

УДК 536.24

**Анатычук Л.И.** *акад. НАН Украины*, <sup>1,2</sup>

**Вихор Л.Н.** *докт. физ.-мат. наук* <sup>1</sup>

**Прибыла А.В.** *канд. физ.-мат. наук* <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,

ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,

*e-mail: anatyuch@gmail.com;*

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет

им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,

Черновцы, 58012, Украина

## **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.

### **Вступление**

*Общая характеристика проблемы.* На сегодня термоэлектрическое охлаждение и нагрев все шире применяется благодаря своим привлекательным свойствам – отсутствию вредных хладагентов, бесшумности работы, возможности работать при произвольной ориентации в пространстве и с высокой степенью точности поддерживать заданные температурные режимы. Термоэлектрические преобразователи используются для стабилизации температуры разнообразных элементов электроники, в быту и медицине, для кондиционирования воздуха в транспортных средствах и тому подобное [1 – 3]. Особенно актуальным является их использование в космической технике, в частности в приборах очистки воды [4 – 10], где благодаря термоэлектричеству достигнут коэффициент превращения электрической энергии в тепловую  $K \approx 3$ .

В работах [6 – 10] проведена оптимизация конструкции и системы питания термоэлектрического теплового насоса для прибора очистки воды космического назначения с целью достижения максимальных значений коэффициента превращения энергии. Однако вопрос уменьшения массы и объема термоэлектрических преобразователей в режиме нагрева для приборов очистки воды не рассматривался. А это особенно важно при их использовании в космических программах на МКС и подготовке миссий освоения дальних планет солнечной системы. Кроме того, необходимость миниатюризации диктуется также соображениями снижения расходов термоэлектрического материала, которые являются наиболее

дорогостоящей частью этих преобразователей.

Целью работы является исследование влияния миниатюризации ветвей термоэлементов на эффективность термоэлектрических тепловых насосов, которые используются для нагрева потоков жидкостей и газов.

### Физическая модель

Исследования проведены с использованием физической модели термоэлектрического модуля в режиме нагрева (рис.1). Она состоит из керамических изоляционных пластин 1, выполняющих роль электрической изоляции и проводящих тепловой поток  $Q_h$ . Электрический ток  $I$  проходит через коммутационные пластины 2 и ветви термоэлектрического материала на основе теллурида висмута ( $BiTe$ )  $n$ - и  $p$ - типов проводимости 3. На контактах термоэлектрического материала и коммутационных пластин имеются контактные слои 4, которые приводят к дополнительным контактным электрическому и тепловому сопротивлениям.

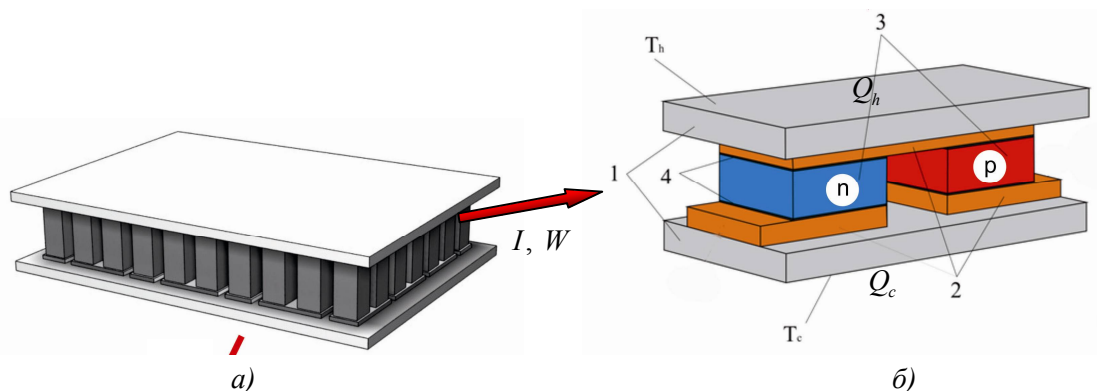


Рис. 1. Термоэлектрический модуль: а) – схематическое изображение; б) – фрагмент элементарной секции модуля; 1 - изоляционные пластины, 2 - коммутационные пластины, 3 - ветви термоэлемента, 4 - контактные слои.

Для расчета термоэлектрического модуля в режиме нагрева и определения влияния миниатюризации на его эффективность использованы методы теории оптимального управления [11, 12]. Ниже приведено детальное описание математической модели, которая была использована при расчетах.

### Метод оптимального управления для расчета максимального отопительного коэффициента термоэлектрического модуля

Очевидным является требование, чтобы параметры конструкции и ток питания термоэлектрического модуля теплового насоса отвечали условию максимума отопительного коэффициента  $K$ , определяемого формулой

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

где  $W = Q_h - Q_c$  – потребляемая электрическая мощность;  $Q_c$ ,  $Q_h$  – внешние потоки тепла на холодной и горячей поверхностях термоэлектрического модуля, соответственно. Это обеспечит нагрев теплоносителя в рабочем контуре теплового насоса при минимальном расходе электроэнергии.

Для оптимизации термоэлектрических модулей в режимах охлаждения и генерирования электрической энергии успешно используется теория оптимального управления [11,12]. Этот метод легко обобщается и для расчета максимального отопительного коэффициента, которым характеризуется режим теплового насоса.

Согласно методам оптимального управления [11, 12], эффективность работы термоэлектрического модуля в режиме нагрева можно оценить функционалом

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

где

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

- соответственно удельные (отнесенные к силе тока  $I$ ) потоки тепла на горячем и холодном спаях термопар,  $n$  – количество термопар в батарее. Минимум функционала  $J$  отвечает максимальному значению отопительного коэффициента  $K$ .

Для вычисления плотностей тепловых потоков  $q_c$ ,  $q_h$  используется система уравнений неравновесной термодинамики [11,12], которая для ветвей термоэлементов  $n$ - и  $p$ -типов проводимости имеет вид

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

где  $j = \frac{I}{S}$  – удельная плотность тока в ветвях,  $S$  – сечение ветвей,  $I$  – величина тока питания.

Коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности материалов ветвей являются функциями температуры:  $n,p = n,p(T)$  и могут быть заданы на основе аппроксимации экспериментальных данных измерений характеристик термоэлектрических материалов.

Решение системы (4) для предельных условий

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

даст возможность рассчитать тепловые потоки  $q_c$ ,  $q_h$ , используя соотношения

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

где  $l$  – высота ветвей термоэлементов,  $r_0$  – величина контактного сопротивления на спаях термоэлементов.

Из соотношений (6) вытекает, что  $q_c$ ,  $q_h$  зависят от параметров плотности тока в ветвях термоэлементов  $j$  и от величины контактного сопротивления. В соответствии с теорией оптимального управления значения  $j_{n,p}$ , обеспечивающие минимум функционала  $J$  (2),

должны удовлетворять следующим условиям оптимума

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

где функция Гамильтона  $H$  имеет вид

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

$(f_1, f_2)_{n,p}$  – правые части уравнений (4);  $\psi = (\psi_1, \psi_2)_{n,p}$  – вектор импульсов, метод определения которого изложен в [1, 2].

Соотношения (1)–(8) являются основой для компьютерного проектирования оптимальных конструкций и расчета оптимальных параметров термоэлектрических модулей в режиме нагрева для тепловых насосов.

Алгоритм расчета максимального отопительного коэффициента реализуется численными методами с помощью средств компьютерного моделирования. При этом рассчитываются оптимальные плотности тока в ветвях термоэлементов  $j$  и тепловые потоки  $q_c, q_h$ , которые им отвечают, и определяется максимальное значение отопительного коэффициента.

Разработанный компьютерный метод дает возможность определить максимальное значение отопительного коэффициента, учитывая электрические потери в контактах термоэлементов.

## Результаты компьютерного моделирования

Таким образом, были рассчитаны зависимости максимального отопительного коэффициента термоэлектрического модуля от высоты ветвей термоэлементов для разных перепадов температур и температур теплопоглощающей поверхности. Рабочие температуры выбирались из реальных тепловых условий работы термоэлектрического теплового насоса прибора очистки воды космического назначения [6, 7]. Величина контактного сопротивления равнялась  $r_0 = 5 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>.

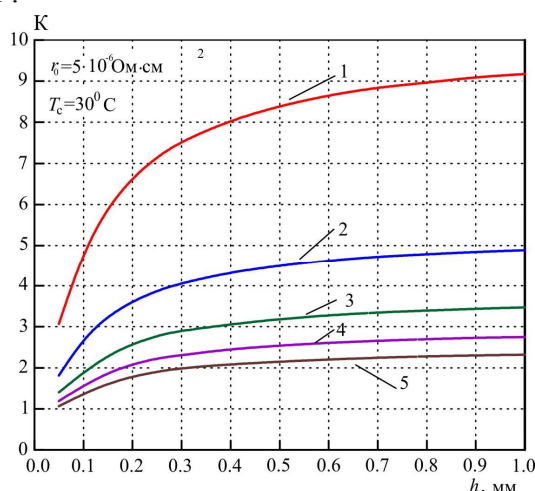


Рис. 2. Зависимости отопительного коэффициента  $K$  термоэлектрического модуля от высоты ветвей термоэлементов для перепадов температуры  
1 –  $\Delta T = 5$  К, 2 –  $\Delta T = 10$  К, 3 –  $\Delta T = 15$  К, 4 –  $\Delta T = 20$  К, 5 –  $\Delta T = 25$  К.

Температура теплопоглощающей поверхности  $T_c = 30$  °С.

На рис. 2 приведена зависимость отопительного коэффициента термоэлектрического модуля от высоты ветвей термоэлементов для перепадов температур  $\Delta T = 5 - 25$  К при температуре теплопоглощающей поверхности  $T_c = 30$  °С. Как видно из рисунка, величина отопительного коэффициента термоэлектрического модуля в диапазоне высот ветвей термоэлементов от 1 до 0.5 мм снижается постепенно на  $\sim 7 - 8\%$ , а от 0.5 до 0.05 мм относительное снижение отопительного коэффициента составляет уже  $\sim 50 - 63\%$  в зависимости от значений перепадов температур.

На рис. 3 приведена подобная зависимость отопительного коэффициента термоэлектрического модуля от высоты ветвей термоэлементов для перепадов температур  $\Delta T = 5 - 25$  К при температуре теплопоглощающей поверхности  $T_c = 27.5$  °С. Как видно из рисунка, качественно картина изменения величины отопительного коэффициента повторяет зависимость, изображенную на рис. 2, однако значения отопительного коэффициента несколько ниже (на 1 - 2 %), что связано с температурными зависимостями параметров термоэлектрического материала.

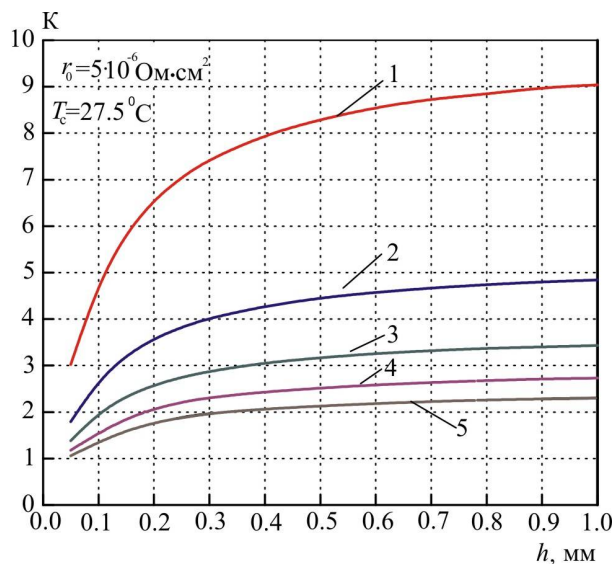


Рис. 3. Зависимости отопительного коэффициента  $K$  термоэлектрического модуля от высоты ветвей термоэлементов для перепадов температуры 1 –  $\Delta T = 5$  К, 2 –  $\Delta T = 10$  К, 3 –  $\Delta T = 15$  К, 4 –  $\Delta T = 20$  К, 5 –  $\Delta T = 25$  К. Температура теплопоглощающей поверхности  $T_c = 27.5$  °С.

При температуре теплопоглощающей поверхности  $T_c = 25$  °С (рис.4) относительное уменьшение отопительного коэффициента составляет уже 2 - 3 %, а при  $T_c = 22.5$  °С (рис.5) – 4 - 5 %.

Следовательно, в результате расчетов установлено, что в заданном интервале температур отопительный коэффициент термоэлектрического модуля в основном зависит от перепада температур  $\Delta T$  и слабо зависит от абсолютного значения температуры его теплопоглощающей поверхности  $T_c$ . При миниатюризации термоэлектрического модуля величина его отопительного коэффициента в диапазоне высот ветвей термоэлементов от 1 до 0.5 мм снижается постепенно на  $\sim 7 - 8\%$ , а от 0.5 до 0.05 мм относительное снижение отопительного коэффициента составляет уже  $\sim 50 - 63\%$ . Это позволяет определить оптимальную высоту ветвей термоэлектрического модуля  $h = 0.5$  мм, при которой миниатюризация будет менее всего влиять на его эффективность.

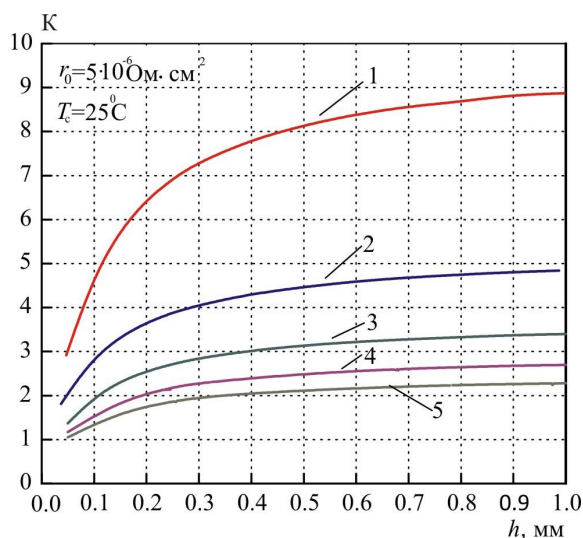


Рис.4. Зависимости отопительного коэффициента  $K$  термоэлектрического модуля от высоты ветвей термоэлементов для перепадов температуры  
 1 –  $\Delta T = 5$  K, 2 –  $\Delta T = 10$  K, 3 –  $\Delta T = 15$  K,  
 4 –  $\Delta T = 20$  K, 5 –  $\Delta T = 25$  K. Температура теплопоглощающей поверхности  $T_c = 25$  °C.

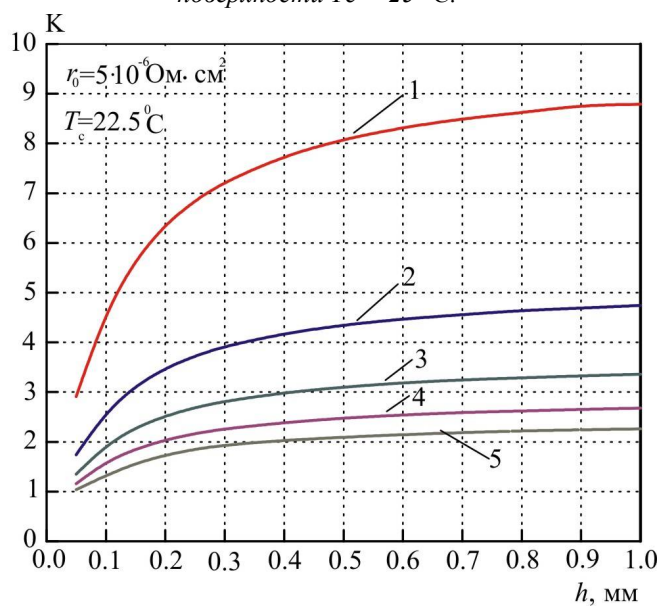


Рис.5. Зависимости отопительного коэффициента  $K$  термоэлектрического модуля от высоты ветвей термоэлементов для перепадов температуры  
 1 –  $\Delta T = 5$  K, 2 –  $\Delta T = 10$  K, 3 –  $\Delta T = 15$  K, 4 –  $\Delta T = 20$  K, 5 –  $\Delta T = 25$  K.  
 Температура теплопоглощающей поверхности  $T_c = 22.5$  °C.

## Выводы

1. Установлено, что в заданном интервале температур отопительный коэффициент термоэлектрического модуля в основном зависит от перепада температур  $\Delta T$  и слабо зависит от абсолютного значения температуры его теплопоглощающей поверхности
2. Расчетным путем показано, что величина отопительного коэффициента термоэлектрического

модуля в диапазоне высот ветвей термоэлементов от 1 до 0.5 мм снижается постепенно на ~ 7 - 8%, а от 0.5 до 0.05 мм относительное снижение отопительного коэффициента составляет уже ~ 50 – 63 %.

3. Определена оптимальная высота ветвей термоэлектрического модуля  $h = 0.5$  мм, при которой миниатюризация менее всего влияет на его эффективность.

## **Литература**

1. Anatyчук L.I., Vihor L.N., The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. J. of Thermoelectricity, 2013 №5, г. 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. 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 / Анатычук Л.И., Барабаш П.А., Риферт В.Г., Розвер Ю.Ю., Усенко В.И., Черкез Р.Г. // Термоэлектричество. – 2013. – № 6. – С. 78 - 83.
6. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация тепловой коммутации в термоэлектрических тепловых насосах жидкость-жидкость для приборов очистки воды космического назначения // Термоэлектричество. – 2015. – №4. – С. 45 – 51.
7. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация системы питания термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2015. – №6. – С. 53 - 58.
8. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. О предельных возможностях термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №4. – С. 33 - 39.
9. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. О влиянии качества теплообменников на свойства термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №5. – С. 27 – 33.
10. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. О холодильном коэффициенте термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость с учетом энергии на перемещение теплоносителя // Термоэлектричество. – 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.

Поступила в редакцию 11.07.18

**L.I. Anatyshuk**, *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*<sup>1,2</sup>

**Vikhor L.M.**, *doctor Phys.-math. Science*<sup>1</sup>

**A.V.Prybyla**, *cand. Phys.-math. Science*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine,  
*e-mail: anatysh@gmail.com*

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsiubynskyi 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 ispytaniye sistemy regeneratsii vody iz zhidkikh othodov zhiznedeiatelnosti 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. Anatychuk 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. Anatychuk 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