассмотрим условия, при которых такая микро-ТЭС/ТЭГ может конкурировать со схемой, основанной на использовании ОЦР. Очевидно, что главным требованием для этого является обеспечение технико-экономических характеристик, отвечающим приведенным выше и обеспечивающим приемлемые сроки окупаемости оборудования. Основные исходные данные для анализа микро-ТЭС/ТЭГ можно определить следующим образом:

- |                                       |                                |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| - электрическая мощность              | $N_o = 1000$ Вт;               |
| - тепловая мощность                   | $Q_o = 16.9$ кВт;              |
| - температура горячего теплоносителя  | $t_{ho} = 250$ °С;             |
| - температура воды на входе в ТЭГа    | $t_{xo} = 65$ °С;              |
| - максимальная удельная стоимость ТЭГ | $Price_{max} = 1200$ \$US/кВт; |

Температура горячего теплоносителя выбрана в связи с использованием в ТЭГ низкотемпературного термоэлектрического материала ( $Bi_2Te_3$ ). Максимальная удельная стоимость ТЭГ определена исходя из срока окупаемости в 3 года, с учетом тарифа на электроэнергию 0.2 \$US/кВт-час.

### Анализ характеристик микро-ТЭС/ТЭГ

Задача анализа состоит в определении в пространстве основных технико-экономических параметров ТЭГ таких их соотношений, которые обеспечивают решение задачи. С этой целью

воспользуемся математической моделью, приведенной в [6]. В рассматриваемых условиях решающее влияние на технико-экономические характеристики ТЭГ имеет соотношение термических сопротивлений, характеризующих процесс теплопереноса в системе нагревающий теплоноситель–термоэлемент–охлаждающий теплоноситель. В обобщенном виде они определяются значениями критериев Био на холодной ( $Bi_x$ ) и горячей ( $Bi_h$ ) стороне термобатареи

$$Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\alpha = 1/R_t$  – эффективный коэффициент теплообмена между поверхностью спаев и теплоносителем, который учитывает все термические сопротивления на пути теплового потока, сумма которых равна  $R_t = \frac{1}{\alpha_0} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i}$ ; Здесь  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи;  $h_i$  и  $\lambda_i$  толщина и коэффициент теплопроводности каждого из слоев на пути теплового потока (коммутационные элементы, теплопереход, корпус термобатареи, прослойки припоя и т.п.).

Поскольку составляющая  $\sum_i \frac{h_i}{\lambda_i}$  определяется преимущественно технологией производства термобатарей, к независимым параметрам нужно отнести только высоту термоэлементов  $h$  и коэффициенты теплоотдачи на холодной  $\alpha_x$  и горячей стороне  $\alpha_h$ . Рассмотрим более детально влияние этих параметров и ограничения, которые с ними связаны.

В [7] было показано, что для фиксированных условий теплообмена ( $\alpha_x = const$ ;  $\alpha_h = const$ ) максимум мощности реализуется при условии  $Bi = 1$ , то есть существует вполне определенная оптимальная высота термоэлемента  $h$ , обеспечивающая максимум мощности. В этом случае имеющийся перепад температур  $dt_o = [t_{ho} - t_{xo}]$  распределяется поровну между полезным перепадом ( $dt = T_h - T_x$ ) и потерями перепада ( $dt = [(t_{ho} - T_h) + (T_x - t_{xo})]$ ) на термических сопротивлениях  $R_t$ . Влияние высоты термоэлемента на эти параметры в безразмерных величинах иллюстрирует рис. 3.

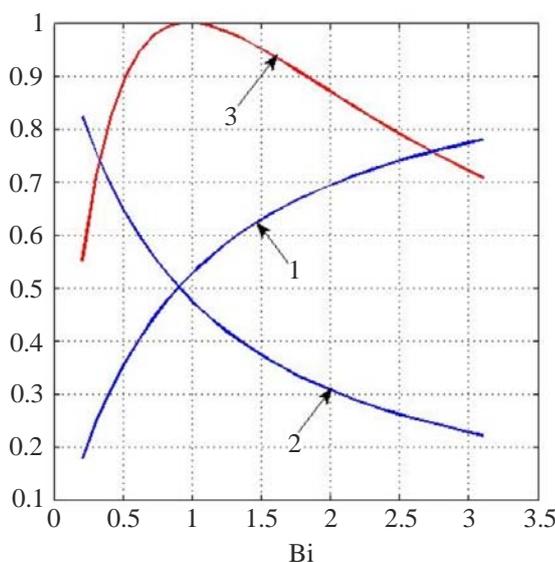


Рис. 3. Зависимости полезного перепада температур (1), потерь температурного напора (2) и мощности термоэлемента (3) от критерия Био.

В то же время абсолютное значение мощности существенно зависит от значения коэффициента теплоотдачи, и монотонно возрастает с ростом последнего (рис. 4).

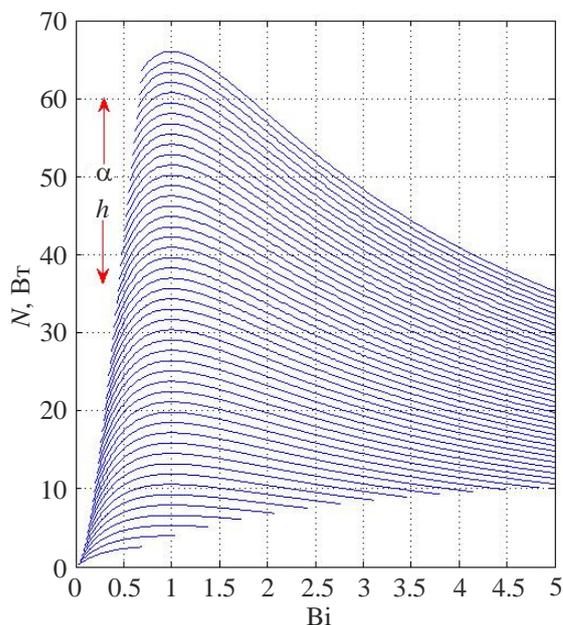


Рис. 4. Зависимость мощности  $N$  термоэлектрического модуля от  $Bi$  для различных сочетаний высоты термоэлементов  $h$  и интенсивности теплообмена  $\alpha$  (стрелками указано направление роста параметров).

Таким образом, оптимальное значение высоты термоэлементов для известной интенсивности теплообмена легко определяется из условия  $Bi = 1$  (рис. 5).

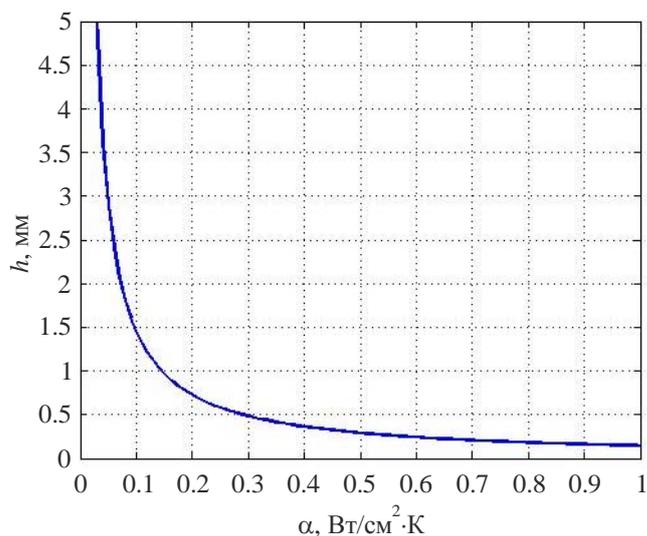


Рис. 5. Зависимость оптимальной высоты термоэлемента  $h$  от интенсивности теплообмена  $\alpha$ .

Зависимости мощности и КПД стандартного модуля  $50 \times 50$  мм от рассматриваемых параметров, приведены на рис. 6 и рис. 7. На рис. 8 приведен контурный график, дающий наглядное представление о соотношении мощности и КПД модуля, которые удовлетворяют одной из основных требований задачи –  $\text{КПД} > 6\%$  (соответствующее соотношение  $h$  и  $\alpha$ , обозначено стрелками).

Для наиболее распространенных технологий изготовления термоэлектрических модулей нижним пределом высоты термоэлементов можно считать  $h = 0.5$  мм. Как следует из рис. 8, для эффективного использования термоэлементов такой высоты необходимо обеспечить условие  $\alpha > 0.25$  ( $R_t = 1/\alpha < 4$ ). Учитывая то, что типичным значением коэффициента теплоотдачи для рассматриваемых условий является  $\alpha_0 \approx 1$  Вт/см<sup>2</sup>·К (то есть  $R_t \alpha \approx 1$ ), можно сформулировать конкретные требования к качеству теплопереходов термобатарей – их суммарное термическое сопротивление должно укладываться в значения  $\sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} < 3$ .

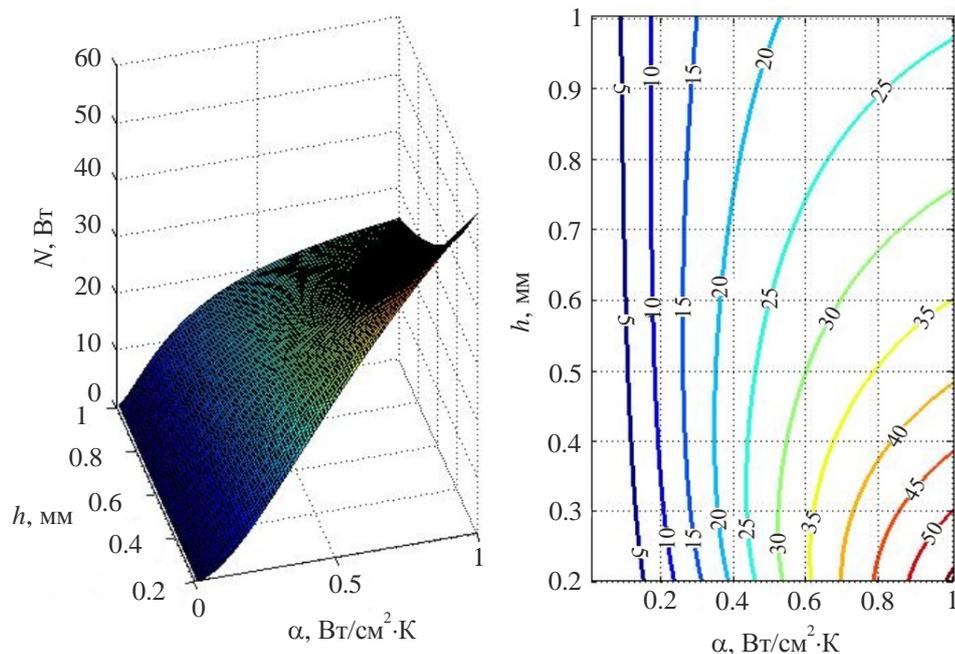


Рис. 6. Зависимость мощности модуля ТЭГ  $N$  от  $h$  и  $\alpha$ .

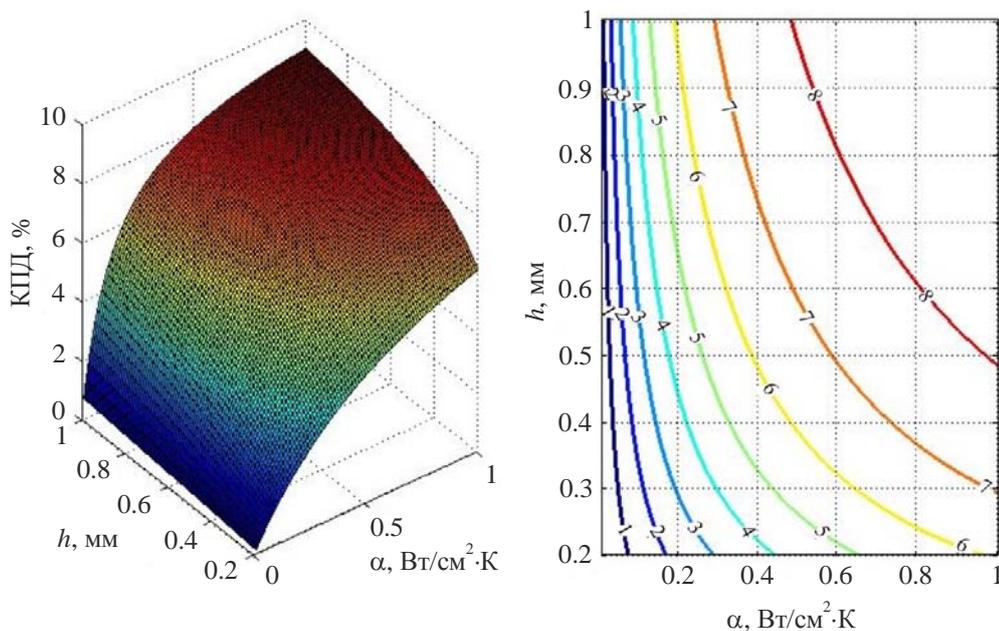


Рис. 7. Зависимость КПД модуля ТЭГ от  $h$  и  $\alpha$ .

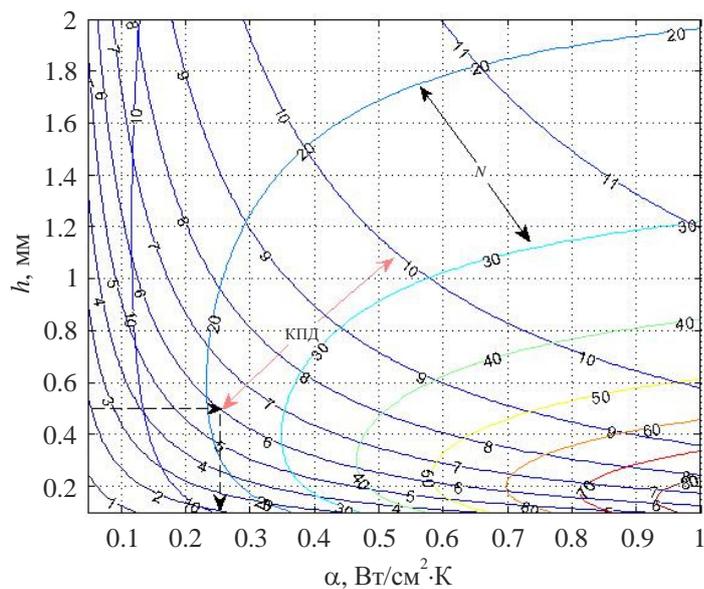


Рис. 8. Область доступных решений для модуля ТЭГ в пространстве  $h, \alpha$ .

На основе этих расчетов можно оценить удельную стоимость ТЭС/ТЭГ. С этой целью были использованы соотношения для оценки удельной стоимости термоэлектрического модуля в виде:

$$Price = (k_1 gm / k_2) / Nm, \text{ \$US/Bm}, \quad (2)$$

где  $Nm$  – мощность модуля, Вт;  $gm$  – масса термоэлектрического материала в модуле, г;  $k_1 = 0.4$  – стоимость термоэлектрического материала,  $\text{\$US/g}$ ;  $k_2 = 0.35$  – доля стоимости материала в общей стоимости модуля.

Коэффициенты  $k_1, k_2$  определены на основе анализа рыночной стоимости термоэлектрических модулей. Полученные результаты приведены на рис. 9.

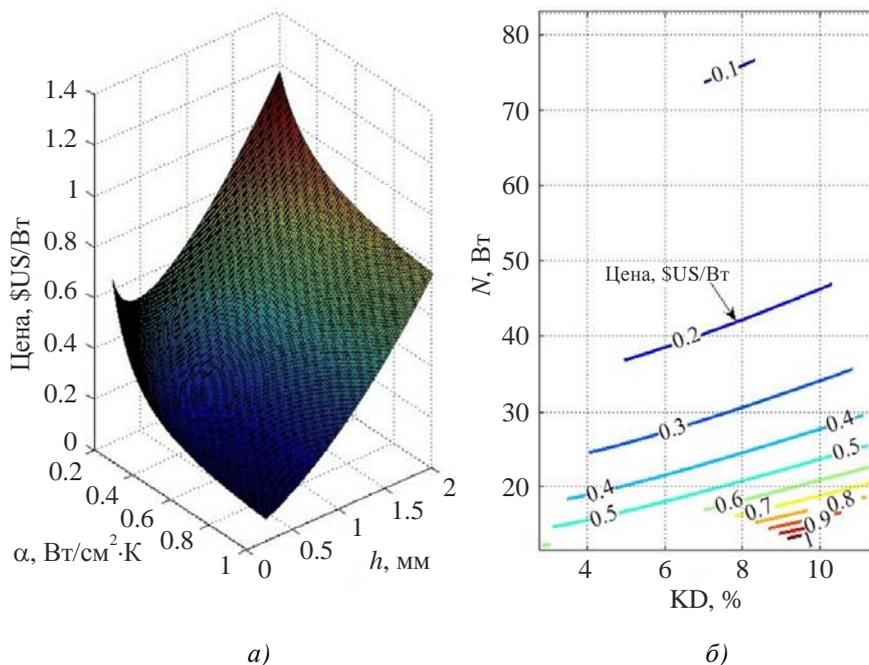


Рис. 9. Удельная стоимость модуля ТЭГ ( $\text{\$US/Bm}$ ) в области допустимых решений.

Исходя из рис. 6, б, реальная стоимость ТЭГ ( $0.3\$US/Bm$ ) соответствует интервалу мощности модуля стандарта  $50 \times 50 \times 0.5$  мм  $Nm = 25...30$  Вт, и КПД  $6...8\%$ . То есть электрическая мощность микро-ТЭС/ТЭГ заданной тепловой мощности  $Q_0 = 16.9$  кВт может достигать  $1.3$  кВт при общем количестве термоэлектрических модулей около  $50$  шт. и суммарной их стоимости около  $400 \$US$ , что вполне удовлетворяет условиям поставленной задачи (с учетом дополнительных затрат, а также стоимости инвертора и конструкции ТЭГ в целом цена генерирующей части микро-ТЭС / ТЭГ гарантированно вкладывается в сумму  $1200\$US$ ).

## Выводы

1. Рассмотрена схема микро-ТЭС/ТЭГ на базе газового котла и ТЭГ теплообменного типа;
2. Показано, что рассмотренная схема имеет вполне приемлемые технико-экономические показатели, которые могут обеспечить ее конкурентоспособность на рынке микро-ТЭС;
3. Сформулированы основные требования к параметрам ТЭГ, которые обеспечивают оптимальные технико-экономические показатели микро-ТЭС.

## Условные обозначения:

$h$  – высота термоэлемента, мм;

$T$  – температура термоэлемента;

$t$  – температура теплоносителя;

$T_p$  – определяющая температура;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/см·К;

$R_t$  – термическое сопротивление, см<sup>2</sup>·К/Вт;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/см<sup>2</sup>·К;

$Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}$  – критерий Био;

индексы:

$h$  – горячий;

$x$  – холодный.

## Литература

1. <http://world.honda.com/power/cogenerator/>
2. [http://viessmann.com.ua/sistemy-otoplenia-463/Kogeneracionnaia\\_ustanovka\\_VITOTWIN\\_300-W\\_Mikro-KWK\\_s\\_dvigatелеm\\_Stirlinga.html](http://viessmann.com.ua/sistemy-otoplenia-463/Kogeneracionnaia_ustanovka_VITOTWIN_300-W_Mikro-KWK_s_dvigatелеm_Stirlinga.html)
3. <http://www.flowenergy.uk.com/meet-flow/>
4. <https://www.ofgem.gov.uk/environmental-programmes/feed-tariff-fit-schttp/tariff-tables>
5. Лобунец Ю.М. Термоэлектрический генератор//Патент Украины №8357 от 27.08.2013 г.
6. Лобунец Ю.М. Анализ характеристик термоэлектрического генератора теплообменного типа// Термоэлектричество. – 2014, №1. – С. 54 – 61.
7. Лобунец Ю.М. ТЕГ теплообменного типа для судовых силовых установок// Термоэлектричество. – 2014, №5. – С. 31-37.

Поступила в редакцию 10.03.2015.