

УДК 536.24

Анатычук Л.И., акад. НАН Украины^{1,2}

Вихор Л.Н., док. физ.-мат. наук¹

Прибыла А.В., канд. физ.-мат. наук^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

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.

Введение

Общая характеристика проблемы. Применение термоэлектрических преобразователей в системах охлаждения и нагрева разнообразного назначения связано с их уникальными преимуществами [1 – 4].

Примером успешного использования термоэлектрических модулей в режиме нагрева являются системы регенерации воды из жидких отходов жизнедеятельности на борту пилотируемых космических аппаратов (урины, конденсата атмосферной влаги, санитарно-гигиенической воды) [4 – 6].

В работе [7] приводятся результаты расчетов влияния миниатюризации термоэлектрических модулей в режиме нагрева. Путем компьютерного моделирования определено влияние высоты ветвей термоэлектрического материала на отопительный коэффициент термоэлектрических модулей и найдена оптимальная высота ветви материала, обеспечивающая минимальные потери эффективности превращения энергии. Последующее снижение высоты ветвей термоэлектрического материала приводит к резкому ухудшению отопительного коэффициента и является нежелательным. В [7] расчеты проводились для стандартной величины контактного сопротивления $r_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Однако очевидно, что, в условиях миниатюризации, влияние контактного сопротивления на эффективность превращения энергии возрастает. Поэтому важными являются исследования, направленные на улучшение качества контактов, что, в целом, позволит увеличить отопительный коэффициент термоэлектрических модулей и уменьшить их габаритные размеры.

Цель предлагаемой работы – определение влияния контактов на эффективность термоэлектрических модулей в режиме нагрева в условиях миниатюризации.

Математическое и компьютерное описание модели

В расчетах использована физическая модель термоэлектрического модуля в режиме нагрева, детально описанная в [7].

Математическое и компьютерное описание модели, которые были использованы в расчетах, приведены ниже.

Для описания потоков тепла и электричества воспользуемся законами сохранения энергии

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

и электрического заряда

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

где

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

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

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

Здесь \vec{E} – плотность потока энергии; \vec{q} – плотность теплового потока; \vec{j} – плотность электрического тока; U – электрический потенциал; T – температура; α , σ , κ – коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности.

Учитывая (3) – (5), можно получить:

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

Тогда законы сохранения (1), (2) приобретают вид:

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

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

Из решения уравнений (7) - (8) мы получим распределения физических полей, а также интегральные значения эффективности и теплового потока в термоэлементе.

Для решения рассмотренных выше дифференциальных уравнений с соответствующими предельными условиями использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [8].

Результаты компьютерного моделирования

Таким образом, рассчитаны зависимости отопительного коэффициента К термоэлектрического модуля от величины контактного электрического сопротивления для различных высот ветвей термоэлектрического материала и различных перепадов температур.

Рабочие температуры выбирались из реальных тепловых условий работы термоэлектрического теплового насоса прибора очистки воды космического назначения [5 – 7].

На рис. 1 приведена зависимость отопительного коэффициента термоэлектрического модуля от величины контактного электрического сопротивления для двух значений высоты

ветвей термоэлементов – 0.5 и 1 мм и для перепадов температур $\Delta T = 5 - 25$ К. Температура теплопоглощающей поверхности $T_c = 25^\circ\text{C}$ (как показано в [7], величина отопительного коэффициента K термоэлектрического модуля слабо зависит от температуры теплопоглощающей поверхности T_c и определяется в основном значением перепада температур ΔT).

Как видно из рис. 1, с увеличением величины контактного сопротивления растет влияние высоты ветви термоэлектрического материала на отопительный коэффициент термоэлектрического модуля.

Для анализа этого влияния воспользуемся таблицей, где приведены результаты расчетов относительного изменения величины отопительного коэффициента термоэлектрического модуля с изменением контактного сопротивления для различных перепадов температур и высот ветви термоэлектрического материала.

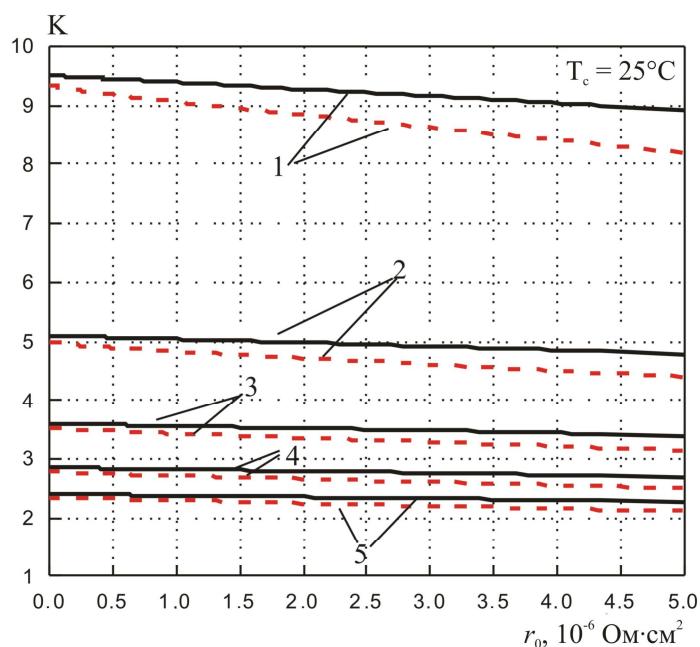


Рис. 1. Зависимости отопительного коэффициента K термоэлектрического модуля от величины контактного сопротивления r_0 для перепадов температуры: 1 – $\Delta T = 5$ К, 2 – $\Delta T = 10$ К, 3 – $\Delta T = 15$ К, 4 – $\Delta T = 20$ К, 5 – $\Delta T = 25$ К. Сплошные линии – длина ветви $h = 0.5$ мм, пунктирные линии – $h = 1$ мм. Температура теплопоглощающей поверхности $T_c = 25^\circ\text{C}$.

Таблица

Относительное снижение отопительного коэффициента K термоэлектрического модуля от величины контактного сопротивления r_0 для разных перепадов температуры T и высот ветвей h термоэлектрического материала

r_0 , Ом·см ²	h , мм	K ($T = 5^\circ\text{C}$)	K ($T = 10^\circ\text{C}$)	K ($T = 15^\circ\text{C}$)	K ($T = 20^\circ\text{C}$)	K ($T = 25^\circ\text{C}$)
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%

Продолжение таблицы

10^{-6}	1	<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		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%

Следовательно, из таблицы видно, что относительное изменение отопительного коэффициента слабо зависит от перепада температур и имеет резкую зависимость от величины контактного сопротивления и высоты ветви термоэлемента. Причем, для высоты ветви $h = 0.5$ мм изменение величины контактного сопротивления от 0 до 10^{-6} Ом·см² приводит к незначительному снижению отопительного коэффициента на $\sim 1.75 - 2.7$ %, а с 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² приводит к его значительному падению на $\sim 10 - 12$ %. Для высоты ветви $h = 1$ мм изменение величины контактного сопротивления от 0 до 10^{-6} Ом·см² приводит к снижению отопительного коэффициента на $\sim 0.6 - 0.8$ %, а с 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² приводит к его значительному падению на $\sim 6 - 10.4$ %.

Из выше сказанного можно сделать вывод о несомненной важности улучшения качества контактов при миниатюризации термоэлектрических модулей. Так снижение величины контактного сопротивления с $5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-6} Ом·см² эквивалентно уменьшению высоты ветви термоэлемента с 1 мм до 0.5 мм, что открывает возможности для последующего снижения массогабаритных показателей модулей и является важным для их практических применений.

Выводы

1. Установлено, что с увеличением величины контактного сопротивления возрастает влияние высоты ветви термоэлектрического материала на отопительный коэффициент термоэлектрического модуля.
2. Показано, что для высоты ветви $h = 0.5$ мм изменение величины контактного сопротивления с 0 до 10^{-6} Ом·см² приводит к снижению отопительного коэффициента на $\sim 1.75 - 2.7$ %, а с 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² приводит к его значительному падению на $\sim 10 - 12$ %; для высоты ветви $h = 1$ мм изменение величины контактного сопротивления с 0 до 10^{-6} Ом·см² ведет к снижению отопительного коэффициента на $\sim 0.6 - 0.8$ %, а с 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² приводит к его падению на $\sim 6 - 10.4$ %.
3. Определенно, что снижение величины контактного сопротивления с $5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-6} Ом·см² эквивалентно уменьшению высоты ветви термоэлемента от 1 мм до 0.5 мм, что открывает возможности для последующего уменьшения массогабаритных показателей модулей и является важным для их практического применения.

Литература

1. Anatyshuk L.I., Vihor L.N. The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. J. of Thermoelectricity. – 2013 – №5, С. 54-58.
2. Розвер Ю.Ю. Термоэлектрический кондиционер для транспортных средств //

- Термоэлектричество. – 2003. – № 2. – С. 52-56.
3. Анатычук Л.И., Вихор Л.Н., Розвер Ю.Ю. Исследование характеристик термоэлектрического охладителя потоков жидкости или газа // Термоэлектричество. – 2004 - № 1. – С. 73-80.
 4. Термоэлектрический тепловой насос как средство повышения эффективности систем очистки воды при космических полетах / Анатычук Л.И., Барабаш П.А., Риферт В.Г., Розвер Ю.Ю., Усенко В.И., Черкез Р.Г. // Термоэлектричество. – 2013. – № 6. – С. 78-83.
 5. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация системы питания термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2015. – №6. – С 53-58.
 6. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. О предельных возможностях термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №4. – С. 33-39.
 7. Анатычук Л.И., Вихор Л.Н., Прибыла А.В. Влияние миниатюризации на эффективность термоэлектрических модулей в режиме нагрева // Термоэлектричество. – 2018. – №4. – С. 38-45.
 8. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – в 2010. – 804 p.

Поступила в редакцию 17.09.2018.

Anatychuk L.I., *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2}

Vikhor L.M., *doctor Phys.- math. Sciences*¹

Prybyla A.V., *cand. Phys.- math. Sciences*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine, e-mail: anatych@gmail.com;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

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. 8, Fig. 1. Table 1.

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

References

1. Anatychuk 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. Anatychuk 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. Anatychuk 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. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 6, 53 – 58.
6. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2017). Limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 4, 33 – 39.
7. Anatychuk 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.

Submitted 17.09.2018.