



Лобунець Ю.М.

## Лобунець Ю.М.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

### ТЕГ ТЕПЛООБМІННОГО ТИПУ ДЛЯ МІКРО-ТЕС

---

*Розглянуто можливості використання ТЕГ теплообмінного типу в схемах мікро-ТЕС. Окреслено перспективи застосування подібних ТЕГ.*

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, мікро-теплоелектростанція, когенерація

*The application potential of heat exchange-type TEG in micro-CHP (combined heat and power) schemes is discussed. The outlook for using such TEG is outlined.*

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

#### Вступ

Спільне виробництво теплоти та електроенергії (когенерація) – один з найбільш ефективних напрямів енергозбереження, що має надзвичайно широке поле впровадження. Цей напрям базується на тому, що всі споживачі теплової енергії використовують низькопотенціальні носії теплоти (гаряча вода, насичена пара), в той час як у виробництві таких теплоносіїв використовуються високопотенціальні джерела енергії (продукти згоряння органічних палив). Використання частини теплової енергії у високотемпературному діапазоні для генерації електроенергії дає можливість значно підвищити ефективність використання палива та знизити собівартість теплової та електричної енергії. Когенераційні схеми насамперед знайшли застосування в промисловості, де для цього були наявні усі передумови, а потім почали поширюватись й на комунальне господарство, яке є одним з найбільших споживачів органічного палива. В першу чергу це стосується систем централізованого теплопостачання, де наявні можливості надбудови водогрійних котлів парогазовими або газопоршневими установками. Одночасно удосконалюються методи економічного стимулювання ресурсозберігаючих технологій. Науково-технічний прогрес у галузі використання відновлюваних джерел енергії (вітрової, сонячної, геотермальної енергії, енергії біомаси) невідворотно призводить до поширення й практичної реалізації концепції децентралізованого енергопостачання, де нарівні з потужними електроцентралями значну роль відіграють малопотужні розподілені джерела електроенергії, які працюють на єдину мережу. В найбільш розвинутих країнах цей процес заохочується спеціальними законодавчими актами й системою ціноутворення, які забезпечують рентабельність таких джерел енергії й відповідний приплив інвестицій в цю галузь, що також стимулює розробку нових технологій та обладнання для мікросистем когенерації (за правилами, прийнятими в ЄС, до мікротеплоелектростанцій

відносять системи потужністю до 50 кВт). Як приклад, можна навести системи мікро-ТЕС на базі побутових газових котлів, які працюють з використанням циклів Дизеля [1], Стірлінга [2] та Ренкіна [3]. Надзвичайно широкий ринок для таких систем у країнах ЄС, в США та Японії підтримують законодавчі акти, які дають можливість поставляти генеровану потужність в електричну мережу за тарифами, що забезпечують окупність обладнання. Попередній аналіз техніко-економічних показників таких систем робить можливим передбачати, що й термоелектричні генератори можуть знайти свою нішу на цьому ринку.

На рис.1 наведено когенераційну схему газового котла, що працює з використанням органічного циклу Ренкіна (OCR), [3]. Високотемпературні продукти згоряння газового палива 1 надходять у парогенератор 2, де генерується перегріта пара органічного теплоносія 3, який приводить в дію турбогенератор з робочим колесом спірального типу 4. Далі пара надходить у конденсатор 5, де віддає теплоту теплоносію системи опалення, й конденсується. Конденсат повертається в парогенератор, цикл замкнуто. Обовязкова умова для розглянутої схеми – наявність бака-акумулятора в системі опалення, дає можливість забезпечити більш рівномірний режим роботи генератора.

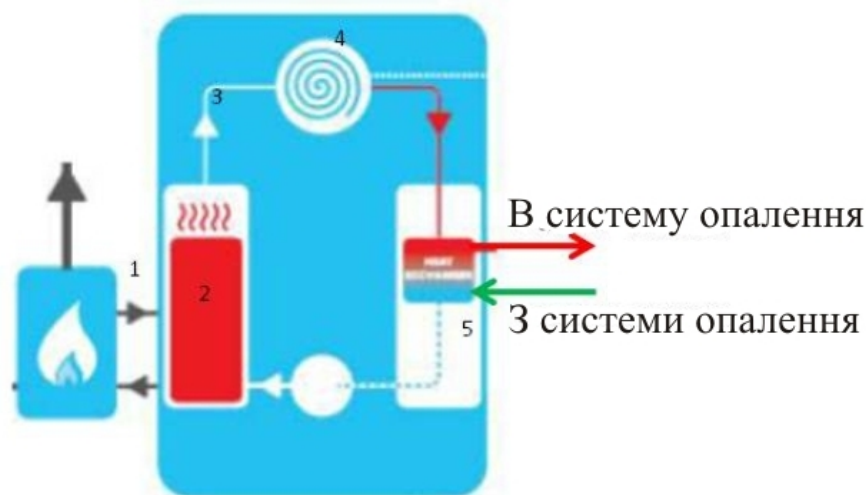


Рис.1. Схема мікро-ТЕС з OCR, [3].

Така мікро-ТЕС виробництва компанії Flow Energy, [3], має такі характеристики:

- теплова потужність – 16.9 кВт;
- електрична потужність – 1000 Вт;
- середня продуктивність – 2000 кВт-годин/рік;
- постачання гарячої води в систему опалення – 0.217 кг/сек;
- максимальна температура води - 82°C;
- витрати газу – 1.8 м<sup>3</sup>/годину;
- ККД тепловий – 92%;
- роздрібна вартість - 3675£ (5700\$US);
- тариф на електроенергію 0.1345 £/кВт-годину (0.2\$US/кВт-годину), [4].

Як впливає з наведених вище даних, коефіцієнт перетворення теплової енергії в електричну для цієї мікро-ТЕС становить близько 6%, тобто характеристики генеруючої частини цілком корелюються з рівнем характеристик сучасних ТЕГ. Нижче розглянуто одну з можливих схем ТЕГ для мікро - ТЕС та наведено результати аналізу її техніко-економічних характеристик.

### Схема ТЕГ для мікро-ТЕС

Схему мікро - ТЕС/ТЕГ, що аналізується, наведено на рис. 2. На відміну від розглянутої вище вона потребує мінімальної модифікації бойлера й може бути адаптована до будь-якого газового котла шляхом зміни його температурного режиму. Газовий котел 1 нагріває проміжний теплоносіє до температури  $t_{ho}$ , після чого той надходить в гарячі канали ТЕГ теплообмінного типу 2, [5]. Теплоносіє з бака-акумулятора системи опалення 3 з температурою  $t_{xo}$  надходить в холодні канали ТЕГ, де догрівається до необхідної температури  $t_{xe}$ , після чого повертається в систему опалення. Частина теплового потоку, що протікає між теплоносіями, перетворюється на електроенергію. В схемі також необхідно застосувати інвертор 4 для перетворення постійного струму ТЕГ у змінний струм необхідних параметрів.



Рис. 2. Схема мікро-ТЕС/ТЕГ.

Розглянемо умови, за яких така мікро-ТЕС/ТЕГ може конкурувати зі схемою, заснованою на використанні ОЦР. Очевидно, що головною вимогою для цього є забезпечення техніко-економічних характеристик, що відповідають наведеним вище й забезпечують прийнятні строки окупності обладнання. Основні вихідні дані для аналізу мікро-ТЕС/ТЕГ можна визначити таким чином:

- електрична потужність  $N_o = 1000$  Вт;
- теплова потужність  $Q_o = 16,9$  кВт;
- температура гарячого теплоносія  $t_{ho} = 250^\circ\text{C}$ ;
- температура води на вході в ТЕГ  $t_{xo} = 65^\circ\text{C}$ ;
- максимальна питома вартість ТЕГ  $Price_{max} = 1200$  \$US/кВт.

Температуру гарячого теплоносія обрали виходячи з використання в ТЕГ низькотемпературного термоелектричного матеріалу ( $Bi_2Te_3$ ). Максимальну питому вартість ТЕГ визначили, виходячи зі строку окупності в 3 роки, з врахуванням тарифу на електроенергію 0.2\$US/кВт-годину.

### Аналіз характеристик мікро-ТЕС/ТЕГ

Завдання аналізу полягає у визначенні в просторі основних техніко-економічних параметрів ТЕГ таких їх співвідношень, які забезпечують вирішення задачі. З цією метою скористаємось математичною моделлю, наведеною в [6]. В умовах, що розглядаються, вирішальний вплив на техніко-економічні характеристики ТЕГ вносить співвідношення

термічних опорів, які характеризують процес теплопереносу в системі нагриваючий теплоносій – термоелемент – охолоджуючий теплоносій. В узагальненому вигляді вони визначаються значеннями критеріїв Біо на холодній ( $Bi_x$ ) та гарячій ( $Bi_h$ ) сторонах термобатарей

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

де  $\alpha = \frac{1}{R_i}$  – ефективний коефіцієнт теплообміну між поверхнею спаїв та теплоносієм, що

враховує всі термічні опори на шляху теплового потоку, сума яких дорівнює  $Rt = \frac{1}{\alpha_0}$ . Тут  $\alpha_0$  –

коефіцієнт тепловіддачі;  $h_i$  та  $\lambda_i$  товщина та коефіцієнт теплопровідності кожного з шарів на шляху теплового потоку (комутаційні елементи, теплоперехід, корпус термобатарей, прошарки припою і т.п.).

Оскільки складова  $\sum i = \frac{h_i}{\lambda_i}$  визначається переважно технологією виробництва

термобатарей, до незалежних параметрів слід віднести тільки висоту термоелементів  $h$  та коефіцієнти тепловіддачі на холодній  $\alpha_x$  та гарячій стороні  $\alpha_h$ . Розглянемо більш детально вплив цих параметрів та обмеження, які з ними пов'язані.

У [7] було показано, що для фіксованих умов теплообміну ( $\alpha_x = \text{const}$ ;  $\alpha_h = \text{const}$ ) максимум потужності реалізується за умови  $Bi = 1$ , тобто наявна цілком визначена оптимальна висота термоелемента  $h$ , яка забезпечує максимум потужності. В цьому разі наявний перепад температур  $dt_o = [t_{ho} - t_{xo}]$  розподіляється порівну між корисним перепадом ( $dT = T_h - T_x$ ) і втратами перепаду ( $dt = [(t_{ho} - T_h) + (T_x - t_{xo})]$ ) на термічних опорах  $R_i$ . Вплив висоти термоелемента на ці параметри в безрозмірному вигляді ілюструє рис. 3.

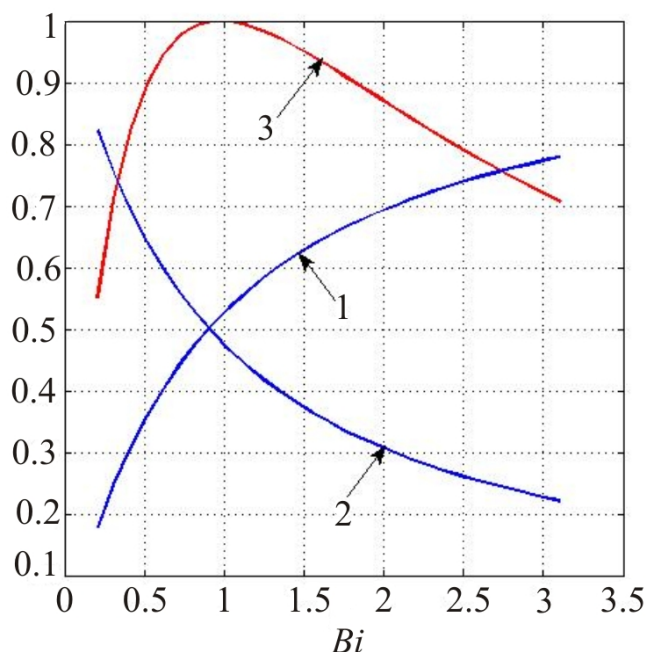


Рис. 3. Залежності корисного перепаду температур (1), втрат температурного напору(2) та потужності термоелемента(3) від критерія Біо.

У той же час абсолютне значення потужності суттєво залежить від значення коефіцієнта тепловіддачі й монотонно зростає зі зростом останнього (рис. 4).

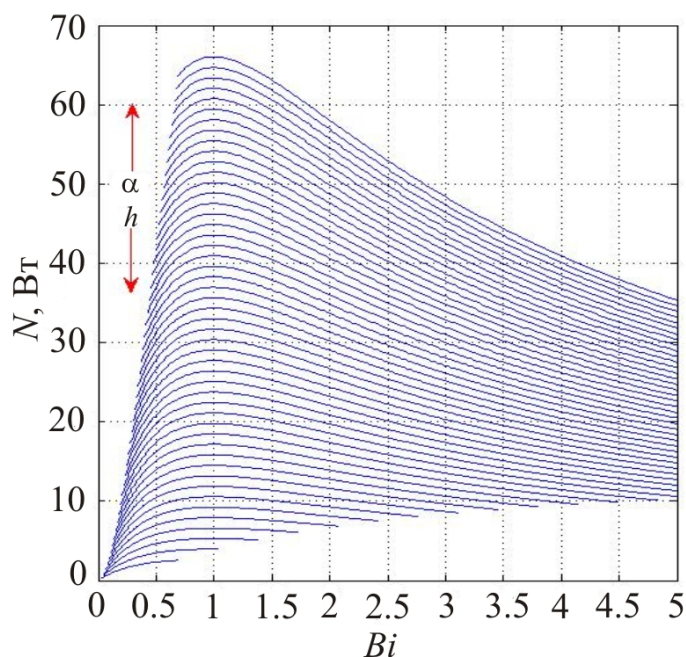


Рис. 4. Залежність потужності термоелектричного модуля від  $Bi$  для різних сполучень висоти термоелементів  $h$  та інтенсивності теплообміну  $\alpha$  (стрілками зазначено напрямок зростання параметрів).

Таким чином, оптимальне значення висоти термоелементів для відомої інтенсивності теплообміну легко визначається з умови  $Bi = 1$ , рис. 5.

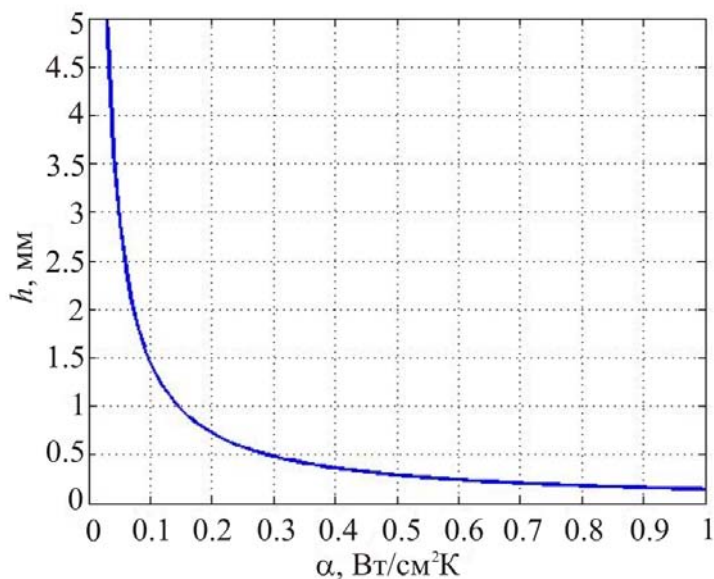


Рис. 5. Залежність оптимальної висоти термоелемента  $h$  від інтенсивності теплообміну  $\alpha$ .

Залежності потужності та ККД стандартного модуля  $50 \times 50$  мм від параметрів, що розглядаються, наведено на рис. 6 та рис. 7. На рис. 8 наведено контурний графік, який дає



наочне уявлення про співвідношення потужності та ККД модуля, які задовольняють одній з основних вимог задачі –  $\text{ККД} > 6\%$  (відповідне співвідношення  $h$  та  $\alpha$  позначено стрілками).

Для найбільш поширених технологій виготовлення термоелектричних модулів нижньою межею висоти термоелементів можна вважати  $h=0.5$  мм. Як випливає з рис. 8, для ефективного використання термоелементів такої висоти необхідно забезпечити умову  $\alpha > 0.25$  ( $Rt=1/\alpha < 4$ ). Зважаючи на те, що типовим значенням коефіцієнта тепловіддичі для умов, що розглядаються, є  $\alpha_0 \approx 1$  Вт/см<sup>2</sup>К (тобто  $R_{\alpha} \approx 1$ ), можна сформулювати конкретні вимоги до якості теплопереходів термобатарей – їх сумарний термічний опір має вкладатися у значення  $\sum i = \frac{h_i}{\lambda_i} < 3$ .

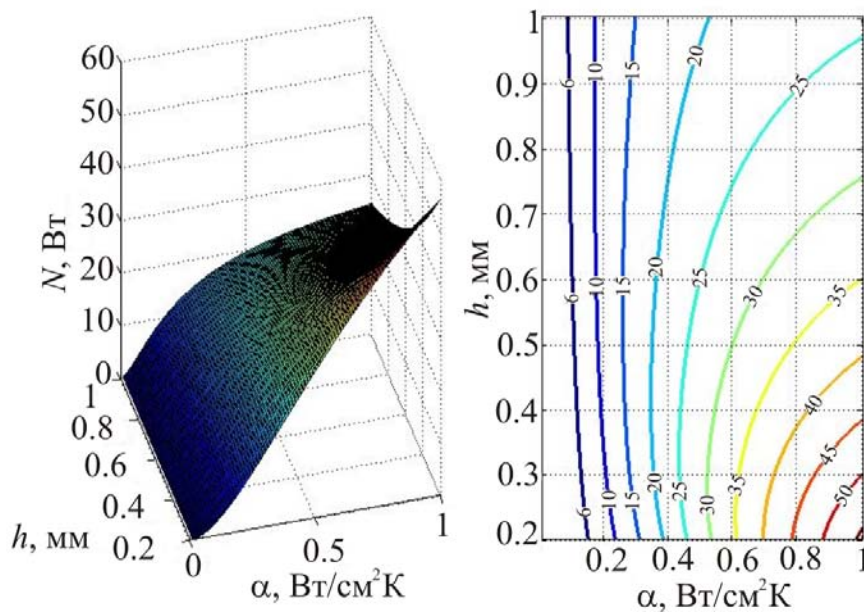


Рис. 6. Залежність потужності модуля ТЕГ  $N$  від  $h$  та  $\alpha$ .

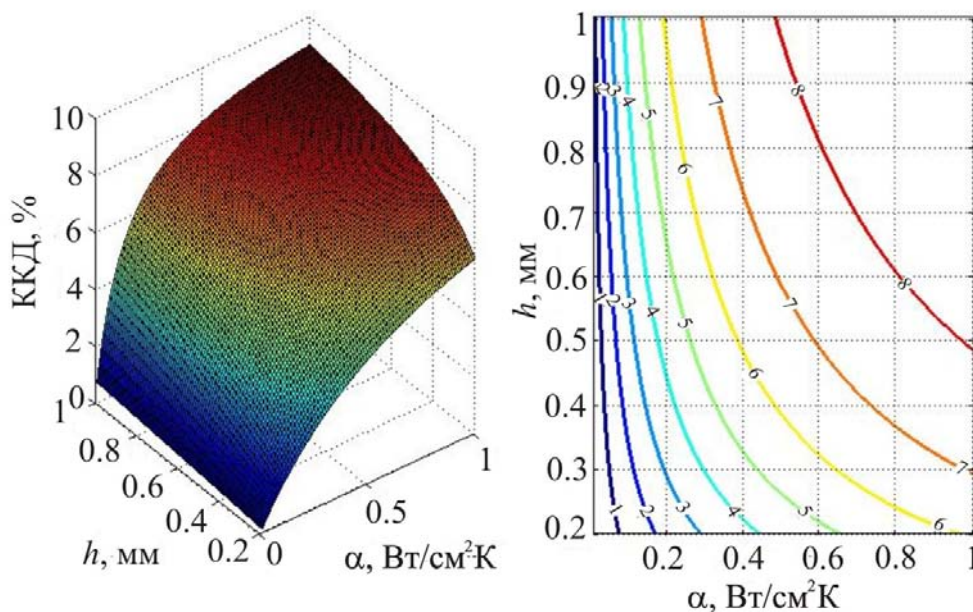


Рис. 7. Залежність ККД модуля ТЕГ від  $h$  та  $\alpha$ .

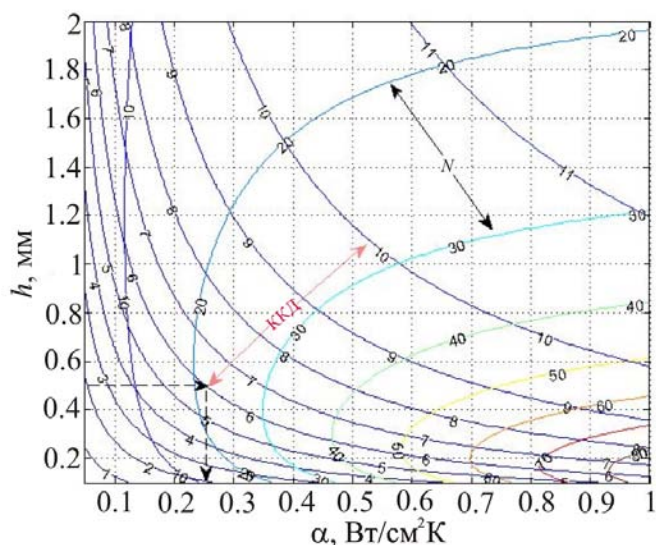


Рис. 8. Область доступних рішень для модуля ТЕГ у просторі  $h, \alpha$ .

На основі цих розрахунків можна зробити оцінку питомої вартості ТЕС/ТЕГ. З цією метою було використано співвідношення для оцінки питомої вартості термоелектричного модуля у вигляді

$$\text{Price} = (k_1 g_m / k_2) / N_m, \text{ \$US / Вт} \quad (2)$$

де  $N_m$  – потужність модуля, Вт;

$g_m$  – маса термоелектричного матеріалу в модулі, г;

$k_1 = 0.4$  – вартість термоелектричного матеріалу, \$US/г;

$k_2 = 0.35$  – доля вартості матеріалу у загальній вартості модуля.

Коефіцієнти  $k_1, k_2$  визначено на основі аналізу ринкової вартості термоелектричних модулів. Одержані результати наведено на рис.9.

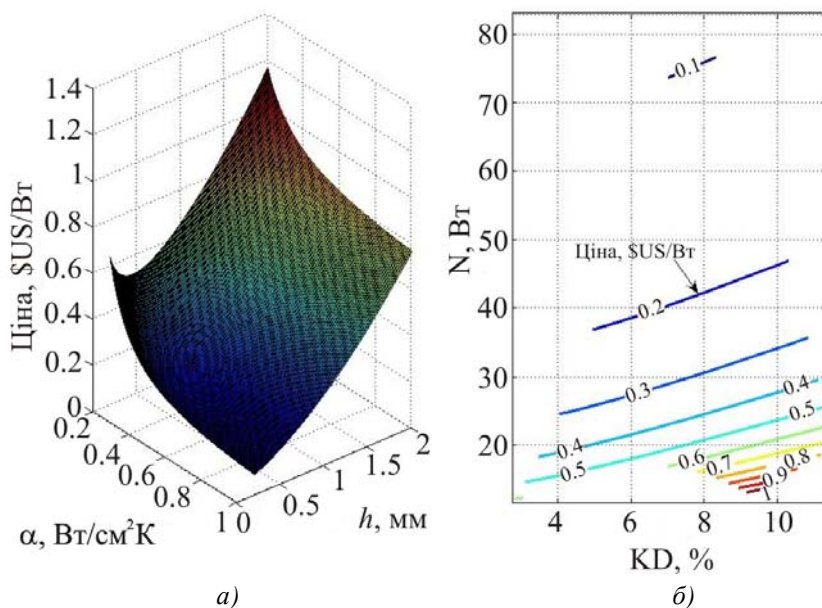


Рис. 9. Питома вартість модуля ТЕГ (\$US/Вт) в області допустимих рішень.

Як впливає з рис. 9 б, реальна вартість ТЕГ (0.3\$US/Вт) відповідає інтервалу потужності модуля стандарту 50×50×0.5 мм  $N_m = 25...30$  Вт, й ККД 6...8%. Тобто електрична потужність мікро – ТЕС/ТЕГ заданої теплової потужності  $Q_o = 16.9$  кВт може досягати 1.3 кВт при загальній кількості термоелектричних модулів близько 50 шт та сумарній їх вартості майже 400 \$US, що цілком задовольняє умовам поставленої задачі (з урахуванням додаткових витрат, а також вартості інвертора та конструкції ТЕГ в цілому ціна генеруючої частини мікро-ТЕС/ТЕГ гарантовано вкладається в суму 1200\$US).

## Висновки

1. Розглянуто схему мікро-ТЕС/ТЕГ на базі газового котла та ТЕГ теплообмінного типу.
2. Показано, що розглянута схема має цілком прийнятні техніко-економічні показники, які можуть забезпечити її конкурентоздатність на ринку мікро-ТЕС.
3. Сформульовано основні вимоги до параметрів ТЕГ, що забезпечують оптимальні техніко-економічні показники мікро-ТЕС.

## Умовні позначення:

$h$  – висота термоелемента, мм;  $T$  – температура термоелемента;  $t$  – температура теплоносія;  $T_p$  – визначальна температура;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/смК;  $R_t$  – термічний опір, см<sup>2</sup>К/Вт;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/см<sup>2</sup>К;  $Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}$  – критерій Біо.

Індекси:  $h$  – гарячий;  $x$  – холодний.

## Література

1. <http://world.honda.com/power/cogenerator/>
2. [http://viessmann.com.ua/sistemy-otoplenia-463/Kogeneracionnaia\\_ustanovka\\_VITOTWIN\\_300-W\\_Mikro-KWK\\_s\\_dvigatelem\\_Stirlinga.html](http://viessmann.com.ua/sistemy-otoplenia-463/Kogeneracionnaia_ustanovka_VITOTWIN_300-W_Mikro-KWK_s_dvigatelem_Stirlinga.html)
3. <http://www.flowenergy.uk.com/meet-flow/>
4. <https://www.ofgem.gov.uk/environmental-programmes/feed-tariff-fit-scheme/tariff-tables>
5. Лобунець Ю.М. Термоелектричний генератор // Патент України №8357 від 27.08.2013р.
6. Лобунець Ю.М. Аналіз характеристик термоелектричного генератора теплообмінного типу / Ю.М. Лобунець // Термоелектрика.- 2014. – №1.– С.54 – 61.
7. Лобунець Ю.М. ТЕГ теплообмінного типу для суднових силових установок / Ю.М. Лобунець // Термоелектрика. – 2014. – №. 5. – С.31-38.

Надійшла до редакції 10.03.2015