

Анатичук Л.І.^{1,2}, Вихор Л.М.¹, Прибила А.В.^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна

ВПЛИВ МІНІАТЮРИЗАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ У РЕЖИМІ НАГРІВУ

У роботі наводяться результати розрахунків впливу мініатюризації на максимальний опалювальний коефіцієнт термоелектричного модуля для різних температурних умов його роботи. Проаналізовані можливості зменшення масогабаритних показників термоелектричного модуля в режимі нагріву за умови мінімальних втрат опалювального коефіцієнту. Бібл. 12, рис. 5.

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

Вступ

Загальна характеристика проблеми. На сьогодні термоелектричне охолодження і нагрів усе ширше застосовується завдяки своїм привабливим властивостям – відсутності шкідливих холодоагентів, безшумності роботи, можливостям працювати за довільної орієнтації в просторі й з високим ступенем точності підтримувати задані температурні режими. Термоелектричні перетворювачі використовуються для стабілізації температури різноманітних елементів електроніки, в побуті та медицині, для кондиціонування повітря в транспортних засобах, тощо [1 – 3]. Особливо актуальним є їх використання в космічній техніці, зокрема в приладах очищення води [4 – 10], де завдяки термоелектриці досягнуто коефіцієнт перетворення електричної енергії в теплову $K \approx 3$.

В роботах [6 – 10] проведено оптимізацію конструкції та системи живлення термоелектричного теплового насосу для приладу очищення води космічного призначення з метою досягнення максимальних значень коефіцієнту перетворення енергії. Проте питання зменшення маси та об'єму термоелектричних перетворювачів в режимі нагріву для приладів очищення води не розглядалося. А це є особливо важливо при їх використанні в космічних програмах на МКС та підготовці місії освоєння дальніх планет сонячної системи. Окрім того, необхідність мініатюризації диктується також міркуваннями зниження витрат термоелектричного матеріалу, що є найбільш дорогою частиною цих перетворювачів.

Метою роботи є дослідження впливу мініатюризації віток термоелементів на ефективність термоелектричних теплових насосів, які використовуються для нагріву потоків рідин та газів.

Фізична модель

Дослідження проведені із використанням фізичної моделі термоелектричного модуля в режимі нагріву (рис. 1). Вона складається із керамічних ізоляційних пластин 1, що виконують роль електричної ізоляції та проводять тепловий потік Q_h . Електричний струм I проходить через комутаційні пластини 2 та

вітки термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту (*BiTe*) *n*- і *p*- типу провідності 3. На контактах термоелектричного матеріалу і комутаційних пластин мають місце контактні шари 4, що призводять до додаткових контактних електричного та теплового опорів.

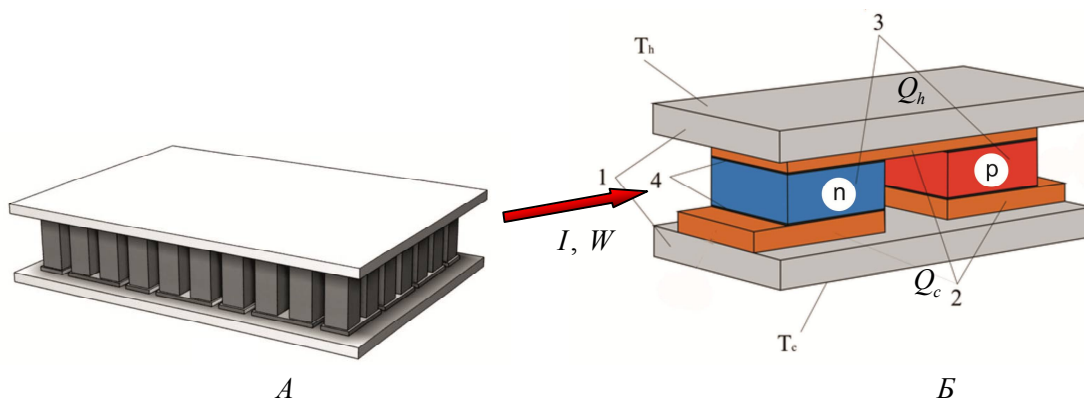


Рис.1. Термоелектричний модуль: А – схематичне зображення; Б – фрагмент елементарної секції модуля; 1 - ізоляційні пластини, 2 - комутаційні пластини, 3 - вітки термоелемента, 4 - контактні шари.

Для розрахунку термоелектричного модуля в режимі нагріву та визначення впливу мініатюаризації на його ефективність використано методи теорії оптимального керування [11, 12]. Нижче наведено детальний опис математичної моделі, що була використана при розрахунках.

Метод оптимального керування для розрахунку максимального опалювального коефіцієнту термоелектричного модуля

Очевидною є вимога, щоб параметри конструкції й струм живлення термоелектричного модуля теплового насосу відповідали умові максимального опалювального коефіцієнта K , який визначається за формулою

$$K = \frac{Q_h}{W} = \frac{Q_h}{Q_h - Q_c}, \quad (1)$$

де $W = Q_h - Q_c$ – споживана електрична потужність, Q_c , Q_h - зовнішні потоки тепла на холодній і гарячій поверхнях термоелектричного модуля відповідно. Це забезпечить нагрів теплоносія в робочому контурі теплового насосу з мінімальними витратами електроенергії.

Для оптимізації термоелектричних модулів в режимах охолодження і генерування електричної енергії успішно використовується теорія оптимального керування [11,12]. Цей метод легко узагальнюється і для розрахунку максимального опалювального коефіцієнту, яким характеризується режим теплового насосу.

Згідно з методами оптимального керування [11, 12], ефективність роботи термоелектричного модуля в режимі нагріву можна оцінити функціоналом

$$J = \ln \frac{Q_h}{Q_c} = \ln \frac{q_h}{q_c} = \ln q_h - \ln q_c, \quad (2)$$

де

$$q_h = \frac{Q_h}{n I}, \quad q_c = \frac{Q_c}{n I} \quad (3)$$

– відповідно питомі (віднесені до сили струму I) потоки тепла на гарячому і холодному спаях термопар, n – кількість термопар в батареї. Мінімум функціонал J відповідає максимальному значенню опалювального коефіцієнта K .

Для обчислення густин теплових потоків q_c , q_h використовується система рівнянь нерівноважної термодинаміки [11,12], яка для віток термоелементів n - і p -типу провідності має вигляд

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha j}{\kappa} T - \frac{q}{\kappa} \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha^2 j^2}{\kappa} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + \frac{j^2}{\sigma} \end{aligned} \right\}_{n,p}, \quad (4)$$

де $j = \frac{I}{S}$ – питома густина струму у вітках, S – переріз віток, I – величина струму живлення.

Коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності матеріалів віток є функціями температури: $\alpha_{n,p} = \alpha_{n,p}(T)$; $\sigma_{n,p} = \sigma_{n,p}(T)$; $\kappa_{n,p} = \kappa_{n,p}(T)$ і можуть бути задані на основі апроксимації експериментальних даних вимірювань характеристик термоелектричних матеріалів.

Розв'язок системи (4) для граничних умов

$$T_n(0) = T_p(0) = T_h, \quad T_n(l) = T_p(l) = T_c \quad (5)$$

дасть можливість розрахувати теплові потоки q_c , q_h , використовуючи співвідношення

$$\begin{aligned} q_c &= -\sum_{n,p} [q(l) + j^2 r_0], \\ q_h &= -\sum_{n,p} [q(0) - j^2 r_0], \end{aligned} \quad (6)$$

де l – висота віток термоелементів, r_0 – величина контактного опору на спаях термоелементів.

Зі співвідношень (6) випливає, що q_c , q_h залежать від параметрів густини струму в вітках термоелементів j , та від величини контактного опору. Відповідно до теорії оптимального керування значення $j_{n,p}$, що забезпечують мінімум функціонала J (2), мають задовольняти наступним умовам оптимальності

$$-\frac{\partial J}{\partial j} + \int_0^l \frac{\partial H(\psi, T, q, j)}{\partial j} dx = 0, \quad (7)$$

де функція Гамільтона H має вигляд

$$H = \sum_{n,p} (\psi_1 f_1 + \psi_2 f_2), \quad (8)$$

$(f_1, f_2)_{n,p}$ – праві частини рівнянь (4), $\psi = (\psi_1, \psi_2)_{n,p}$ – вектор імпульсів, метод визначення якого викладений в [1,2].

Співвідношення (1) - (7) є основою для комп'ютерного проектування оптимальних конструкцій та розрахунку оптимальних параметрів термоелектричних модулів в режимі нагріву для теплових насосів.

Алгоритм розрахунку максимального опалювального коефіцієнту реалізується чисельними методами за допомогою засобів комп'ютерного моделювання. При цьому розраховуються оптимальна густина струму у вітках термоелементів j і теплові потоки q_c , q_h , які їм відповідають, та визначається максимальне значення опалювального коефіцієнта $K = \exp J / (\exp J - 1)$.

Розроблений комп'ютерний засіб дає можливість визначити максимальне значення опалювального коефіцієнту, враховуючи електричні втрати в контактах термоелементів.

Результати комп'ютерного моделювання

Таким чином, були розраховані залежності максимального опалювального коефіцієнту термоелектричного модуля від висоти віток термоелементів для різних перепадів температур та температур теплопоглинаючої поверхні. Робочі температури вибиралися із реальних теплових умов роботи термоелектричного теплового насоса приладу очищення води космічного призначення [6, 7]. Величина контактної опору рівна $r_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

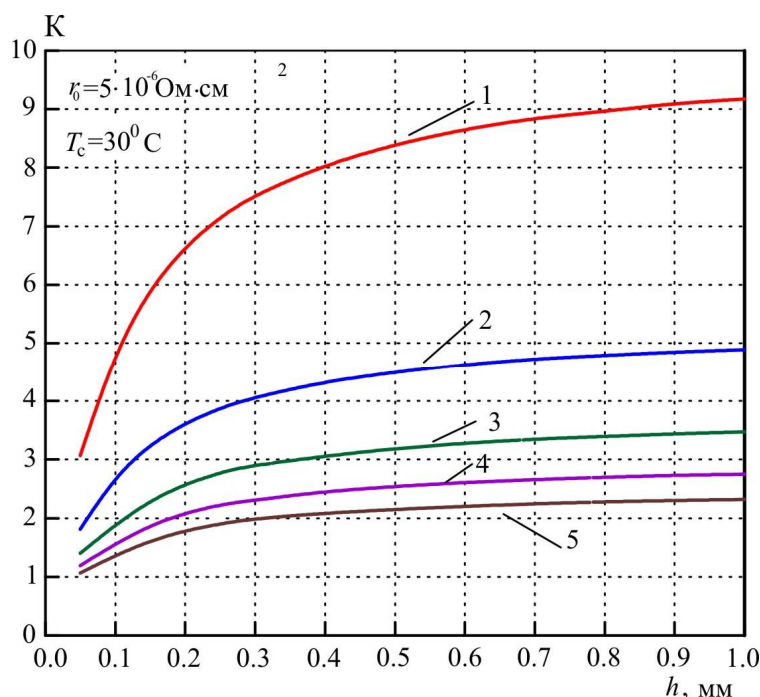


Рис.2. Залежності опалювального коефіцієнта K термоелектричного модуля від висоти віток термоелементів для перепадів температури 1 – $\Delta T=5$ K, 2 – $\Delta T=10$ K, 3 – $\Delta T=15$ K, 4 – $\Delta T=20$ K, 5 – $\Delta T=25$ K. Температура теплопоглинаючої поверхні $T_c=30^\circ\text{C}$

На рис.2 наведено залежність опалювального коефіцієнту термоелектричного модуля від висоти віток термоелементів для перепадів температур $\Delta T=5 - 25$ K за температури теплопоглинаючої поверхні $T_c=30^\circ\text{C}$. Як видно з рисунку, величина опалювального коефіцієнту термоелектричного модуля у діапазоні висот віток термоелементів від 1 до 0.5 мм знижується поступово на $\sim 7 - 8\%$, а від 0.5 до 0.05 мм відносне зниження опалювального коефіцієнту складає вже $\sim 50 - 63\%$ в залежності від значень перепадів температур.

На рис.3 наведено подібну залежність опалювального коефіцієнту термоелектричного модуля від висоти віток термоелементів для перепадів температур $\Delta T=5 - 25$ K за температури теплопоглинаючої поверхні $T_c=27.5^\circ\text{C}$. Як видно з рисунку, якісно картина зміни величини опалювального коефіцієнту повторює залежність зображену на рис. 2, проте значення опалювального коефіцієнту дещо нижчі (на 1 - 2 %), що пов'язано із температурною залежністю параметрів термоелектричного матеріалу.

За температури теплопоглинаючої поверхні $T_c=25^\circ\text{C}$ (рис. 4) відносне зменшення опалювального коефіцієнту складає вже 2 - 3 %, а при $T_c=22.5^\circ\text{C}$ (рис. 5) – 4 - 5 %.

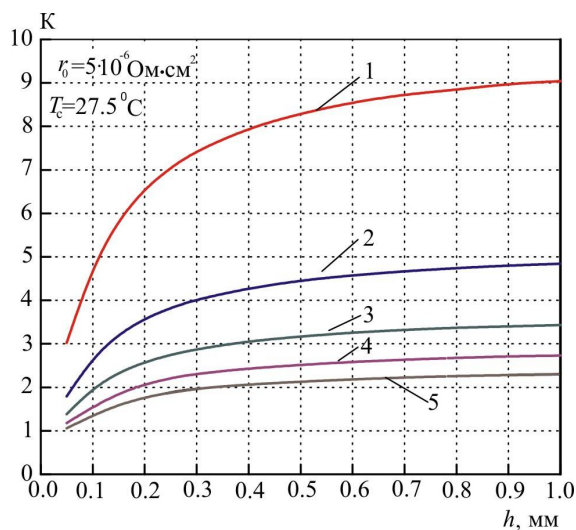


Рис.3. Залежності опалювального коефіцієнта K термоелектричного модуля від висоти віток термоелементів для перепадів температури 1 – $\Delta T = 5 \text{ K}$, 2 – $\Delta T = 10 \text{ K}$, 3 – $\Delta T = 15 \text{ K}$, 4 – $\Delta T = 20 \text{ K}$, 5 – $\Delta T = 25 \text{ K}$. Температура теплопоглинаючої поверхні $T_c = 27.5^\circ \text{C}$

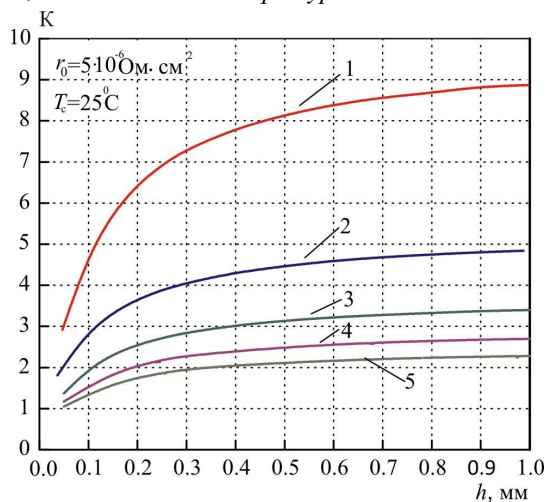


Рис.4. Залежності опалювального коефіцієнта K термоелектричного модуля від висоти віток термоелементів для перепадів температури 1 – $\Delta T = 5 \text{ K}$, 2 – $\Delta T = 10 \text{ K}$, 3 – $\Delta T = 15 \text{ K}$, 4 – $\Delta T = 20 \text{ K}$, 5 – $\Delta T = 25 \text{ K}$. Температура теплопоглинаючої поверхні $T_c = 25^\circ \text{C}$

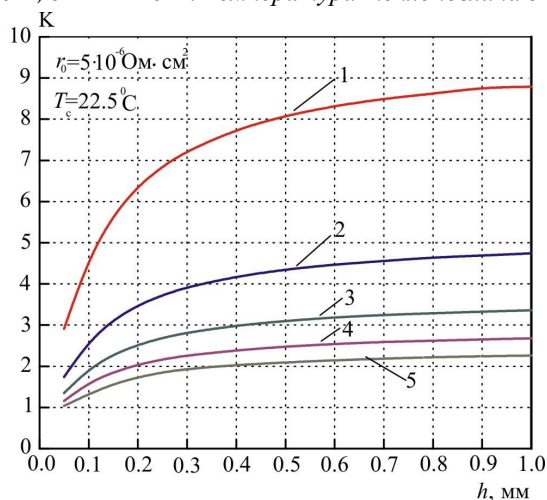


Рис.5. Залежності опалювального коефіцієнта K термоелектричного модуля від висоти віток термоелементів для перепадів температури 1 – $\Delta T = 5 \text{ K}$, 2 – $\Delta T = 10 \text{ K}$, 3 – $\Delta T = 15 \text{ K}$, 4 – $\Delta T = 20 \text{ K}$, 5 – $\Delta T = 25 \text{ K}$. Температура теплопоглинаючої поверхні $T_c = 22.5^\circ \text{C}$

Отже, в результаті розрахунків встановлено, що в заданому інтервалі температур опалювальний коефіцієнт термоелектричного модуля в основному залежить від перепаду температур ΔT і слабо залежить від абсолютного значення температури його теплопоглинаючої поверхні T_c . При мініатюризації термоелектричного модуля величина його опалювального коефіцієнту у діапазоні висот віток термоелементів від 1 до 0.5 мм знижується поступово на $\sim 7 - 8\%$, а від 0.5 до 0.05 мм відносне зниження опалювального коефіцієнту складає вже $\sim 50 - 63\%$. Це дозволяє визначити оптимальну висоту віток термоелектричного модуля $h = 0.5$ мм, за якої вплив мініатюризації буде найменше впливати на його ефективність.

Висновки

1. Встановлено, що в заданому інтервалі температур опалювальний коефіцієнт термоелектричного модуля в основному залежить від перепаду температур ΔT і слабо залежить від абсолютного значення температури його теплопоглинаючої поверхні
2. Розраховано, що величина опалювального коефіцієнту термоелектричного модуля у діапазоні висот віток термоелементів від 1 до 0.5 мм знижується поступово на $\sim 7 - 8\%$, а від 0.5 до 0.05 мм відносне зниження опалювального коефіцієнту складає вже $\sim 50 - 63\%$.
3. Визначено оптимальну висоту віток термоелектричного модуля $h = 0.5$ мм, за якої вплив мініатюризації буде найменше впливати на його ефективність.

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.И., Вихор Л.Н., Розвер Ю.Ю. Исследование характеристик термоэлектрического охладителя потоков жидкости или газа // Термоэлектричество. – № 1. – 2004. – С. 73 – 80.
4. Разработка и испытание системы регенерации воды из жидких отходов жизнедеятельности на борту пилотируемых космических аппаратов с использованием термоэлектрического теплового насоса / В.Г. Риферт, В.И. Усенко, П.А. Барабаш [и др.] // Термоэлектричество. – 2011. – № 2. – С. 63 – 74.
5. Термоэлектрический тепловой насос как средство повышения эффективности систем очистки воды при космических полетах / Анатичук Л.И., Барабаш П.А., Риферт В.Г., Розвер Ю.Ю., Усенко В.И., Черкез Р.Г. // Термоэлектричество. – 2013. – № 6. – С. 78 – 83.
6. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Оптимізація теплової комутації в термоелектричних теплових насосах рідина-рідина для приладів очищення води космічного призначення // Термоелектрика. – 2015. №4. – С 45 – 51.
7. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Оптимізація системи живлення термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2015. №6. – С 53 – 58.
8. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про граничні можливості термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. – №4. – С. 33 – 39.
9. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про вплив якості теплообмінників на властивості термоелектричних теплових насосів рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. №5. – С. 27 – 33.
10. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про холодильний коефіцієнт термоелектричних теплових насосів рідина-рідина з врахуванням енергії на переміщення теплоносія // Термоелектрика. – 2017. №6. – С. 30– 36.

11. Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. – Черновцы: Прут, 1992. 263 с.
12. Струтинский М.М. Компьютерные технологии в термоэлектричестве. // Термоэлектричество. – 2009. - №4. – С. 31-47.

Надійшла до редакції .11.07.2018

Анатычук Л.И. *акад. НАН України,*^{1,2}
Вихор Л.Н. *докт. физ.-мат. наук*¹
Прибыла А.В. *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України,
ул. Науки, 1, Черновці, 58029, Україна,
e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицький національний університет
ім. Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського, 2,
Черновці, 58012, Україна

ВЛИЯНИЕ МИНИАТЮРИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В РЕЖИМЕ НАГРЕВА

В работе приводятся результаты расчетов влияния миниатюризации на максимальный отопительный коэффициент термоэлектрического модуля для различных температурных условий его работы. Проанализированы возможности уменьшения массогабаритных показателей термоэлектрического модуля в режиме нагрева при условии минимальных потерь отопительного коэффициента. Библ. 12, рис. 5.

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

L.I. Anatyshuk,^{1,2} *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*
Vikhor L.M.¹, *doctor Phys.-math. Science*
A.V.Prybyla,^{1,2} *cand. Phys.-math. Science*

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

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

EFFECT OF MINIATURIZATION ON THE EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC MODULES IN HEATING MODE

The paper presents the results of calculations of the effect of miniaturization on the maximum heating coefficient of a thermoelectric module for various temperature conditions of its operation. The possibilities of reducing the mass and size parameters of the thermoelectric module in the heating mode with minimal heating coefficient losses are analyzed. Bibl. 12, Fig. 5.

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. Rifert V.G., Usenko V.I., Barabash P.A., et al. (2011). Razrabotka i ispytaniie sistemy regeneratsii vody iz zhidkikh othodov zhiznedielatnosti na bortu pilotiruemykh kosmicheskikh apparatov s ispolzovaniem termoelektricheskogo teplovogo nasosa [Development and test of water regeneration system from liquid biowaste on board of manned spacecrafts with the use of thermoelectric heat pump]. *Termoelektrichestvo – J. Thermoelectricity*, 2, 63-74 [in Russian].
5. Anatyshuk L.I., Barabash P.A., Rifert V.G., Rozver Yu.Yu., Usenko V.I., Cherkez V.G. (2013). Thermoelectric heat pump as a means of improving efficiency of water purification system on space missions. *J. Thermoelectricity*, 6, 78 – 83.
6. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimization of thermal connections in liquid-liquid thermoelectric heat pumps for water purification devices of space application. *J. Thermoelectricity*, 4, 45 – 51.
7. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 6, 53 – 58.
8. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). Limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 4, 33 – 39.
9. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). The influence of quality of heat exchangers on the properties of thermoelectric liquid-liquid heat pumps. *J. Thermoelectricity*, 5, 27 – 33.
10. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). On the coefficient of performance of thermoelectric liquid-liquid heat pumps with regard to energy loss for heat carrier transfer. *J. Thermoelectricity*, 6, 30– 36.
11. Anatyshuk L.I., Semeniuk V.A. (1992). *Optimalnoie upravleniie svoistvami termoelektricheskikh materialovi i priborov [Optimal control of the properties of thermoelectric materials and devices]*. Chernivtsi: Prut [in Russian].
12. Strutynskiy M.M. (2009). Computer technologies in thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 4, 31-47.

Submitted 11.07.18