

УДК 536.24

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
Вихор Л.М., *док. физ.-мат. наук*<sup>1</sup>  
Прибила А.В., *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна

---

## ВПЛИВ КОНТАКТІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ У РЕЖИМІ НАГРІВУ В УМОВАХ МІНІАТЮРИЗАЦІЇ

---

*У роботі наводяться результати розрахунків впливу контактів на опалювальний коефіцієнт термоелектричного модуля в умовах мініатюризації. Проаналізовані можливості зменшення масогабаритних показників термоелектричного модуля в режимі нагріву для різних контактних опорів за умови мінімальних втрат опалювального коефіцієнту. Бібл. 8, рис. 1, табл. 1.*

**Ключові слова:** термоелектричний тепловий насос, ефективність, мініатюризація, моделювання.

### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* Застосування термоелектричних перетворювачів у системах охолодження та нагріву різноманітного призначення пов'язане з їхніми унікальними перевагами [1 – 4].

Прикладом успішного використання термоелектричних модулів у режимі нагріву є системи регенерації води з рідких відходів життєдіяльності на борту пілотованих космічних апаратів (урини, конденсату атмосферної вологи, санітарно-гігієнічної води) [4 – 6].

У роботі [7] наводяться результати розрахунків впливу мініатюризації термоелектричних модулів у режимі нагріву. Шляхом комп'ютерного моделювання визначено вплив висоти віток термоелектричного матеріалу на опалювальний коефіцієнт термоелектричних модулів та знайдено оптимальну висоту вітки матеріалу, що забезпечує мінімальні втрати ефективності перетворення енергії. Подальше зниження висоти віток термоелектричного матеріалу призводить до різкого погіршення опалювального коефіцієнту і є небажаним. В [7] розрахунки проводилися для стандартної величини контактного опору  $r_0 = 5 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>. Однак очевидно, що, в умовах мініатюризації, вплив контактного опору на ефективність перетворення енергії зростає. Тому важливими є дослідження направлені на покращення якості контактів, що, в цілому, дозволить збільшити опалювальний коефіцієнт термоелектричних модулів та зменшити їх габаритні розміри.

*Мета пропонованої роботи* – визначення впливу контактів на ефективність термоелектричних модулів у режимі нагріву в умовах мініатюризації.

### Математичний і комп'ютерний описи моделі

У розрахунках використано фізичну модель термоелектричного модуля у режимі нагріву,

що детально описана в [7].

Математичний та комп'ютерний опис моделі, що були використані у розрахунках, наведено нижче.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

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

й електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (3)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (4)$$

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

Тут  $\vec{E}$  – щільність потоку енергії,  $\vec{q}$  – щільність теплового потоку,  $\vec{j}$  – щільність електричного струму,  $U$  – електричний потенціал,  $T$  – температура,  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$  – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (3) – (5), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (6)$$

Тоді закони збереження (1), (2) набувають вигляду:

$$-\nabla [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla [(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (7)$$

$$-\nabla (\sigma \alpha \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \quad (8)$$

З розв'язку рівняння (7) - (8) ми одержимо розподіли фізичних полів, а також інтегральні значення ефективності та теплового потоку в термоелементі.

Для розв'язку розглянутих вище диференціальних рівнянь із відповідними граничними умовами використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [8].

## Результати комп'ютерного моделювання

Таким чином, розраховано залежності опалювального коефіцієнту  $K$  термоелектричного модуля від величини контактного електричного опору для різних висот віток термоелектричного матеріалу та різних перепадів температур.

Робочі температури вибиралися із реальних теплових умов роботи термоелектричного теплового насосу приладу очищення води космічного призначення [5 - 7].

На рис.1 наведено залежність опалювального коефіцієнту термоелектричного модуля від величини контактного електричного опору для двох значень висоти віток термоелементів – 0.5 і 1 мм та для перепадів температур  $\Delta T = 5 - 25$  К. Температура теплопоглинаючої поверхні  $T_c = 25^\circ\text{C}$  (як показано в [7], величина опалювального коефіцієнту  $K$  термоелектричного модуля слабо залежить від температури теплопоглинаючої поверхні  $T_c$  і визначається в основному значенням перепаду температур  $\Delta T$ ).

Як видно з рисунку 1, із збільшенням величини контактного опору зростає вплив висоти вітки термоелектричного матеріалу на опалювальний коефіцієнт термоелектричного модуля.

Для аналізу цього впливу скористаємось табл. 1, де розрахуємо відносну зміну величини опалювального коефіцієнту термоелектричного модуля із зміною контактного опору для різних перепадів температур і висот вітки термоелектричного матеріалу.

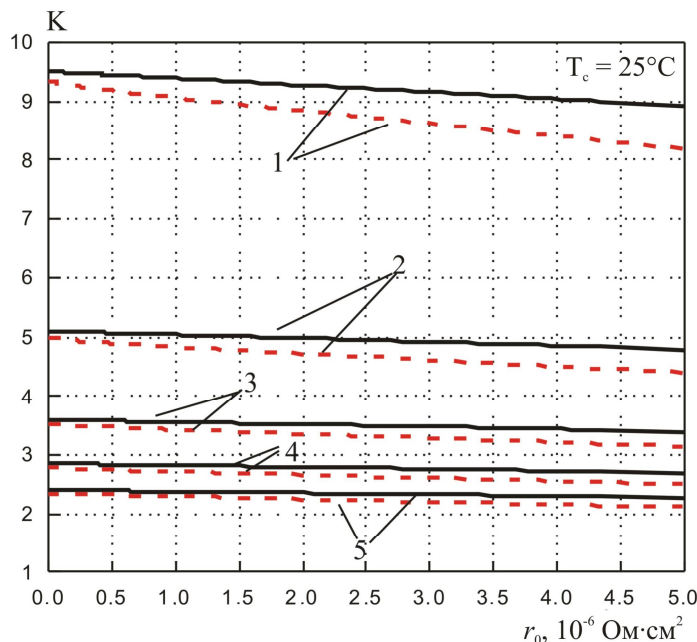


Рис. 1. Залежності опалювального коефіцієнта  $K$  термоелектричного модуля від величини контактного опору  $r_0$  для перепадів температури 1 –  $\Delta T = 5$  К, 2 –  $\Delta T = 10$  К, 3 –  $\Delta T = 15$  К, 4 –  $\Delta T = 20$  К, 5 –  $\Delta T = 25$  К. Суцільні лінії - довжина вітки  $h = 0.5$  мм, пунктирні лінії –  $h = 1$  мм. Температура теплопоглинаючої поверхні  $T_c = 25^\circ\text{C}$ .

Таблиця 1

Відносне зниження опалювального коефіцієнта  $K$  термоелектричного модуля від величини контактного опору  $r_0$  для різних перепадів температури  $\Delta T$  та висот віток  $h$  термоелектричного матеріалу

$r_0, \text{Om}\cdot\text{cm}^2$	$h, \text{mm}$	$K, \Delta T = 5^\circ\text{C}$	$K, \Delta T = 10^\circ\text{C}$	$K, \Delta T = 15^\circ\text{C}$	$K, \Delta T = 20^\circ\text{C}$	$K, \Delta T = 25^\circ\text{C}$
0	0.5	9.31	4.96	3.51	2.78	2.35
$5 \cdot 10^{-7}$		< на 1.4 %	< на 1.3 %	< на 1.1 %	< на 1.0 %	< на 1.3 %
$10^{-6}$		< на 2.7 %	< на 2.6 %	< на 2 %	< на 2 %	< на 1.75 %
$5 \cdot 10^{-6}$		< на 12 %	< на 11.3 %	< на 10.5 %	< на 10.0 %	< на 10.0 %
0	1	9.51	5.1	3.61	2.86	2.41
$5 \cdot 10^{-7}$		< на 0.6 %	< на 0.6 %	< на 0.8 %	< на 0.7 %	< на 0.8 %
$10^{-6}$		< на 0.63 %	< на 1.0 %	< на 1.0 %	< на 1.1 %	< на 1.0 %
$5 \cdot 10^{-6}$		< на 6 %	< на 6%	< на 5.8 %	< на 5.6 %	< на 10.4 %

Отже, із табл. 1 видно, що відносна зміна опалювального коефіцієнту слабо залежить від перепаду температур та має різку залежність від величини контактного опору і висоти вітки термоелемента. При чому, для висоти вітки  $h = 0.5$  мм зміна величини контактного опору від 0 до  $10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> веде до незначного зниження опалювального коефіцієнту на ~ 1.75 - 2.7 %, а з  $10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> призводить до його значного падіння на ~ 10 - 12 %. Для висоти вітки

$h=1$  мм зміна величини контактного опору від 0 до  $10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> веде до зниження опалювального коефіцієнту на  $\sim 0.6 - 0.8\%$ , а з  $10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> призводить до його значного падіння на  $\sim 6 - 10.4\%$ .

З вище сказаного можна зробити висновок про безсумнівну важливість покращення якості контактів при мініатюризації термоелектричних модулів. Так зниження величини контактного опору з  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> еквівалентно зменшенню висоти вітки термоелементу з 1 мм до 0.5 мм, що відкриває можливості до подальшого зменшення масогабаритних показників і є важливим для його практичних використань.

## Висновки

1. Встановлено, що зі збільшенням величини контактного опору зростає вплив висоти вітки термоелектричного матеріалу на опалювальний коефіцієнт термоелектричного модуля.
2. Розраховано, що для висоти вітки  $h = 0.5$  мм зміна величини контактного опору від 0 до  $10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> веде до зниження опалювального коефіцієнту на  $\sim 1.75 - 2.7\%$ , а з  $10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> призводить до його значного падіння на  $\sim 10 - 12\%$ ; для висоти вітки  $h = 1$  мм зміна величини контактного опору від 0 до  $10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> веде до зниження опалювального коефіцієнту на  $\sim 0.6 - 0.8\%$ , а з  $10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> призводить до його падіння на  $\sim 6 - 10.4\%$ .
3. Визначено, що зниження величини контактного опору з  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> еквівалентно зменшенню висоти вітки термоелементу з 1 мм до 0.5 мм, що відкриває можливості до подальшого зменшення масогабаритних показників і є важливим для його практичних використань.

## Література

1. Anatyshuk L.I., Vihor L.N., The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. J. of Thermoelectricity, 2013, №5, p. 54-58.
2. Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для транспортних засобів // Термоелектрика. – № 2. – 2003. – С. 52 – 56.
3. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Розвер Ю.Ю. Исследование характеристик термоэлектрического охладителя потоков жидкости или газа // Термоэлектричество. – № 1. – 2004. – С. 73 – 80.
4. Термоэлектрический тепловой насос как средство повышения эффективности систем очистки воды при космических полетах / Анатичук Л.І., Барабаш П.А., Риферт В.Г., Розвер Ю.Ю., Усенко В.И., Черкез Р.Г. // Термоэлектричество. – 2013. – № 6. – С. 78 – 83.
5. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Оптимізація системи живлення термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2015. №6. – С 53 – 58.
6. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про граничні можливості термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. – №4. – С. 33 – 39.
7. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Прибила А.В. Вплив мініатюризації на ефективність термоелектричних модулів у режимі нагріву // Термоелектрика. – 2018. – №4. – С. 38 – 45.
8. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Надійшла до редакції 17.09.2018

**Анатичук Л.І.**, *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
**Вихор Л.М.**, *док. физ.-мат. наук*<sup>1</sup>  
**Прибыла А.В.**, *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектричності НАН і МОН України,  
ул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,  
*e-mail: anatysh@gmail.com;*

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського, 2,  
Чернівці, 58012, Україна

## **ВЛИЯНИЕ КОНТАКТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В РЕЖИМЕ НАГРЕВА В УСЛОВИЯХ МИНИАТЮРИЗАЦИИ**

*В работе приводятся результаты расчетов влияния контактов на отопительный коэффициент термоэлектрического модуля в условиях миниатюризации. Проанализированы возможности уменьшения массогабаритных показателей термоэлектрического модуля в режиме нагрева для различных контактных сопротивлений при условии минимальных потерь отопительного коэффициента. Библ. 8, рис. 1, табл. 1.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический тепловой насос, эффективность, миниатюризация, моделирование.

**L.I. Anatyshuk**<sup>1,2</sup> *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*  
**L.M. Vikhor**<sup>1</sup> *doctor Phys.- math. Sciences*  
**A.V. Prybyla**<sup>1,2</sup> *cand. Phys. - math. Sciences*

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine  
*e-mail: anatysh@gmail.com*

## **THE INFLUENCE OF CONTACTS ON THE EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC MODULES IN HEATING MODES UNDER MINIATURIZATION CONDITIONS**

*The paper presents the results of calculations of the influence of contacts on the heating coefficient of a thermoelectric module under miniaturization conditions. The possibilities of decreasing the weight and size parameters of a thermoelectric module in heating mode for various contact resistances with minimum heating coefficient losses are analyzed. Bibl. 9, Fig. 1, Tabl. 1.*

**Key words:** thermoelectric heat pump, efficiency, miniaturization, simulation.

## References

1. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M. (2013). The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. *J. Thermoelectricity*, 5, 54-58.
2. Rozver Yu.Yu. (2003). Thermoelectric air-conditioner for vehicles. *J. Thermoelectricity*, 2, 52-56.
3. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Rozver Yu.Yu. (2004). Investigation on performance of thermoelectric cooler of liquid or gas flows. *J. Thermoelectricity*, 1, 73 – 80.
4. Anatyshuk L.I., Barabash P.A., Rifert V.G., Rozver Yu.Yu., Usenko V.I., Cherkez R.G. (2013). Thermoelectric heat pump as a means of improving efficiency of water purification systems on space missions. *J. Thermoelectricity*, 6, 78 – 83.
5. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 6, 53 – 58.
6. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). Limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 4, 33 – 39.
7. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Prybyla A.V. (2018). Effect of miniaturization on the efficiency of thermoelectric modules in heating mode. *J. Thermoelectricity*, 4, 38 – 45.
8. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB.
9. Holm R. (1981). *Elektricheskiie kontakty* [Electrical contacts]. Moscow: Inostrannaia literatura [Russian transl].

Submitted 17.09.2018