



Черкез Р.Г.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЕЛЕМЕНТА З РОЗВИНЕНИМ БІЧНИМ ТЕПЛООБМІНОМ

Черкез Р.Г.

(Інститут термоелектрики,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна)

-
- Викладено результати досліджень термоелемента з розвиненим бічним теплообміном, що працює в режимі генерації електричної енергії. На основі фізичної моделі створено тривимірну комп'ютерну модель генераторного термоелемента з розвиненим бічним теплообміном та досліджено вплив конструктивних і теплофізичних параметрів на його енергетичні характеристики. Показано можливості підвищення ККД на 20 – 30% та питомої електричної потужності на 40 – 50% порівняно з традиційними термоелементами.

Вступ

Найбільше застосування мають термоелектричні генератори [1,2], що використовують тепло від згоряння органічних палив та виконані на основі класичної моделі термоелемента, з якої компонується модуль (рис. 1). Така теплова схема обумовлює недостатню ефективність перетворення енергії. Це обумовлено тим, що з термогенератора відводяться гази, температура яких близька до температури гарячих спайв термобатарей й відповідно майже половина енергії гарячих газів не використовується. Тому, виконані за такою класичною схемою, термоелектричні генератори мають досить низький ККД.

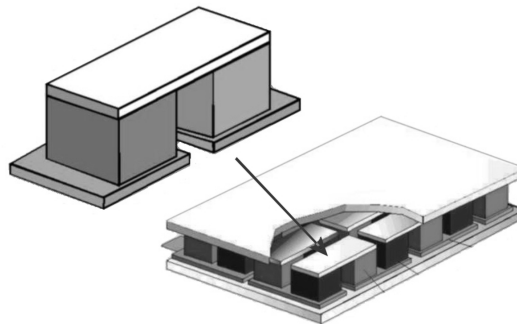


Рис. 1. Схема класичного термоелемента.

Перспективний напрям підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії – використання бічних поверхонь віток для відбору низькопотенційної теплової енергії від теплоносія [3]. Це дає можливість внаслідок наявності теплообміну теплоносія з «холодними» частинами віток більше теплової енергії віддати матеріалу і перетворити її в електричну енергію. Комп'ютерні розрахунки таких моделей термо-елементів в одновимірному наближенні [4] засвідчили можливість покращення ККД на 30%.

Однак дослідження таких термоелементів у трьохвимірному випадку з урахуванням температурних залежностей параметрів матеріалу не було проведено.

Мета пропонованої праці – створення та дослідження 3-d комп'ютерної моделі генераторного термоелемента з розвиненим бічним теплообміном та визначення впливу конструктивних і теплофізичних факторів на його

енергетичні характеристики.

Фізична модель термоелемента з розвиненим бічним теплообміном та її математичний опис, метод розв'язку задачі

На рис. 2. показано фізичну модель генераторного термоелемента, що містить вітки n - і p -типів провідності, властивості матеріалу яких змінюються з координатами внаслідок залежності термоелектричних властивостей матеріалу від температури $T(x)$. Температура теплоносія, що підводиться на гарячу сторону і на бічну поверхню віток термоелемента T_h .

Холодна сторона термостатована за температури T_c . Особливістю цього термоелемента порівняно з класичним аналогом є додаткове підведення тепла на бічну поверхню віток термоелемента, що дає можливість використати більше тепла від теплоносія. З допомогою використання цього методу збільшується площа теплообміну теплоносія з термоелементом, більша кількість тепла встигає передатися термоелементу, отже підвищується ефективність перетворення енергії. Оскільки рівень коефіцієнта добротності, незважаючи на створення матеріалів з наперед заданими властивостями, упродовж останніх років не зростає, досліджуються нові способи підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії, одним з яких є створення нових теплових схем термогенераторів.

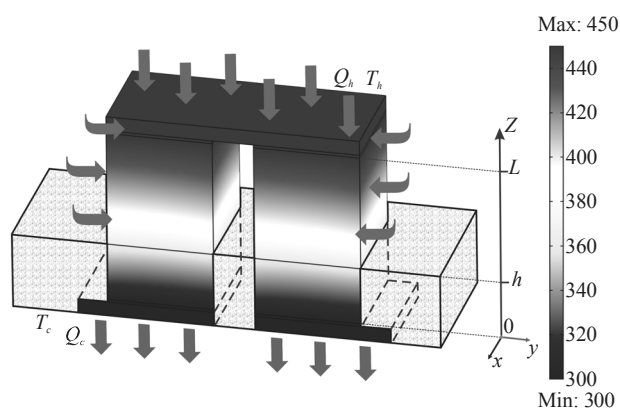


Рис. 2. Схема генераторного термоелемента з розвиненим бічним теплообміном.

Розподіл температур в матеріалі віток T можна знайти з розв'язку диференційного рівняння теплопровідності з урахуванням температурних залежностей параметрів матеріалу (1)

$$\nabla \kappa \nabla T + \frac{\vec{i}^2}{\sigma} - \tau \vec{i} \nabla T = 0, \quad (1)$$

де τ – коефіцієнт Томсона; κ – коефіцієнт теплопровідності; σ – коефіцієнт електропровідності; \vec{i} – вектор густини електричного струму.

Особливістю моделі є наявність інтенсивного теплообміну з бічною поверхнею вітки S_b , що описується законом Ньютона-Ріхмана:

$$q|_{S_b} = \alpha_T (T_h - T); \quad (2)$$

$q|_{S_b}$ – тепловий потік, що надходить на бічну поверхню вітки; T_h – температура газу; α_T – коефіцієнт тепловіддачі.

Для ізолюваної частини вітки термоелемента справедливе таке співвідношення:

$$q|_{s_{is}} = 0. \quad (3)$$

Основне завдання дослідження – знаходження оптимальних розподілів температур, теплових потоків та енергетичних характеристик термоелемента з розвиненим бічним теплообміном, за яких досягається максимальний ККД для заданих температур холодних спаїв T_c , теплоносія T_h .

Задача досягнення максимуму ККД

$$\eta = \frac{W}{Q_H}, \quad (4)$$

де $W = Q_H - Q_c$ електрична потужність генерована термоелементом, Q_H – тепло, що надходить до термоелемента, Q_c – тепло, що відводиться.

Тепло, що надходить до термоелемента, буде сумою теплот, що надходять на гарячий спай $Q|_h^k$ і на бічну поверхню вітки $Q|_h^\sigma$:

$$Q_H = Q|_h^k + Q|_h^\sigma, \quad (5)$$

де

$$Q|_h^k = \int_{s_k} \vec{q} d\vec{S}_k, \quad (6)$$

$$Q|_h^\sigma = \int_{s_\sigma} \vec{q} d\vec{S}, \quad (7)$$

де q – густина потоку тепла, що визначається виразом

$$\vec{q} = \alpha \vec{i}T - k \nabla T. \quad (8)$$

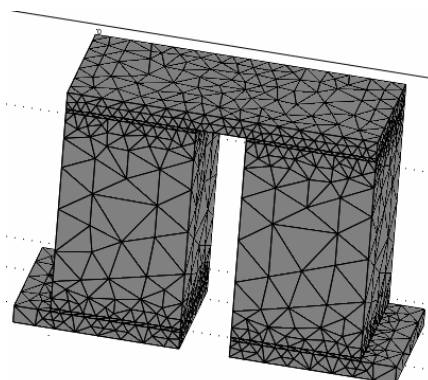
Кількість тепла, що відводиться термоелементом, визначається за формулою

$$Q_c = \int_{s_c} \vec{q} d\vec{S}_c. \quad (9)$$

3-D комп'ютерна модель термоелемента в пакеті Comsol Multiphysics

Програма COMSOL Multiphysics заснована на системі диференціальних рівнянь в частинних похідних. Є три математичні способи задання таких систем:

- *коєфіцієнтна форма*, призначена для лінійних і близьких до лінійних моделей;
- *генеральна форма*, для нелінійних моделей;
- *слабка форма (Weak form)*, для моделей з PDE (рівняннями в частинних похідних) на границях, ребрах або для моделей, що використовують умови зі змішаними похідними за часом [5].



Для розрахунку моделей термоелектричних елементів доцільно використовувати „слабку форму” у вигляді PDE на границях, оскільки вони дають змогу задати необхідні умови на поверхнях термоелемента. Використовуючи вище зазначену форму, створено модель звичайного (класичного) термоелемента, в якому теплообмін відбувається на торцевих його поверхнях. Для початку було побудовано геометрію термоелемента, що включає в себе вітки термоелемента, комутаційні пластини, а також перехідні шари для наближення властивостей комп’ютерної моделі до реальної. Після розбиття моделі методом кінцевих елементів [6] термоелемент набуде вигляду, показаного на рис. 3, кожна з частин моделі розбивається незалежно від сусідніх складових, тому найменші елементи отрималися на тонких перехідних шарах термоелемента. Характеристики розбиття наведено в табл. 1.

Рис. 3. Вигляд класичного термоелемента після розбиття.

Таблиця 1

Характеристики розбиття моделі класичного термоелемента

Кількість ступенів свободи	45140
Кількість вузлових точок	3192
Кількість елементів	14936
Кількість граней	600
Кількість поверхонь	48
Мінімальна якість елементів	0.233

Класичну модель створено для перевірки відповідності комп’ютерної моделі моделям реальних досліджених термоелементів і зіставлення їх параметрів за однакових умов експлуатації. Наступний етап задання коефіцієнтів матриці, які визначають ізотропність чи анізотропність властивостей змодельованого об’єкту і для даного випадку показані в табл. 2, значення даних коефіцієнтів отримані емпірично.

Таблиця 2

Коефіцієнти дифузії та їх значення

Назва	Значення
c11	$\kappa + \sigma \cdot \alpha \cdot u + \sigma \cdot \alpha \cdot \alpha \cdot T$
c12	$\sigma \cdot u + \sigma \cdot \alpha \cdot T$
c21	$\sigma \cdot \alpha$
c22	σ

Для задання граничних умов на поверхнях термоелемента використовуються граничні умови двох видів:

– граничні умови Діріхле (граничні умови першого роду) – граничні умови звичайного диференційного рівняння або диференційного рівняння в частинних похідних, у якому на границі визначається значення невідомої функції. У випадку рівняння в частинних похідних граничні умови задаються на певному контурі або поверхні, а тому можуть бути функцією, визначеною на цьому контурі чи поверхні;

– граничні умови Неймана (граничні умови другого роду) – граничні умови звичайного диференційного рівняння або диференційних рівнянь в частинних похідних, які визначають на границі області похідну від шуканої функції.

Як для звичайного термоелемента, так і для термоелемента з розвиненим бічним

теплообміном на холодній стороні використовувалися граничні умови Діріхле для температури і потенціалу, а гаряча сторона задана умовами Неймана (залежність від температури теплоносія і коефіцієнта тепловіддачі).

Для опису властивостей матеріалів, використаних в моделі, для кожного елемента моделі записуються значення кінетичних коефіцієнтів α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, електро та теплопровідності, які є функціями температури T і задані поліномами, приведеними в табл. 3, де 2-ий стовпець відповідає властивостям комутації, 3-ій – властивостям теплопереходу; в табл. 4 і 5 записані властивості віток n і p -типів провідності для матеріалу на основі Bi_2Te_3 (рис. 4).

Таблиця 3

Властивості комутації та теплопереходу

α	0	0
σ	60000000	500000
κ	400	4000

Таблиця 4

Властивості вітки n -типу провідності

α_n	$1.03 \cdot 10^{-6} \cdot (-184.14286 + 2.14929 \cdot T - 0.00383 \cdot T^2 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot T^3)$
σ_n	$100 \cdot (4528.57143 - 13.78929 \cdot T + 0.01293 \cdot T^2)$
κ_n	$0.1 \cdot (127.20238 - 0.73409 \cdot T + 0.00151 \cdot T^2 - 8.88889 \cdot 10^{-7} \cdot T^3)$

Таблиця 5

Властивості вітки p -типу провідності

α_p	$1.03 \cdot 10^{-6} \cdot (369.71429 - 2.18595 \cdot T + 0.00729 \cdot T^2 - 7.3333 \cdot 10^{-6} \cdot T^3)$
σ_p	$100 \cdot (7856.90476 - 34.8127 \cdot T + 0.05638 \cdot T^2 - 3.11111 \cdot 10^{-5} \cdot T^3)$
κ_p	$0.1 \cdot (70.80476 - 0.31257 \cdot T + 0.000449524 \cdot T^2)$

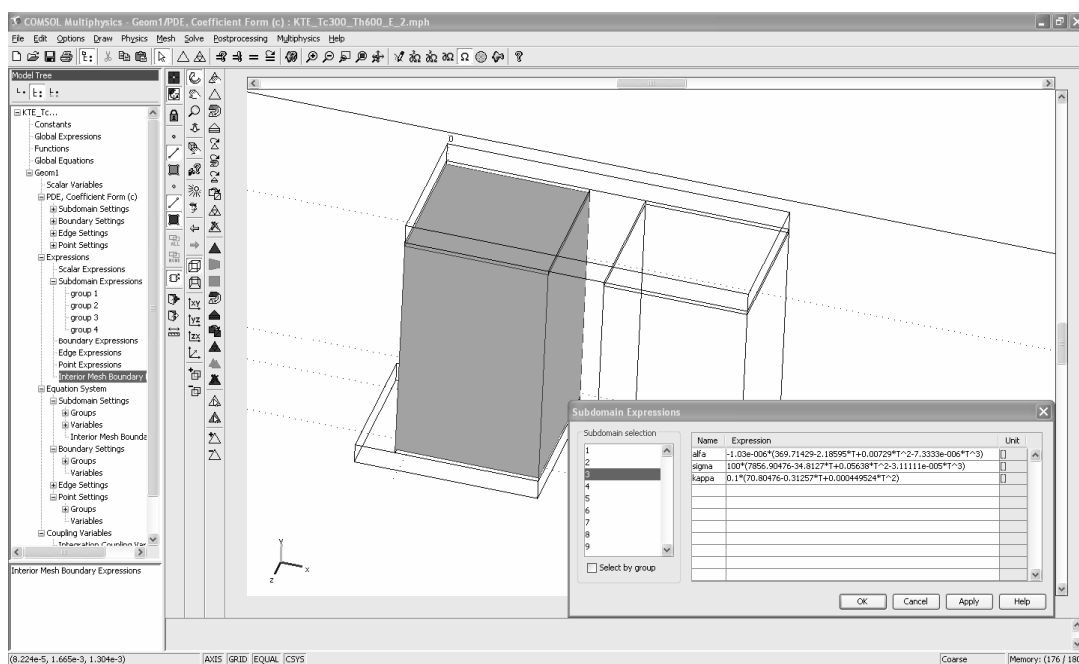


Рис. 4. Приклад задання властивостей об'єктів в графічному інтерфейсі COMSOL Multiphysics.

Розрахунок енергетичних параметрів потребує введення додаткових рівнянь для визначення струму та теплових потоків, що надходять і відводяться від термоелемента табл. 6.

Наступними розрахунками інтегруванням по поверхні знаходимо значення струму, що проходить через термоелемент, також вхідних і вихідних теплових потоків, необхідних для визначення енергетичних характеристик термоелемента, зокрема коефіцієнта корисної дії (ККД) та електричної потужності.

Методом кінцевих елементів у середовищі пакета прикладних комп'ютерних програм Comsol Multiphysics здійснено моделювання термоелемента для матеріалів на основі Bi_2Te_3 з максимальним значенням термоелектричної добротності на рівні $2.8 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ за кімнатної температури. Враховано наявність контактного та комутаційного опору, залежності кінетичних коефіцієнтів матеріалів від температури. Досліджено вплив умов теплообміну, конструктивних параметрів термоелемента та ізоляції бічної поверхні на енергетичні характеристики.

Таблиця 6

Використані формули

Змінна	Значення
I_x	$-\sigma \cdot u_x - \sigma \cdot \alpha \cdot T_x$
I_y	$-\sigma \cdot u_y - \sigma \cdot \alpha \cdot T_y$
I_z	$-\sigma \cdot u_z - \sigma \cdot \alpha \cdot T_z$
I_n	$n_x \cdot I_x + n_y \cdot I_y + n_z \cdot I_z$
Q_x	$-k \cdot T_x - \alpha \cdot T \cdot \sigma \cdot (u_x + \alpha \cdot T_x)$
Q_y	$-k \cdot T_y - \alpha \cdot T \cdot \sigma \cdot (u_y + \alpha \cdot T_y)$
Q_z	$-k \cdot T_z - \alpha \cdot T \cdot \sigma \cdot (u_z + \alpha \cdot T_z)$
Q_n	$n_x \cdot Q_x + n_y \cdot Q_y + n_z \cdot Q_z$

Комп'ютерне дослідження енергетичних характеристик термоелементів на основі матеріалу Bi_2Te_3

Для розрахунку використані залежності параметрів матеріалів $\alpha(T)$, $\sigma(T)$, $\kappa(T)$, отримані шляхом апроксимації методом найменших квадратів, приведено на рис. 5. Для вітки n -типу провідності максимум термоЕРС випадає для температури близько 400 К, електропровідність має виражений мінімум за 500 К, теплопровідність з ростом температури зростає. Для вітки p -типу спостерігається аналогічна ситуація.

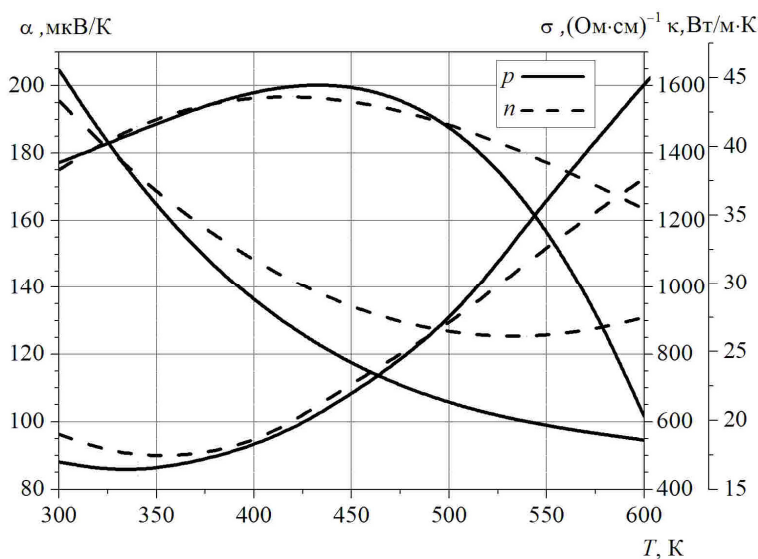


Рис. 5. Залежність термоЕРС, електро- та теплопровідності від температури.

Розрахунок термоелементів здійснювався за таким алгоритмом:

- розбиття термоелемента методом кінцевих елементів;
- задання граничних умов на поверхнях термоелемента (температура, потенціал);
- визначення ЕРС, що генерується термоелементом;
- повернення до граничних умов, задання електричного опору;
- повторний розрахунок моделі, визначення розподілу температури;
- інтегрування поверхонь по струму та теплових потоках, виявлення їх значень, розрахунок електричної потужності, яку генерує термоелемент;
- розрахунок ККД термоелемента з використанням величин, отриманих у попередніх пунктах.

На рис. 6 зображено графік залежності ККД і потужності класичного термоелемента від струму, що через нього проходить, для різних температур гарячої сторони. Як бачимо з графіка, максимуми ККД і електричної потужності дещо зміщені одне відносно одного в усіх трьох випадках. ККД зростає за менших температур, проте його максимум не досягає значень, що отримуються за вищих температур. Максимум ККД досягається за температури гарячого спаю термоелемента близько 500 К і становить 6.15% із струмом 1.8 А. Щодо електричної потужності, то в усіх показаних випадках спостерігається рівномірна зміна значень, максимум потужності за температури 650 К становить 0.14 Вт зі струмом 2.53 А.

Порівняння отриманих результатів з результатами експериментальних досліджень класичних термоелементів показало наближені значення з різницею у 10 – 15%.

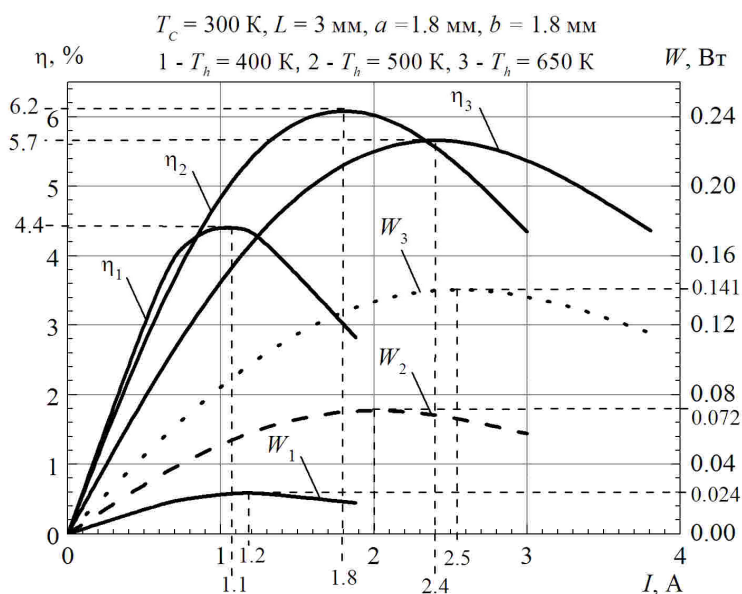


Рис. 6. Результати розрахунку класичного термоелемента.

Для термоелемента з розвиненим бічним теплообміном методика розрахунку і використані рівняння аналогічні, як для випадку класичного термоелемента. Основною відмінністю моделей є використання бічної поверхні вітки для додаткового відбору тепла від теплоносія як один із шляхів підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії.

Особливістю комп'ютерної моделі термоелемента з розвиненим бічним теплообміном є поділ віток термоелемента на частини, для однієї з частин поверхня буде повністю теплоізованою (як у випадку звичайного термоелемента), до поверхні іншої частини

підводиться тепло за тим же законом, що і до гарячого спаю. Загальний тепловий потік, який надалі буде використовуватися для розрахунку енергетичних характеристик, тепер є сумою складових: теплового потоку на гарячий спай термоелемента; теплового потоку на бічну поверхню вітки.

Провівши розрахунок термоелемента, до прикладу, для температури холодного спаю $T_c = 300$ К, температури джерела тепла $T_h = 900$ К, за $L = 3$ мм, $a = 1.8$ мм, $b = 1.8$ мм, $\alpha_T = 0.010$ Вт/см²К для конвекції на гарячу сторону термоелемента та $\alpha_T = 0.005$ Вт/см²К для конвекції на бічну поверхню віток з висотою ізоляції $L/2$, отримуємо розподіл температур, зображений на рис. 7.

Як бачимо з рисунків, за рахунок надходження додаткового тепла на бічну поверхню віток термоелемента ізотермічні поверхні дещо вигинаються в бік збільшення температури (рис. 8), ізотермічні поверхні в частині вітки, що знаходиться в ізольованій області – свою форму змінюють неістотно. Отриманий графічний розподіл ізотерм відповідає тепловим процесам в термоелементі, що вказує на коректність розв'язку задачі.

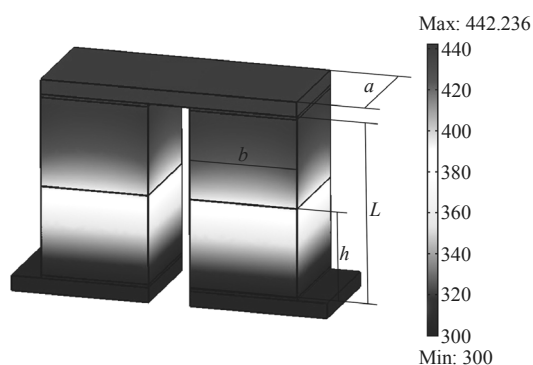


Рис. 7. Розподіл температур T в термоелементі з розвиненим бічним теплообміном.

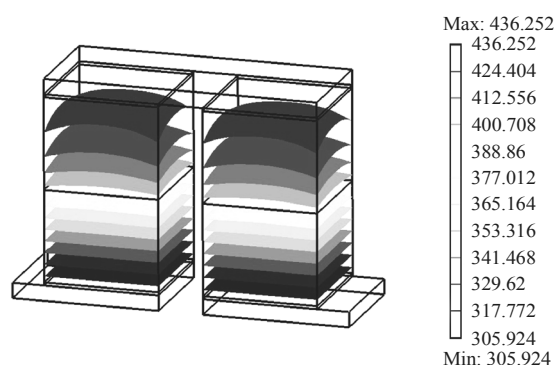


Рис. 8. Ізотермічні поверхні в термоелементі з розвиненим бічним теплообміном.

Результати розрахунку тривимірної комп'ютерної моделі термоелемента з розвиненим бічним теплообміном

Результати розрахунку 3-d моделі, побудованої в пакеті Comsol Multiphysics, показано на рис. 9, де наведено залежності ККД і потужності від висоти ізоляції бічної поверхні вітки для температури теплоносія 700 К. Відношення рівнів ККД термоелемента з розвиненим бічним теплообміном для висоти ізоляції вітки $\frac{1}{2}L$ і класичного термоелемента (на рисунку нижня штрихована горизонталь) становить близько 36%. Електрична потужність на 77% переважає значення класичного термоелемента. Права вертикальна шкала на рисунку вказує на температуру гарячого спаю термоелемента, яка в свою чергу є найвищою в його об'ємі. Різниця в температурах гарячих спаїв термоелементів становить близько 60 К на користь термоелемента з розвиненим бічним теплообміном, що свідчить про кращий відбір тепла від теплоносія, а отже кращу ефективність приладу.

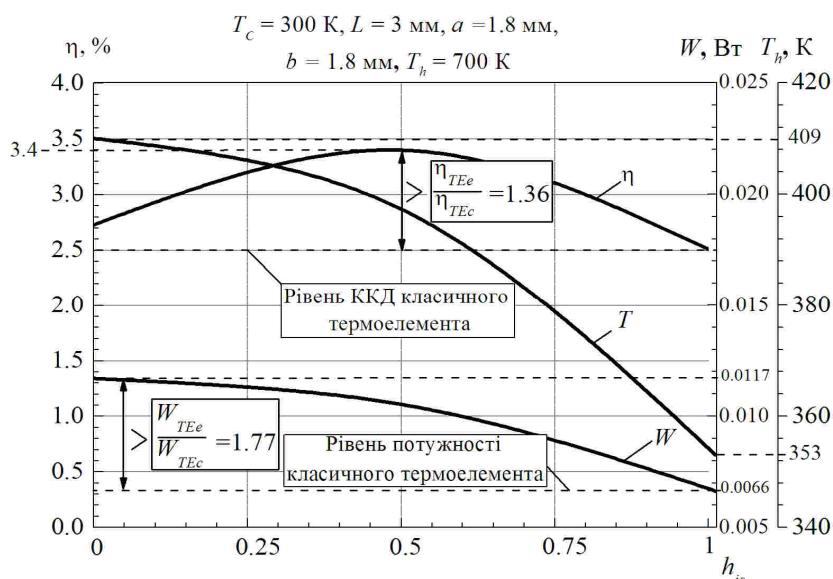


Рис. 9. Результат розрахунку термоелемента з розвиненим бічним теплообміном для температури теплоносія $T_h = 700 \text{ K}$.

На рис. 10 подано розрахунки термоелемента з бічним теплообміном, як і в попередньому випадку, але за температури теплоносія 900 K . Виграш у ККД становить близько 28%, потужність більша в 1.56 раза. Для цього термоелемента за температури теплоносія близькій 900 K доцільно використовувати ізоляцію віток на рівні не менше 0.05 висоти вітки, оскільки за меншої висоти ізоляції енергетичні характеристики даного типу термоелементів гірші, ніж у класичних аналогів.

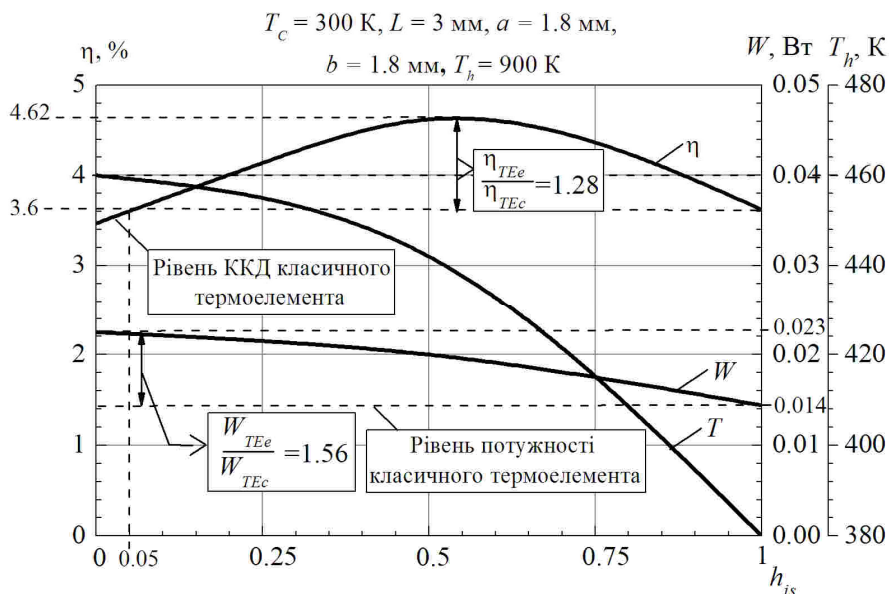


Рис. 10. Результат розрахунку термоелемента з розвиненим бічним теплообміном для температури теплоносія $T_h = 900 \text{ K}$.

Результати розрахунку енергетичних характеристик для температури газу на вході 1100 K (температура вихлопних газів бензинового двигуна) наведено на рис. 11. Спостерігається покращення ККД на 22%, потужність приблизно на 42% вища, ніж у класичного аналога, температура гарячої сторони вища на 100 K . Термоелемент ефективний з використанням ізоляції не менше 0.15 висоти вітки.

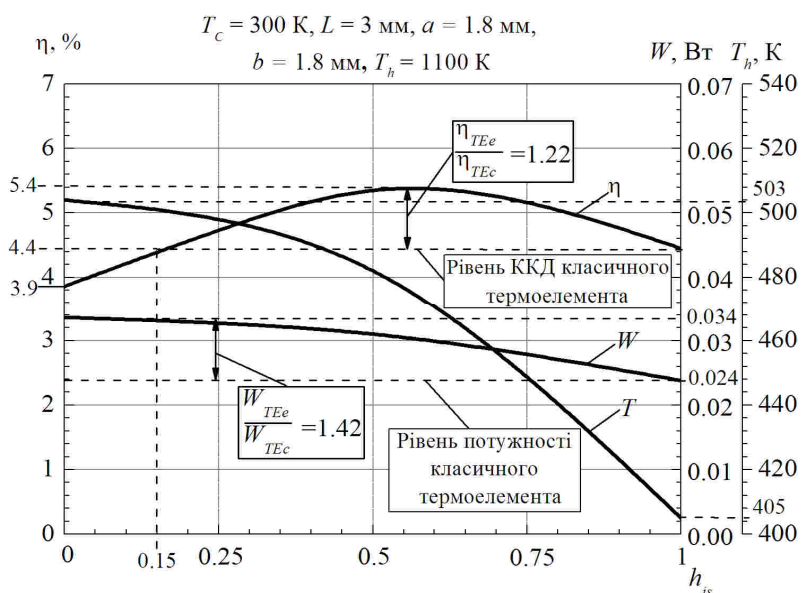


Рис. 11. Результат розрахунку термоелемента з розвиненим бічним теплообміном для температури теплоносія $T_h = 1100 \text{ K}$.

Висновки

1. 3-d модель термоелемента з розвиненим бічним теплообміном в режимі генерації електричної енергії.
2. Для матеріалів на основі Bi_2Te_3 досліджено вплив висоти віток, величини ізоляції віток та значення електричного струму на енергетичні характеристики термоелемента – ККД та генеровану електричну потужність.
3. У випадку використання матеріалів на основі Bi_2Te_3 та роботі термоелемента за початкової температури теплоносія 900 K з термостатованими холодними спаями за температури 300 K порівняння за термодинамічною ефективністю перетворення енергії з традиційними термоелементами показало можливість підвищення ККД на $20 - 30\%$ та генеруємої потужності на $40 - 50\%$.

Автор висловлює подяку Л.І. Анатичуку за корисні обговорення фізичної моделі та сприяння виконанню цієї роботи.

Література

1. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.И. Анатичук – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.
2. Котырло Г.К. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов / Г.К. Котырло, Ю.Н. Лобунец. – К.: Наук. думка, 1980. – 327 с.
3. Способ повышения КПД термоэлектрического генератора (холодильника). АС СССР №144883, Зорин И. В., Заявлено 22.06.1961. Опубликовано 18.10.1968
4. Черкез Р.Г. Термоэлементы с внутренним и боковым теплообменом / Р.Г. Черкез // Термоэлектричество. – 2003. – №1. – С. 71 – 79.
5. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB: Методическое пособие / Г.В. Бирюлин – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 78 с.
6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
7. Анатичук Л.И. Проникный термоэлемент в режиме генерації електричної енергії /

- Л.И. Анатичук, Р.Г. Черкез // Термоелектрика. – 2003. – №2. – С. 35 – 46.
8. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N. Generator modules of segmented thermoelements // Energy Conversion and Management. – 2009. – V. 50. – 9. – P. 2366 – 2372.
9. Calliat T., Fleurial J.-P., Snyder G.J., Zoltan A., Zoltan D., Borshchevsky A. Development of high efficiency thermoelectric uncouple for power generation applications // Proc. of the XVIIIth International Conf. on Thermoelectrics. - Baltimore (USA). – 1999. – P. 473 – 476.
10. Анатичук Л.І. Секційні термоелектричні генератори на органічному паливі / Л.І. Анатичук, О.Я. Лусте, В.Я. Михайловський // Термоелектрика. – 2005. – №4. – С. 20 – 25.

Надійшла до редакції 20.08.2012.