
ЕНЕРГЕТИЧНІ Й ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ МОДУЛІВ НА ОСНОВІ *Bi-Te* ДЛЯ РЕКУПЕРАЦІЇ ВІДХОДІВ ТЕПЛА

Анатичук Л.І.¹, Кузь Р.В.¹, Хванг Дж.Д.²

¹Інститут термоелектрики, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна;

²Інститут дослідження промислових технологій, 195, Сектор 4,
Чун Сін Роуд, Чутунг, Сіньчжу, 31040, Тайвань)

- Показано результати комп'ютерного моделювання термоелектричного генераторного модуля для рекуперації відходів тепла. Проаналізовано вплив конструкції модуля на його енергетичні й економічні показники. Розглянуто можливості зниження питомої вартості модулів.

Вступ

Актуальним застосуванням термоелектричного генерування енергії є рекуперація (повторне використання) відходів тепла від вихлопних газів автомобілів [1-3], сталеливарної промисловості [4], турбін газоперекачуючих станцій [5] та ін. Поряд з термоелектричним відомі й інші способи рекуперації відпрацьованого тепла, наприклад, з використанням парового циклу [6]. Хоча такий варіант рекуперації вигідно вирізняється за ефективністю, звичайно, він непридатний за низьких температур (нижчих 350 – 400 °С). У той же час відомо безліч джерел тепла, де рівень температур становить 150 – 200 °С. До того ж, якщо мова йде про утилізацію викидного тепла, то фактор ККД модуля вже менш вагомий, ніж його питома вартість. Однак у наш час вартість серійно вироблених термоелектричних генераторних модулів, наприклад, таких як Ni-Z або Komatsu [7-8], досить висока – близько 10 – 20 \$/Вт, що є основною перешкодою на шляху до масового використання генераторних модулів для утилізації тепла.

Мета пропонованої роботи – аналіз можливості покращання економічних показників модулів за можливо високих значень ККД. Для аналізу використано методи комп'ютерного моделювання [9-11] з урахуванням тривимірного розподілу температурного й електричного полів і температурних залежностей параметрів конструктивних елементів модулів.

1. Моделювання термоелектричного генераторного модуля

1.1. Фізична модель

Для розрахунків енергетичних показників термоелектричного генераторного модуля розглянуто фізичну модель, представлену на рис. 1.

Термоелектричний генераторний модуль містить вітки *n*-типу 1 і *p*-типу 2 провідності, з'єднані в послідовне електричне коло комутацією 3 на гарячій стороні й комутацією 4 на холодній стороні модуля. Електричні контакти 8 і 9 між вітками й комутаційними пластинами характеризуються електричними контактними опорами, різними для гарячої й холодної сторін, модуля. Армованою основою термоелектричного модуля служать керамічні пластини 5 і 6 на гарячій і холодній сторонах модуля відповідно. Простір між вітками модуля заповнено газом 7. Теплові контакти модуля 10 і 11 між керамічними пластинами й теплопідводом/тепловідводом характеризуються тепловими контактними опорами.

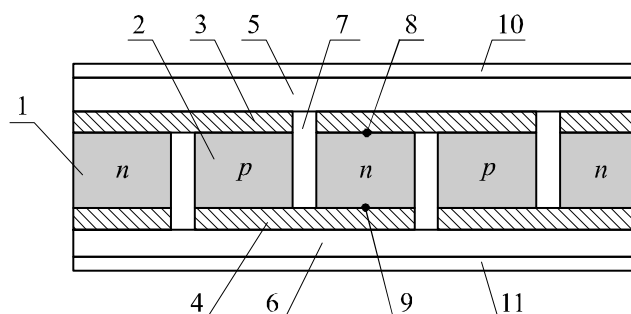


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного генераторного модуля.
 1 – вітка n-типу; 2 – вітка p-типу; 3, 4 – електричні комутації;
 5, 6 – керамічні пластини; 7 – газ; 8, 9 – електричні контакти між вітками
 й комутаційними пластинами; 10 – тепловий контакт між керамічною
 пластиною й гарячим термостатом; 11 – тепловий контакт
 між керамічною пластиною й холодним термостатом.

1.2. Математичний опис фізичної моделі

Основні рівняння для знаходження розподілів температури, потенціалу й струму в тепло- і електропровідному середовищі з урахуванням термоелектричних ефектів отримаємо, виходячи із загальних законів збереження енергії й електричного заряду. Закон збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{w} = 0, \quad (1)$$

$$\vec{w} = \vec{q} + U\vec{j}. \quad (2)$$

В (1) і (2) \vec{w} – густина потоку енергії, \vec{q} – густина потоку тепла, U – електрохімічний потенціал, \vec{j} – густина електричного струму,

$$\vec{q} = -\kappa \nabla T + \Pi \vec{j}, \quad (3)$$

де Π – коефіцієнт Пельтьє, κ – питома теплопровідність.

$$\Pi = \alpha T, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС, T – температура.

Густина електричного струму знаходиться з рівняння

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T, \quad (5)$$

де σ – питома електропровідність.

Підставивши (2), (3) в (1), отримаємо

$$-\nabla(\kappa \nabla T) + (\nabla \Pi + \nabla U)\vec{j} = 0. \quad (6)$$

З виразу (6), використавши (4) і (5), отримаємо рівняння для знаходження розподілу температури

$$-\nabla\left((\sigma \alpha^2 T + \kappa) \nabla T\right) - \nabla(\sigma \alpha T \nabla U) = \sigma \left((\nabla U)^2 + \alpha \nabla T \nabla U\right). \quad (7)$$

Для знаходження розподілу електричного потенціалу скористаємось законом збереження електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0. \quad (8)$$

Підставивши (5) в (8), отримаємо таке рівняння:

$$-\nabla(\sigma\alpha\nabla T) - \nabla(\sigma\nabla U) = 0. \quad (9)$$

Система (7)–(9) є системою диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами другого порядку в частинних похідних, що описує розподіл температури й потенціалу в неоднорідному термоелектричному середовищі. Особливість системи рівнянь (7) і (9) полягає в тому, що параметри α , σ , κ залежать від просторових координат x , y , z як безпосередньо, так і неявно через температуру $T(x, y, z)$. Це призводить до того, що стає неминучим застосування чисельних комп'ютерних методів для розв'язку рівнянь такого роду.

1.3. Комп'ютерний опис моделі

У комп'ютерній моделі термоелектричне поле показано двоелементною матрицею у функціональному просторі двічі диференційованих функцій, що включає температурне й електричне поля:

$$M = \begin{pmatrix} T(x, y, z) \\ U(x, y, z) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Матриця M задовольняє одному матричному диференціальному рівнянню

$$-\nabla(-c\nabla M) = f, \quad (11)$$

компонентами якого є рівняння (7) і (9), якщо матричні нелінійні коефіцієнти рівняння (11) мають вигляд

$$c = \begin{vmatrix} \sigma\alpha^2 T + \kappa & \sigma\alpha T \\ \alpha\sigma & \sigma \end{vmatrix}, \quad f = \begin{vmatrix} \sigma((\nabla U)^2 + \alpha\nabla T\nabla U) \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Таке представлення термоелектричного середовища дає можливість розв'язувати рівняння (11) у середовищі мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics. Результатами розв'язання рівняння (11) є тривимірні температурне й електричне поля в заданій геометрії термоелектричного модуля. Знаючи ці величини, легко розрахувати основні енергетичні характеристики модуля.

2. Дослідження впливу геометрії модуля на енергетичні й економічні показники

2.1. Вплив висоти віток

Одним з важливих геометричних параметрів термоелектричного модуля є висота віток. Зі зменшенням висоти віток зменшується тепловий опір модуля, відповідно зростає тепловий потік через модуль і його електрична потужність. До того ж, пропорційно до висоти віток зменшується витрата термоелектричного матеріалу – найдорожчого компонента термоелектричного модуля.

Конкуруючими факторами, що перешкоджають безперервному зменшенню висоти вітки, є контактні теплові й електричні опори. Зі зменшенням висоти вітки значно зростають втрати перепадів температури в теплових контактах між тепловідводами й керамічними пластинами, а також значно більше проявляється негативний вплив тепла Джоуля, що виділяється в електричних контактних переходах між термоелектричними вітками й комутацією.

Комп'ютерним моделюванням вивчено вплив висоти вітки модуля на його енергетичні характеристики. Розглянемо цю ситуацію на конкретному прикладі з такими вхідними параметрами моделі: $T_h = 200$ °С – температура теплоідводу; $T_c = 40$ °С – температура тепловідводу; $a \times b = 2.4 \times 2.4$ мм – поперечний переріз віток; $d_a = 1.4$ мм – відстань між вітками; $N = 49$ – кількість термоелектричних пар у модулі; $\alpha_n(T)$, $\alpha_p(T)$, $\sigma_n(T)$, $\sigma_p(T)$, $\kappa_n(T)$, $\kappa_p(T)$ – коефіцієнти Зеебека, електропровідності й теплопровідності термоелектричного матеріалу n -типу й p -типу відповідно (стандартні для матеріалів на основі $Bi-Te$); $R_{t1} = 4$ К/Вт – тепловий контактний опір між теплоідводами й керамічними пластинами; $r_{c1} = 10^{-5}$ Ом·см² – контактний електричний опір у гарячій частині модуля; $r_{c2} = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² – контактний електричний опір у холодній частині модуля.

У розрахунках вартості виготовлення модулів урахувалися вартість матеріалів, заробітна плата (з розрахунку середньої заробітної плати робітника в Китаї) і прибуток (~ 20%).

На рисунках 2, 3 наведено, розраховані при моделюванні залежності ККД і питомої вартості термоелектричного модуля від висоти віток.

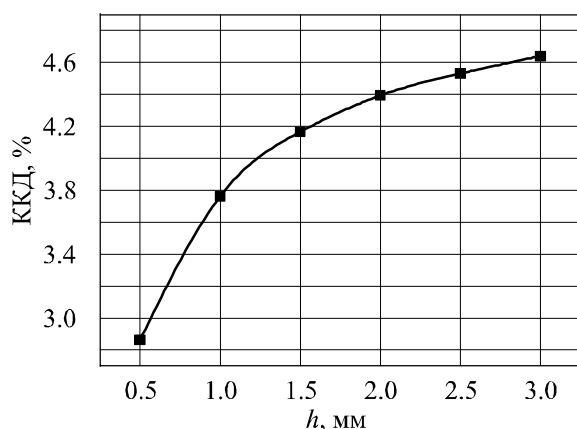


Рис. 2. Залежність ККД модуля від висоти віток.

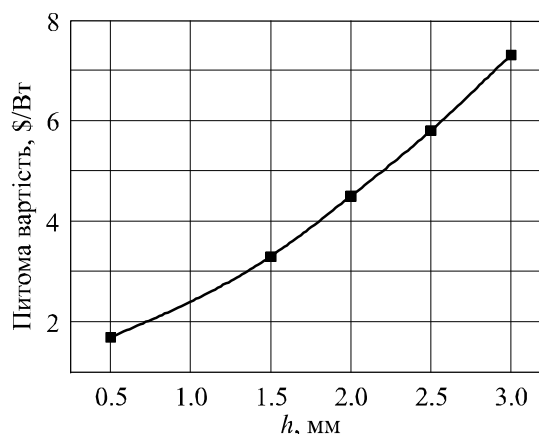


Рис. 3. Залежність питомої вартості модуля від висоти віток.

2.2. Вплив контактних електричних опорів антидифузійних шарів

Розраховано залежності електричної потужності, ККД і питомої вартості модуля від контактного електричного опору для різних висот віток. Контактний електричний опір змінювався в діапазоні від 0 до 10^{-5} Ом·см². Результати розрахунків наведено на рисунках 4, 5. Як видно з рисунків 4, 5, зі зменшенням висоти вітки особливо сильно спостерігається негативний вплив контактних електричних опорів на електричну потужність і ККД модуля.

У цілому очевидна необхідність досягати за можливості менших значень контактного опору. У цей час значення контактних опорів антидифузійних шарів з Ni досягають $3 \div 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Звідси випливає, що для досягнення прийнятних значень ККД висота віток повинна знаходитись в межах 1 – 1.5 мм.

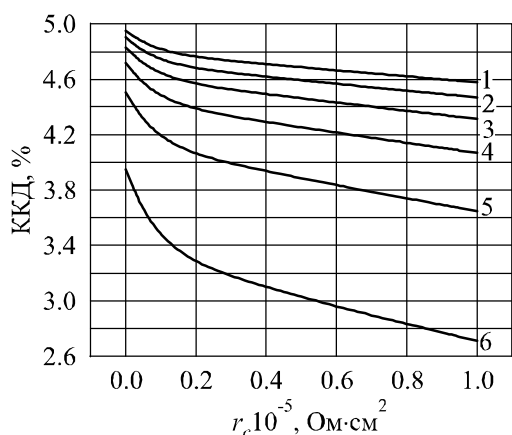


Рис. 4. Залежність ККД модуля від контактного опору антидифузійних шарів для різних висот віток h (1 – 3 мм; 2 – 2.5 мм; 3 – 2 мм; 4 – 1.5 мм; 5 – 1 мм; 6 – 0.5 мм).

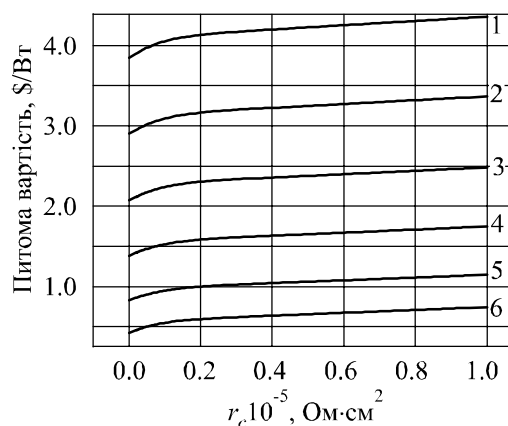


Рис. 5. Залежність питомої вартості модуля від контактного опору антидифузійних шарів для різних висот віток h (1 – 3 мм; 2 – 2.5 мм; 3 – 2 мм; 4 – 1.5 мм; 5 – 1 мм; 6 – 0.5 мм).

2.3. Вплив товщини комутаційних пластин

Нижче наведено результати моделювання залежності енергетичних і економічних параметрів термоелектричного модуля від товщини комутаційних пластин, виготовлених з міді. Товщина змінювалася в інтервалі 0.1 – 1 мм.

Моделювання здійснено для різних висот віток. Електричний контактний опір антидифузійних шарів прийнято таким, що дорівнює $5 \cdot 10^{-6}$ Ом-см².

На рис. 6, 7 наведено результати моделювання. Як видно з рисунків, за товщини комутаційних пластин 0.4 – 0.5 мм значення електричної потужності й ККД модуля досягають насичення. Причому, чим менша висота віток, тим більш відчутний вплив товщини комутаційних пластин на ефективність модуля.

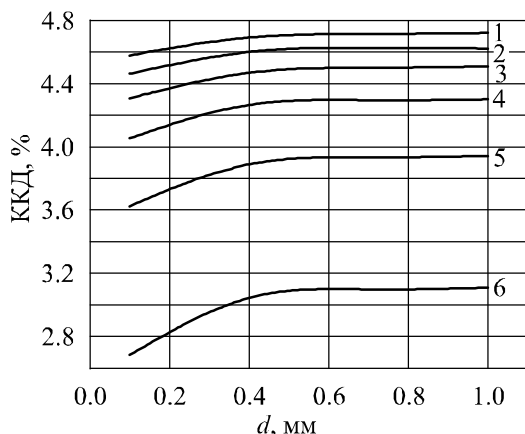


Рис. 6. Залежність ККД модуля від товщини комутаційних пластин для різних висот віток h (1 – 3 мм; 2 – 2.5 мм; 3 – 2 мм; 4 – 1.5 мм; 5 – 1 мм; 6 – 0.5 мм).

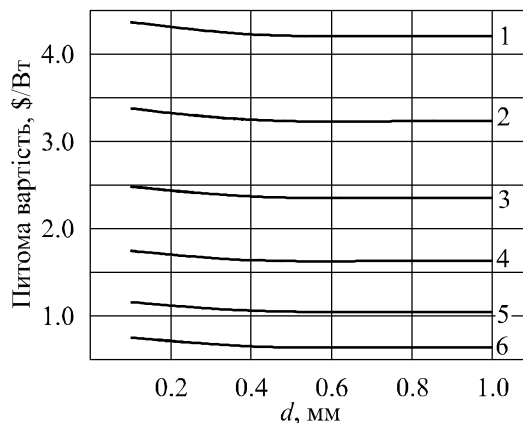


Рис. 7. Залежність питомої вартості модуля від товщини комутаційних пластин для різних висот віток h (1 – 3 мм; 2 – 2.5 мм; 3 – 2 мм; 4 – 1.5 мм; 5 – 1 мм; 6 – 0.5 мм).

2.4. Вплив теплових втрат у керамічних пластинах

Одним з важливих елементів у конструкції термоелектричного модуля є керамічні пластини. Вони служать як армуючими елементами модуля, так і електроізоляцією між

комутаційними пластинами й теплопідводами. Від теплопровідних властивостей керамічних пластин значною мірою залежить результуючий перепад температур на самих вітках термоелектричного модуля.

На рисунках 8, 9 наведено результати моделювання модуля за різної товщини керамічних пластин, а також з використанням різних матеріалів керамічних пластин: Al_2O_3 і AlN . Матеріал AlN вигідно відрізняється своєю теплопровідністю й дає можливість звести до мінімуму теплові втрати в керамічних пластинах. Його недолік – висока вартість (приблизно в 10 разів порівняно з Al_2O_3).

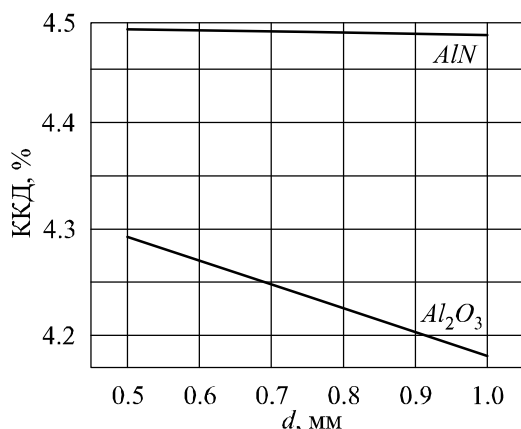


Рис. 8. Залежність ККД модуля від товщини керамічних пластин.

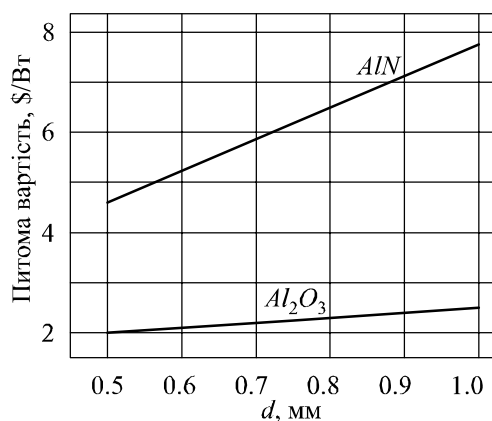


Рис. 9. Залежність питомої вартості модуля від товщини керамічних пластин.

Моделювання проведено для різної товщини керамічних пластин в інтервалі 0.5 – 1 мм з використанням як Al_2O_3 , так і AlN для висоти вітки 1.5 мм.

Як видно з рисунків 8, 9, використання керамічних пластин на основі AlN робить можливим незначно підвищити електричну потужність і ККД модуля. Але якщо порівняти питому вартість модулів, у яких використано керамічні пластини з Al_2O_3 і AlN , то стає очевидною економічна неефективність застосування керамічних пластин на основі AlN . Як видно з рис. 9, ефективніше використовувати керамічні пластини товщиною 0.50 – 0.65 мм.

2.5. Вплив теплових втрат у комутаційних пластинах і антидифузійних шарах

Далі наведено результати моделювання впливу теплових втрат у конструкційних елементах модуля, у тому числі в комутаційних пластинах і антидифузійних шарах.

Моделювання проведено для висоти вітки в інтервалі 0.5 – 3 мм. Товщина керамічних пластин – 0.63 мм, комутаційних пластин – 0.8 мм, антидифузійних шарів – 150 мкм. Результати моделювання наведено на рис. 10. Як видно, найвагомішими є втрати перепаду температури в теплових контактах між теплопідводом і гарячою керамікою, а також між теплопідводом і холодною керамікою. Причому, чим менша висота віток, тим відчутніші ці втрати.

Теплові втрати в комутаційних пластинах і антидифузійних шарах мізерні навіть для досить великих їх товщин, тому ними надалі можна знехтувати.

2.6. Вплив теплових втрат у просторі між вітками

Оскільки простір між вітками модуля заповнено газом, тому частина тепла, що підводиться до модуля, переноситься безпосередньо від гарячої керамічної пластини до холодної через газовий проміжок. Ця обставина повинна знижувати ефективність модуля. Комп'ютерним моделюванням проаналізовано втрати тепла в просторі між вітками модуля, заповненого

повітрям. Результати наведено на рис. 11, де показано залежність відношення величини тепла, що пройшло через повітряний проміжок, до величини тепла, що підводиться до модуля.

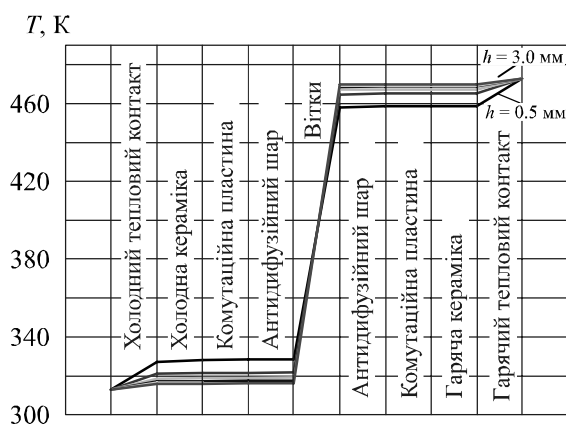


Рис. 10. Розподіл температури уздовж конструкційних елементів модуля.
 h – висота вітки.

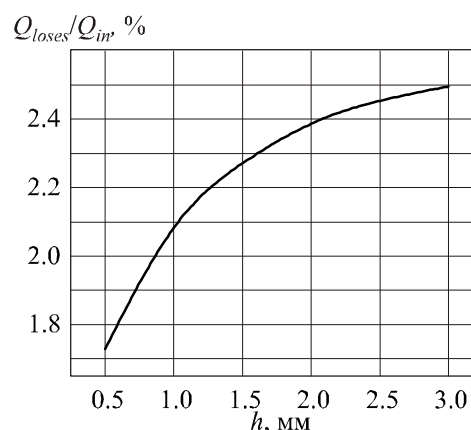


Рис. 11. Залежність величини теплових втрат у просторі між вітками від висоти віток h .

Як видно з рис. 11, величина теплових втрат у повітряному проміжку зростає зі збільшенням висоти вітки й може становити до 2.5% для обраних геометричних розмірів модуля.

Висновки

Отримані результати впливу різних геометричних факторів на ККД і питому вартість модуля дають можливість зробити наступні висновки.

1. Найбільш вагомим у геометрії модуля є розмір віток. Зі зменшенням їх висоти від 3 до 0.5 мм ККД зменшується від 4.6% до 2.8%. При цьому питома вартість знижується від 4.5 до 0.7 \$/Вт.
2. Важливою є якість антидифузійних шарів. Наявне монотонне зниження ККД і зростання питомої вартості зі збільшенням контактного опору антидифузійних шарів. Для висоти віток 1.5 мм краще значення контактних опорів (10^{-6} Ом·см²) призводить до значення ККД 4.5% (при відсутності контактного опору – 4.7%). Однак вплив контактних опорів неспинно зростає зі зменшенням висоти вітки. Так, за висоти віток 0.5 мм ККД модуля зменшується до 3.4%.
3. Товщина керамічних пластин суттєво впливає на властивості модулів зі зниженням висоти віток. Для віток висотою 0.5 мм і товщині керамічної пластини 0.5 мм ККД зменшується на 9%, а питома вартість зростає від 0.7 \$/Вт до 2 \$/Вт.
4. Застосування керамічних пластин з *AlN* дає можливість мінімізувати теплові втрати в кераміках. Однак при цьому вартість керамічних пластин значно більша. В остаточному підсумку їх застосування призводить до зростання ККД від 4.3% до 4.5%, але при цьому питома вартість зростає до 5 \$/Вт.
5. Установлено, що теплові втрати в антидифузійних шарах і комутаційних пластинах незначні й цими факторами можна знехтувати.
6. Вплив переносу тепла повітрям між вітками модулів також незначний. Теплові втрати перебувають у межах 1.7 – 2.5% від загального теплового потоку через модуль. Відповідно у цих межах буде зменшуватись ККД і зростати питома вартість модулів. Тому застосування замість повітря інертних газів низької теплопровідності неефективне.

Література

1. L.I. Anatyshuk, O.J. Luste and R.V. Kuz, Theoretical and Experimental Studies of Thermoelectric Generator for Vehicles, *Journal of Electronic Materials* 40(5), (2011).
2. L.I. Anatyshuk, R.V. Kuz and Yu.Yu. Rozver, Efficiency of Thermoelectric Recuperators of the Exhaust Gas Energy of Internal Combustion Engines, *J. Thermoelectricity* 4, 75-79 (2011).
3. L.I. Anatyshuk, R.V. Kuz, Theory and Computer Simulation of Automotive Thermoelectric Generators, *ICT/ECT-2012* (July 9-12, 2012, Aalborg, Denmark).
4. L.I. Anatyshuk, J.D. Hwang, H.S. Chu and H.L. Hsieh, The Design and Application of Thermoelectric Generators on the Waste Heat Recovery of Heating Furnace in Steel Industry, *XIV International Forum on Thermoelectricity* (May 17-20, 2011, Russian Federation, Moscow).
5. L. Anatyshuk, V. Morozov, V. Mitin and A. Pribyla, Thermoelectric Recuperator for Gas Turbines, *ICT/ECT-2012* (July 9th-12th, 2012, Aalborg, Denmark).
6. J. LaGrandeur, D. Crane and A. Eder, Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery, *DEER Conference* (2005, Chicago).
7. <http://www.hi-z.com/hz2.php>.
8. <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/press/2009012714011528411.html>.
9. Martin Jaegle, Simulating Thermoelectric Effects with Finite Element Analysis using Comsol, *European COMSOL Conference - Oral Presentations* (November 04 – 06, 2008, Hannover).
10. E.E. Antonova, D.C. Looman, Finite Elements for Thermoelectric Device Analysis in ANSYS, *ICT 2005, 1519922 ISBN: 0-7803-9552-2*.
11. R.V. Kuz, M.N. Strutinsky, Computer Simulation of Single-Stage Thermoelectric Generator Module, *J. Thermoelectricity* 3, 21-27 (2010).

Надійшла до редакції 02.11.2012.