

Л.І. Анатичук, В.Я. Михайловський, О.В. Чайковська

Напівпровідниковий термоелектричний генератор для автономних систем

*Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
58002, м. Чернівці, Головноїшта, а/с 86, E-mail: anatyvch@inst.cv.ua*

Представлено результати досліджень термоелектричного генератора для живлення електронних та електромагнітних пристроїв систем автоматики газових нагрівачів. Запропонована фізична модель генератора, наведено результати розрахунку та оптимізації основних параметрів двох варіантів термогенераторів.

Ключові слова: термоелектричний генератор, фізична модель, автономна система, теплообмінник.

Стаття постуила до редакції 23.07.2007; прийнята до друку 15.12.2007.

Вступ

Ефективна робота сучасних нагрівальних приладів, наприклад бойлерів, котлів суттєво залежить від складу горючої суміші. Він повинен бути оптимальним. Саме тому ці прилади оснащуються електричними вентиляторами для примусової подачі повітря в камеру згоряння. Примусовою є також циркуляція рідкого теплоносія у контурі нагрівальної системи. Окрім цього сучасні нагрівачі оснащуються і рядом інших допоміжних пристроїв, наприклад електрохімічними датчиками повноти згоряння палива, засобами контролю та автоматичного регулювання температури вихідних газів, рідкого теплоносія і т. ін.

Однак у випадку відсутності централізованого електропостачання або припиненні подачі енергії функціонування таких нагрівників стає неможливим або проблемним. Використання для живлення пристроїв нагрівальних систем традиційних автономних джерел електричної енергії, наприклад акумуляторів, електрогенераторів з тепловими двигунами має ряд суттєвих недоліків: необхідність частого зарядки акумуляторів, високий рівень шуму теплових двигунів, додаткова витрата палива і т. ін.

Одним з ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є використання для живлення автоматичних пристроїв таких систем термоелектричних генераторів (ТЕГ) [1, 2]. Вони довговічні, надійні, безшумні, не мають рухомих частин [3], їх використання забезпечує незалежність роботи нагрівачів від централізованої електромережі. Для підвищення ефективності таких термогенераторів і подальшого розвитку

термоелектричної енергетики важливим є розробка нових теплових схем та реалізація нових фізичних моделей генераторів з врахуванням їх функціонального призначення і раціональних конструктивних рішень.

Метою даної роботи є моделювання термогенератора, оптимізація геометричних параметрів його теплообмінних систем та максимізація енергетичних характеристик.

I. Результати дослідження

1. Фізична модель термоелектричного генератора

Вибір фізичної моделі проведено за умови розв'язання конкретної практичної задачі з врахуванням компонентів, сукупність яких дозволяє отримати найбільшу ефективність термогенератора.

На рис. 1 представлено фізичні моделі та напрямки теплових потоків для двох варіантів термогенераторів на газовому паливі. Кожен варіант має окреме джерело тепла: інжекційний паливник часткового змішування палива і повітря, який розташований у нижній частині ТЕГ. Варіант а – односторонній ТЕГ, у якому всі термоелектричні модулі розташовані в одній площині. Варіант б складається з двох однакових частин, які розташовані симетрично відносно джерела тепла.

Підведення тепла до термоелектричних модулів здійснюється шляхом вільної конвекції гарячих продуктів згоряння палива, відведення – рідким теплоносієм, що циркулює у системі опалення.

Необхідність забезпечення надходження відповідних теплових потоків до гарячої сторони

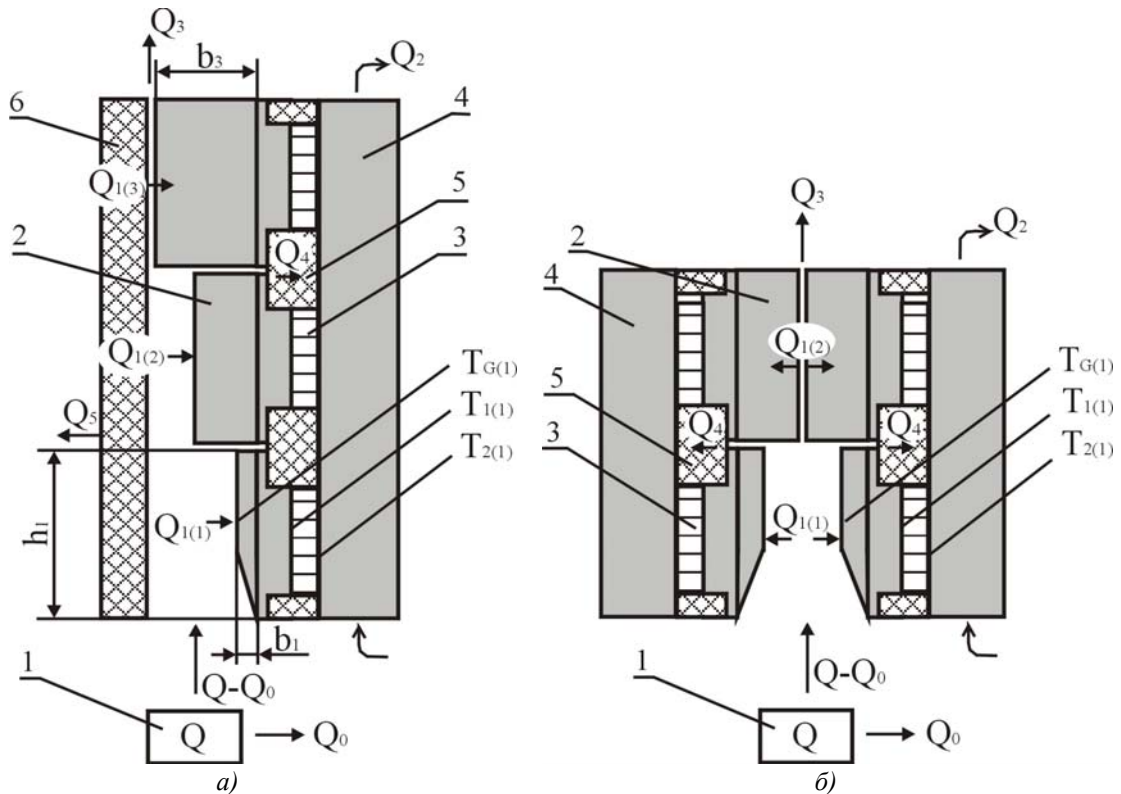


Рис. 1. Фізичні моделі термогенераторів на газовому паливі: а) односторонній; б) двохсторонній варіант ТЕГ. 1 – джерело тепла; 2 – гарячий теплообмінник (радіатор); 3 – ТЕБ; 4 – холодний теплообмінник; 5, 6 – теплоізоляція; Q – загальна теплова потужність джерела тепла; Q₀ – тепло, яке втрачається на елементах джерела тепла; Q₁ – корисне тепло, що надходить до ТЕБ; Q₂ – тепло, яке відводиться від холодної сторони ТЕБ; Q₃ – тепло, яке відводиться в оточуюче середовище з продуктами реакції горіння; Q₄ – тепло, яке втрачається на елементах конструкції гарячого радіатора; Q₅ – тепло, яке втрачається через ізоляцію (у випадку одностороннього термоелектричного генератора).

термогенераторів за умови зниження температури гарячих газів по висоті ТЕГ зумовлює використання в системі підведення тепла декількох секцій конвективних теплообмінників з різною по величині поверхнею теплообміну (ребра, розташовані на внутрішній поверхні гарячого теплообмінника, утворюють вертикальні канали, які омиваються гарячими продуктами згоряння).

Дослідження ефективності та вибір конструкції гарячого теплообмінника проведено з врахуванням теплообміну між гарячими газами та теплоприймальною поверхнею гарячого теплообмінника і визначених величин теплових потоків, які необхідно підвести до гарячих сторін ТЕБ. Для проведення комп'ютерного розрахунку використано пакет прикладних програм Mathcad 11.

Тепловий потік, що надходить від гарячих газів до гарячого радіатора секційного ТЕГ конвективним шляхом і випромінюванням (температура теплоприймальної поверхні гарячого радіатора прийнята рівною температурі гарячої сторони ТЕБ T₁ та температурі продуктів згоряння на виході з гарячого радіатора) визначено за виразом [4, 5]:

$$Q_{\Gamma} = \lambda_{\epsilon} \cdot (T_G - T_1) \cdot S + \epsilon \cdot \sigma_0 \times \times (\epsilon_{\Gamma\infty}(T_G) \cdot (T_G)^4 - \epsilon_{\Gamma\infty}(T_1) \cdot (T_1)^4) \cdot S, \quad (1)$$

де λ_{ϵ} – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності

газової суміші; T_G – середня температура газів в гарячому радіаторі; σ_0 – стала Стефана-Больцмана; S – площа теплоприймальної поверхні гарячого радіатора; ϵ – приведений ступінь чорноти гарячого радіатора [5]:

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{\epsilon_{\Gamma\infty}(T_G)}{\epsilon_{\Gamma}(T_G)} - 1}, \quad (2)$$

де ϵ_c – ступінь чорноти матеріалу гарячого радіатора; $\epsilon_{\Gamma\infty}(T_G)$ – коефіцієнт теплового випромінювання газового об'єму при безкінечній довжині променя та температурі T_G; $\epsilon_{\Gamma\infty}(T_1)$ – при температурі T₁ [5]; $\epsilon_{\Gamma}(T_G)$ – коефіцієнт теплового випромінювання газового об'єму всередині гарячого радіатора (знайдено за номограмами [5, 6]).

Середня температура газів в гарячому радіаторі:

$$T_G = (T_g + T_1)/2, \quad (3)$$

де T_g – температура газів на вході в гарячий радіатор; T₁ – температура продуктів згоряння на виході з гарячого радіатора.

T_g розраховано наступним чином. Тепловий потік, який надходить до гарячого радіатора:

$$Q - Q_0 = Q_{CO_2} + Q_{H_2O} + Q_{N_2}, \quad (4)$$

або

$$Q - Q_0 = \left([c_{p2}(T_g - 100) + \lambda' + c_{p3}(100 - T_0)] \cdot m_2 + (m_1 \cdot c_{p1} + m_0 \cdot c_{p0} - m_4 \cdot c_{p4})(T_g - T_0) \right) \cdot g_T \quad (5)$$

звідки, враховуючи загальну теплову потужність

джерела тепла

$$Q = g_T \cdot G, \quad (6)$$

отримано

$$T_g = \frac{G - Q_0 / g_T + T_0 \cdot (m_1 \cdot c_{p1} + m_0 \cdot c_{p0} - m_4 \cdot c_{p4}) - m_3 \cdot [\lambda' + c_{p3} \cdot (100 - T_0)]}{m_1 \cdot c_{p1} + m_0 \cdot c_{p0} - m_4 \cdot c_{p4} + m_2 \cdot c_{p2}} \quad (7)$$

де $c_{p0}, c_{p1}, c_{p2}, c_{p3}, c_{p4}$ – теплоємності повітря, CO_2 , водяної пари, води і кисню; λ' – питома теплота пароутворення води; T_0 – температура оточуючого середовища; g_T – витрата палива; G – теплота згоряння палива; Q_0 – тепло, яке втрачається на елементах джерела тепла (для використаного типу джерела тепла експериментально знайдено $Q_0 \approx 3\%$); m_0, m_1, m_2, m_3, m_4 – масові коефіцієнти повітря, CO_2 , водяної пари, води і кисню для даного виду палива.

За умови вільного руху газової суміші в вузьких каналах [7] середня густина теплового потоку знайдена за формулами теплопровідності (1), де коефіцієнт теплопровідності газового середовища замінюється еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності, який враховує перенесення тепла як шляхом теплопровідності, так і конвекції:

$$\lambda_e = \frac{\text{Nu}_{cp} \cdot \lambda}{d_e}, \quad (8)$$

де λ – теплопровідність газової суміші при середній температурі її пограничного шару в гарячому радіаторі $T_{cp} = (T_G + T_1)/2$; Nu_{cp} – коефіцієнт конвекції; d_e – еквівалентний діаметр каналу, утвореного сусідніми ребрами радіатора $d_e = 4 \cdot f/p$; f – площа поперечного перерізу каналу гарячого радіатора; p – периметр каналу.

За визначальну температуру для розрахунку

коефіцієнта конвекції прийнято T_{cp} . Якщо $\text{Gr} \cdot \text{Pr} > 10^3$ коефіцієнт конвекції визначається за емпірично знайденою формулою [8]:

$$\text{Nu}_{cp} = 0,65 \cdot \left(\text{Gr} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{d_e}{2h'} \right)_{cp}^{0,25}, \quad (9)$$

де h' – висота каналу гарячого радіатора. За умови $\text{Gr} \cdot \text{Pr} \leq 10^3$ передача тепла від газової суміші до стінок каналів гарячого радіатора здійснюється тільки теплопровідністю, тобто коефіцієнт конвекції приймається рівним 1.

Числа Грасгофа, Прандтля знайдено з врахуванням залежності фізичних властивостей газової суміші (кінематичної, динамічної в'язкості, питомої теплоємності, теплопровідності) від T_{cp} [9-11].

2. Термоелектричний перетворювач

Термоелектричний перетворювач складається з ряду термоелектричних модулів, які при надходженні необхідної кількості тепла до гарячої сторони і досягненні оптимальних робочих температур повинні забезпечити генерування необхідної електричної потужності у всьому діапазоні зміни температури теплоносія та теплової потужності опалювального приладу.

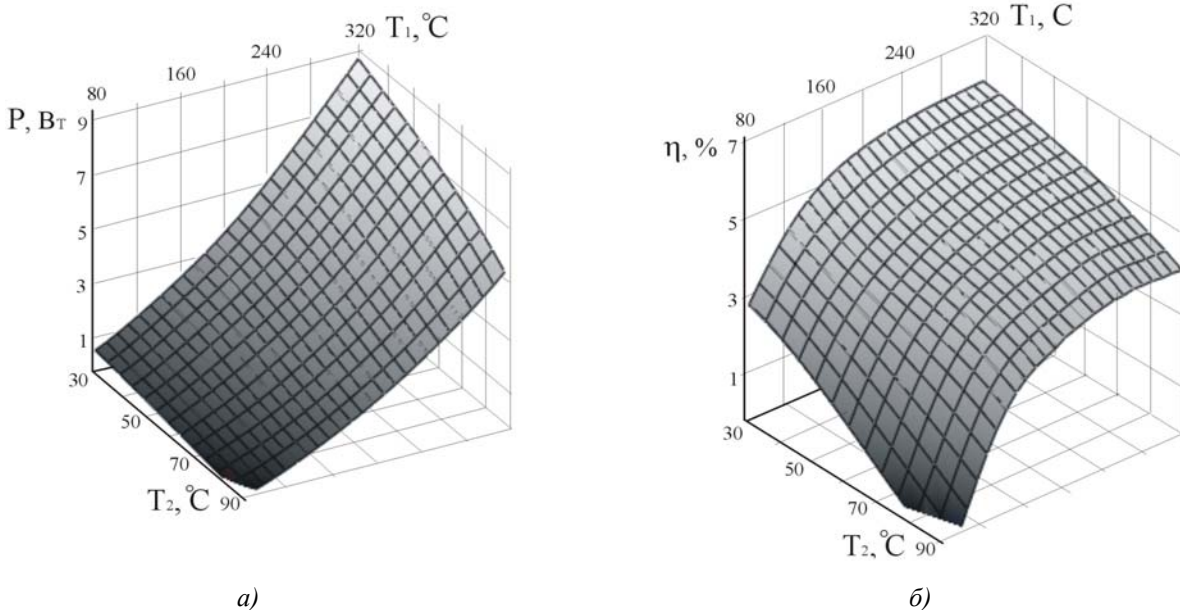


Рис. 2. Залежність електричної потужності – (а) і ККД – (б) термоелектричного модуля АЛТЕК–1061 від температур T_1 гарячої та T_2 холодної сторін модуля.

На рис. 2 представлено трьохвимірне графічне зображення функцій двох змінних $P(T_1, T_2)$ та $\eta(T_1, T_2)$, які представляють собою значення електричної потужності (рис.2а) та ККД (рис.2б) одного стандартного модуля Алтек-1061 при температурах гарячої T_1 та холодної T_2 сторін ТЕБ. Модуль виготовлено з термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 , максимальна робоча температура гарячої сторони яких не перевищує $300^\circ C$.

З врахуванням наведених на рис. 2 залежностей встановлено, що для отримання заданої потужності ТЕГ (60-65 Вт) в робочому інтервалі температур ($250 - 290^\circ C$ на гарячій стороні модуля, $50 - 80^\circ C$ на холодній стороні) потрібно використати 12 термоелектричних модулів АЛТЕК-1061. Величина необхідної вихідної напруги забезпечується вибором відповідної комутації модулів: паралельної, послідовної або послідовно-паралельної.

3. Системи підведення та відведення тепла від термобатарей генератора

Комп'ютерне проектування ТЕГ з секційним підведенням тепла до ТЕБ здійснено з урахуванням визначених теплових потоків, які забезпечують оптимальний режим роботи термогенератора. При цьому виходили з умови забезпечення надходження однакової кількості тепла до кожного модуля та однакових робочих температур для всіх термоелектричних модулів генератора.

4. Рівняння теплового балансу для даної моделі термогенератора:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_3 + Q_5, \quad (10)$$

$$Q_1 = P + Q_2 + Q_4. \quad (11)$$

Q_1 – теплова потужність, яка надходить від джерела тепла до гарячого радіатора секційного ТЕГ конвективним шляхом і випромінюванням:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n Q_{1(i)}, \quad (12)$$

де $n = 2, 3$ – кількість секцій для випадку двостороннього або одностороннього варіанту конструкції термоелектричного генератора, відповідно.

$Q_{1(i)}$ – теплова потужність, яка надходить конвективним шляхом та випромінюванням від гарячих газів до гарячого радіатора i -ої секції розрахована за формулами (1)-(9).

Q_2 – теплова потужність, яка відводиться від холодної сторони ТЕБ потоком рідкого теплоносія, що циркулює в рідинному радіаторі.

Q_3 – теплова потужність, яка відводиться у навколишнє середовище з продуктами реакції горіння:

$$Q_3 = Q_{CO_2} + Q_{H_2O} + Q_{N_2}, \quad (13)$$

$$Q_{CO_2} = c_{p1} \cdot (T_{1(2)} - T_0) \cdot g_T \cdot m_1,$$

$$Q_{H_2O} = [c_{p2} \cdot (T_{1(2)} - 100) + \lambda' + c_{p3} \cdot (100 - T_0)] \cdot g_T \cdot m_2,$$

$$Q_{N_2} = c_{p0} \cdot (T_{1(2)} - T_0) \cdot g_T \cdot m_0 - c_{p4} \cdot (T_{1(2)} - T_0) \cdot g_T \cdot m_4.$$

Q_4 – теплова потужність, яка втрачається на елементах конструкції гарячого радіатора:

$$Q_4 = \sum_{i=1}^n Q_{4(i)}, \quad (n = 2, 3), \quad (14)$$

де $Q_{4(i)}$ – теплова потужність, яка втрачається на елементах конструкції гарячого радіатора i -ї секції:

$$Q_{4(i)} = \frac{\lambda_i \cdot S_i}{L_i} (T_{1(i)} - T_{2(i)}), \quad (15)$$

де λ_i – теплопровідність ізоляційного матеріалу; S_i – площа поверхні гарячого радіатора i -ї секції, яка не зайнята модулями; L_i – товщина шару теплоізоляції; $T_{1(i)}$, $T_{2(i)}$ – температура гарячої та холодної сторін ТЕБ i -ї секції, відповідно.

Q_5 – теплова потужність, яка втрачається через шар ізоляції (для випадку одностороннього варіанту ТЕГ):

$$Q_5 = \frac{\lambda_i \cdot S'_i}{L_i} (T_G - T_0), \quad (16)$$

де S'_i – площа поверхні теплоізоляції одностороннього ТЕГ.

P – електрична потужність ТЕГ:

$$P = \sum_{i=1}^n n_i \cdot P_i, \quad (17)$$

де $P_i = P(T_{1(i)}, T_{2(i)})$ – електрична потужність одного модуля при визначених температурах гарячої та холодної сторін; n_i – кількість модулів у секції.

η – ККД термогенератора:

$$\eta = P/Q. \quad (18)$$

Розв'язок системи рівнянь теплового балансу (10)-(11) дав змогу визначити основні енергетичні та конструктивні параметри термоелектричного генератора для газового котла, систем підведення і відведення тепла.

На рис. 3 наведено залежність ККД та електричної потужності термоелектричного генератора від температури T_1 гарячої сторони модуля ($T_2 = 80^\circ C$) для одно- та двостороннього варіантів конструкції ТЕГ.

Як видно з рисунку, у випадку двостороннього варіанту конструкції ТЕГ, ККД і електрична

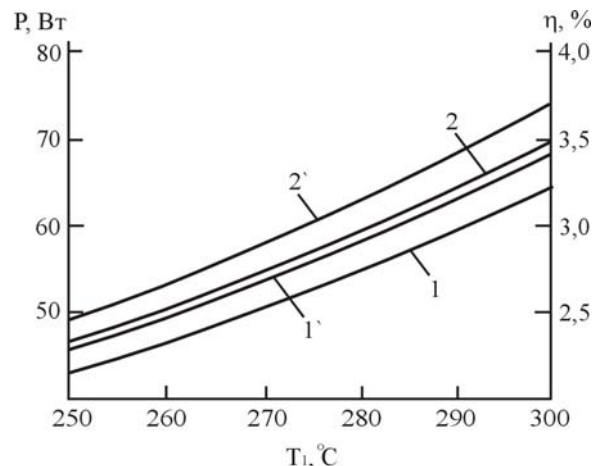


Рис. 3. Залежність електричної потужності P -(1,1') і ККД η -(2,2') термоелектричного генератора від температури T_1 гарячої сторони модуля ($T_2 = 80^\circ C$): 1, 2 – односторонній, 1', 2' – двосторонній варіант конструкції ТЕГ.

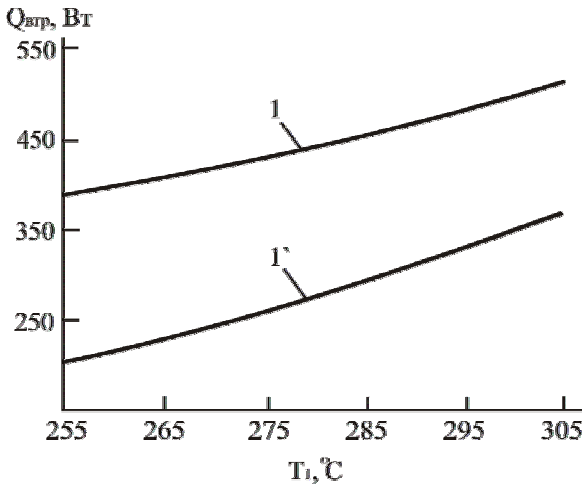


Рис. 4. Залежність втрат тепла в ТЕГ від температури гарячої сторони T_1 ($T_2=80^\circ\text{C}$): 1 – односторонній, 1' – двосторонній варіант конструкції ТЕГ.

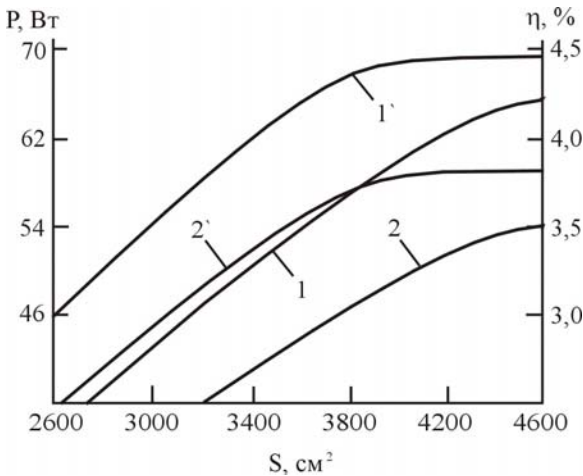


Рис. 5. Залежність електричної потужності P -(1,1') і ККД η -(2,2') термоелектричного генератора від площі теплоприймальної поверхні радіатора ($T_2=80^\circ\text{C}$): 1, 2 – односторонній, 1', 2' – двосторонній варіант конструкції ТЕГ.

потужність вищі (на $\sim 6,3\%$), порівняно з одностороннім варіантом. Головною причиною цього є втрати тепла, які для одностороннього варіанту ТЕГ більші (рис. 4).

Досліджено залежність ККД та електричної потужності ТЕГ від загальної площі теплоприймальної поверхні гарячих радіаторів при постійній кількості тепла, що надходить до модулів, для одно- та двостороннього варіантів конструкції (рис.5). Площу змінювали в межах, які відповідають робочим температурам гарячої сторони модуля ($250\text{--}300^\circ\text{C}$). Видно, що найбільші значення потужності та ККД досягаються при $S = 4500\text{cm}^2$ для одностороннього варіанту конструкції ТЕГ та $S = 3800\text{cm}^2$ – для двостороннього. При цьому оптимальне співвідношення площ теплоприймальних поверхонь секцій S_2/S_1 , S_3/S_2 складає 2,0-2,2. За таких умов досягається мінімальний градієнт температур ($\Delta T = 3\text{--}5^\circ\text{C}$) між теплоприймальними поверхнями окремих секцій ТЕГ, які послідовно розташовані у

потоці гарячих газів, а відповідно і між гарячими сторонами термоелектричних модулів різних секцій. З врахуванням отриманих результатів розраховано оптимальні геометричні параметри гарячих теплообмінників для одно- та двостороннього варіантів ТЕГ.

Система тепловідведення термогенератора складається з одного суцільного рідинного теплообмінника, одна поверхня якого має тепловий контакт з термоелектричними модулями, а друга має ребра, які поміщені у рідкий теплоносіє. Відведення тепла від модулів забезпечується шляхом примусової циркуляції теплоносія.

Оптимальна геометрія холодних радіаторів для обох варіантів генератора розрахована за умови забезпечення відведення необхідної кількості тепла Q_2 :

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n Q_{2(i)}, \quad (n=2, 3) \quad (19)$$

$Q_{2(i)}$ – тепло, яке відводиться від холодної сторони термобатареї i -ї секції;

$$\sum_{i=1}^n Q_{2(i)} = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n S_{xi} (T_{2(i)} - T_B), \quad (20)$$

де $n=2, 3$ та

$$S_{xi} = S' / n, \quad (21)$$

α – коефіцієнт тепловіддачі холодного радіатора [9]; S' – загальна площа поверхні холодного радіатора; T_B – середня температура теплоносія (води) в холодному радіаторі.

На рис. 6 наведено залежності ККД та електричної потужності термоелектричного генератора від температури T_2 холодної сторони ТЕГ при зміні температури гарячої сторони в межах $T_1 = 290\text{--}300^\circ\text{C}$ для одно- та двостороннього варіантів конструкції ТЕГ.

Як видно з рисунка, при максимальних температурах ($\sim 80^\circ\text{C}$) рідкого теплоносія електрична потужність обох варіантів термогенератора складає не менше 60 Вт, а ефективність знаходиться в межах

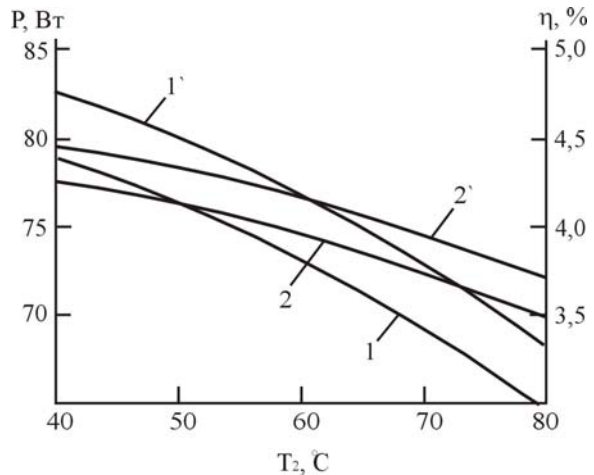


Рис. 6. Залежність електричної потужності P -(1,1') і ККД η -(2,2') термоелектричного генератора від температури T_2 холодної сторони ТЕГ ($T_1 = 290\text{--}300^\circ\text{C}$): 1, 2 – односторонній, 1', 2' – двосторонній варіант конструкції ТЕГ.

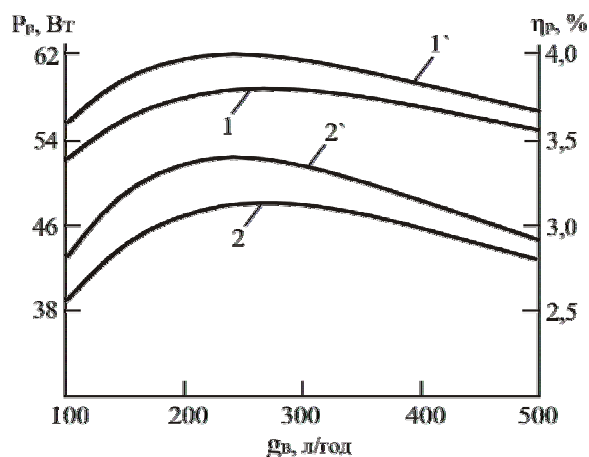


Рис. 7. Залежність електричної потужності P_p -(1, 1') і ККД η_p -(2, 2') термоелектричного генератора від швидкості циркуляції води в холодному радіаторі (враховано електричну потужність, яка необхідна для роботи насосу): 1, 2 – односторонній, 1', 2' – двосторонній варіант конструкції ТЕГ.

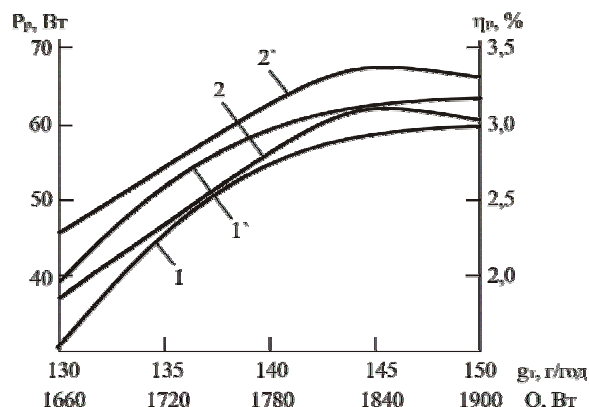


Рис. 8. Залежність електричної потужності P_p -(1,1') і ККД η_p -(2,2') термоелектричного генератора від витрати палива ($T_2=80^\circ\text{C}$): 1,2 – односторонній, 1',2' – двосторонній варіант конструкції ТЕГ.

3,5 - 3,7 %.

З врахуванням реальних умов експлуатації ТЕГ досліджено вплив швидкості циркуляції води на ККД та електричну потужність генератора. При цьому враховано електричну потужність циркуляційного насоса, яку необхідно затратити для забезпечення роботи нагрівальної системи у автономних умовах. Результати дослідження при середній температурі теплоносія у радіаторі ТЕГ 70°C наведено на (рис. 7).

Видно, що найбільших значень електрична потужність та ККД обох варіантів ТЕГ досягають при швидкості подачі води в межах 200 - 300 л/год. В цьому діапазоні зміна швидкості циркуляції води мало впливає на електричну потужність і ККД генератора. Збільшення швидкості циркуляції води більше 300 л/год. вимагає додаткових затрат електричної енергії, тому оптимальним є діапазон швидкостей циркуляції теплоносія 200-300 л/год., за

якого ККД генератора складає не менше 3 %, як для двостороннього, так і одностороннього варіантів.

Оптимальна витрата палива для досягнення максимальних значень ККД і електричної потужності складає ~ 145 г/год (рис. 8), що відповідає тепловій потужності джерела тепла 1840 Вт.

Отже електрична потужність термоелектричного генератора для систем опалення при максимальних температурах $T_1 = 300^\circ\text{C}$, $T_2 = 80^\circ\text{C}$ і оптимальних геометричних параметрах теплообмінників для підведення і відведення тепла мають такі значення: односторонній варіант – 64,5 Вт, двосторонній – 68 Вт. Ця потужність може бути використана для живлення циркуляційного насоса (20 - 40 Вт), систем піддуву повітря або димовідсмоктувальних пристроїв (10 - 20 Вт), а також живлення інших допоміжних керуючих та регулюючих пристроїв (~ 5 Вт). Кожен з варіантів має свої переваги і недоліки. Односторонній варіант має меншу потужність однак такий ТЕГ має простішу конструкцію, вбудовується у конкретний опалювальний котел і складає з ним єдине ціле. Двосторонній варіант більш складний. Він має додаткову гідравлічну систему і під'єднується до вхідної гідромережі котла. Це дозволяє використати його як джерело електричного живлення для котлів та нагрівальних пристроїв різних конструкцій і різної потужності.

Висновки

1. Показано, що при однаковій тепловій потужності джерела тепла ефективність двостороннього варіанту термогенератора вища порівняно з одностороннім, що зумовлено більшими втратами тепла у односторонньому ТЕГ. За найкращого вибору параметрів двосторонній варіант ТЕГ дає можливість отримати ККД на рівні 4.5 %.

2. Знайдено оптимальні геометричні параметри конвективних теплообмінників для секційного підведення тепла до модулів, використанням яких забезпечується мінімальний градієнт температур по теплоприймальній поверхні генератора: до 5°C для двостороннього варіанту і до 10°C – для одностороннього.

3. Оптимальне співвідношення площ теплоприймальних поверхонь секцій (S_2/S_1 , S_3/S_2) генератора при ефективних коефіцієнтах теплообміну $10-14$ $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{K}$ знаходиться в межах 2.0-2.2.

Анатичук Л.І. – академік НАН України, директор Інституту термоелектрики;

Михайловський В.Я. – доктор фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник, завідуючий лабораторією;

Чайковська О.В. – інженер 2 категорії.

- [1] А.И. Новиков. Термоэлектрический источник питания для отопительных котлов / *Термоэлектрики и их применения – Материалы VIII Межгосударственного семинара*, С.-Петербург. сс. 396-401 (2002).
- [2] Пат. RU 2224190. МКИ:F25B21/20. *Устройство для генерирования тепловой и электрической энергии* / Н.В. Шалаев, О.А. Новосельцев (RU) – Заявл. 23.04.2003, Оpubл. 20.02.2004.
- [3] Л.І. Анатичук, В.Я. Михайловський. Розвиток досліджень і розробок термогенераторів на органічному паливі // *Термоелектрика*, №4. сс. 5-38 (2004).
- [4] А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. *Процессы и аппараты химической технологии*. Госхимиздат, М. 847 с. (1962).
- [5] С.И. Исаев, Б.М. Миронов, В.М. Никитин, В.И. Хвостов. *Основы термодинамики, газовой динамики и теплопередачи*. Машиностроение, М. 275с. (1968).
- [6] В.А. Григорьев, В.М. Зорин. *Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент*. Энергоиздат, М. 510 с. (1982).
- [7] И.Т. Швец, В.И. Толубинский, А.Н. Алабовский. *Теплотехника*. Вища школа, Киев. 517 с. (1976).
- [8] А.В. Болгарский, В.И. Голдобеев, Н.С. Идиатуллин. *Сборник задач по термодинамике и теплопередаче*. Высшая школа, М. 304 с. (1972).
- [9] К.С. Зарембо. *Справочник по транспорту горючих газов*. Гостоптехиздат, М. 888 с. (1962).
- [10] С. Бретшнайдер. *Свойства газов и жидкостей*. Химия, Л. 535 с. (1966).
- [11] И.К. Кикоин. *Таблицы физических величин. Справочник*. Атомиздат, М. 1005 с. (1976).
- [12] Х. Кухлинг. *Справочник по физике*. / Пер. с нем. Мир, М. 520 с. (1982).

L.I. Anatyshuk, V.Ya. Mikhailovsky, O.V. Chaikovska

Semiconductor Thermoelectric Generator for Self-Contained Systems

*Institute of Thermoelectricity of the National Academy of Sciences and Ministry of Education of Ukraine,
58002, Chernivtsi, P.O.Box 86, E-mail: anatysh@inst.cv.ua*

The results of research on thermoelectric generator for power supply to electronic and electromagnetic devices of automatic systems for gas heaters are presented. The generator physical model is proposed, the results of calculation and optimization of basic parameters of two variants of thermogenerators are given.

Key words: thermoelectric generator, physical model, self-contained system, heat exchanger.