

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ¹, д. т. н. В. И. МЕЩЕРЯКОВ²,
к. т. н. А. А. ГНАТОВСКАЯ², Ю. И. ЖУРАВЛЕВ³

Украина, г. Одесса, ¹НИИ «Шторм», ²Одесский государственный экологический университет,

³Одесская национальная морская академия

E-mail: gradan@ua.fm

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ. ЧАСТЬ I: ОДНОКАСКАДНЫЕ ТЭУ

Рассмотрено влияние термоэлектрической эффективности исходных материалов модулей на показатели надежности термоэлектрического охлаждающего устройства (ТЭУ), функционирующего в граничных токовых режимах ($Q_{0\max}$ и $\lambda_{\min}$) при различных значениях перепада температуры. Показано, что с ростом термоэлектрической эффективности материалов в модуле уменьшается интенсивность отказов ТЭУ, а следовательно, увеличивается вероятность его безотказной работы.

Ключевые слова: термоэлектрическое устройство, надежность, интенсивность отказов, эффективность, температура, рабочий ток.

Одним из основных направлений развития и совершенствования современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является миниатюризация элементов твердотельной электроники, что приводит к увеличению удельных тепловых потоков и снижению надежности ее функционирования. Одним из наиболее приемлемых способов обеспечения теплового режима элементов и составных частей РЭА является термоэлектрический. Основное его преимущество перед другими способами охлаждения заключается в высокой надежности, малых габаритных размерах, простоте управления и быстродействии. Эти преимущества по своей сути являются следствием твердотельной природы таких охладителей, т. е. отсутствием движущихся частей, перекачиваемых жидкостей или газов. В настоящее время термоэлектрический способ охлаждения широко применяется в радиоэлектронике, квантовой оптике, СВЧ-технике, информационных системах и т. д.

К одному из основных требований, предъявляемых при проектировании современной РЭА, следует отнести обеспечение высокого уровня ее надежности, что напрямую связано с повышением надежности составляющих ее элементов, в том числе и термоэлектрических охлаждающих устройств (ТЭУ). Вопросам оценки и прогнозирования показателей надежности ТЭУ посвящен ряд работ [1–7], но они в основном относятся к конструктивному способу повышения показателей надежности (выбор режима работы). Что же касается параметрического метода повышения надежности, такие данные в литературе отсутствуют.

Одним из возможных направлений параметрического метода повышения надежности ТЭУ является улучшение качества исходных термоэлектрических материалов и, в первую очередь,

их эффективности. Одной из основных характеристик ТЭУ традиционно считается максимальный перепад температуры $\Delta T_{\max}$, который определяется эффективностью Z_M исходных материалов и температурой теплопоглощающего спая T_0 [8]:

$$\Delta T_{\max} = 0,5 Z_M T_0^2. \quad (1)$$

Целью настоящей работы является анализ влияния термоэлектрической эффективности исходных материалов модулей однокаскадных ТЭУ на такие показатели их надежности, как интенсивность отказов и вероятность безотказной работы при $T = 300$ К.

Исследования проводились для следующих усредненных значений термоэлектрической эффективности исходных материалов Z_M при различных значениях рабочего перепада температуры ΔT :

$Z_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К, $\Delta T = 65$ К (для условий серийного производства);

$Z_M = 2,6 \cdot 10^{-3}$ 1/К, $\Delta T = 68$ К (для лабораторных условий);

$Z_M = 2,75 \cdot 10^{-3}$ 1/К, $\Delta T = 72$ К (максимальное значение).

С ростом термоэлектрической эффективности исходных материалов увеличивается максимальный перепад температуры, а следовательно, уменьшается относительный перепад температуры, увеличивается холодопроизводительность одного термоэлемента, что позволяет уменьшить количество термоэлементов. Все это приводит к улучшению показателей надежности — уменьшению интенсивности отказов λ и увеличению вероятности безотказной работы P .

Для определения λ и P воспользуемся моделью взаимосвязи показателей надежности и основных значимых параметров однокаскадного ТЭУ [4, с. 22–25].

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Относительную величину интенсивности отказов можно записать в виде

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{n B^2 (\theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \theta \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \theta \right)^2} K_T, \quad (2)$$

где λ_0 — номинальная интенсивность отказов (1/ч);
 B — относительный рабочий ток, $B=I/I_{\max}$;
 I — рабочий ток (А);
 $I_{\max}$ — максимальный рабочий ток (А), $I_{\max} = eT_0/R$;
 e, R — соответственно, коэффициент термоэдс (В/К) и электрическое сопротивление ветви термоэлемента (Ом);
 θ — относительный перепад температуры,
 $\theta = \Delta T / \Delta T_{\max} = (T - T_0) / \Delta T_{\max}$;
 C — относительная тепловая нагрузка,
 $C = Q_0 / (n I_{\max}^2 R)$
 n — количество термоэлементов;
 Q_0 — тепловая нагрузка (Вт);
 K_T — коэффициент значимости, учитывающий влияние пониженных температур.

Вероятность безотказной работы ТЭУ можно записать в виде:

$$P = \exp(-\lambda t), \quad (3)$$

где t — назначенный ресурс.

В **таблице** приведены результаты расчетов основных значимых параметров показателей надежности однокаскадных ТЭУ в режиме максимальной холодопроизводительности ($Q_{0\max}$) и в режиме минимальной интенсивности отказов ($\lambda_{\min}$) при следующих исходных данных: $Q_0 = 2,0$ Вт; $\Delta T = 40, 50, 60$ К; отношение длины термоэлемента к площади его сечения $l/S = 10$ см⁻¹; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч. (Выбор режимов $Q_{0\max}$ и $\lambda_{\min}$ обусловлен их максимальным отличием по λ .)

Анализ расчетных данных показал, что для различных значений заданного перепада температуры ΔT рост термоэлектрической эффективности в интервале $(2,4 - 2,75) \cdot 10^{-3}$ 1/К при $T = 300$ К приводит к следующему:

- увеличивается в среднем на 18% максимальный перепад температуры (**рис. 1**);
- увеличивается до 30% максимальный рабочий ток;

Основные значимые параметры показателей надежности однокаскадных ТЭУ

Режим работы	I, A	θ	B	E	n	$\lambda, 10^{-8} 1/ч$	P
$\Delta T=40 K$							
$Z_M=2,4 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	4,92	0,500	1,00	0,22	15,9	48,70	0,9951
λ_{min}	2,00		0,41	0,33	52,3	4,18	0,9996
$Z_M=2,6 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	6,00	0,455	1,00	0,24	11,6	35,50	0,9964
λ_{min}	2,20		0,37	0,38	42,8	2,24	0,9998
$Z_M=2,75 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	6,55	0,430	1,00	0,25	9,80	30,00	0,9970
λ_{min}	2,30		0,35	0,42	37,9	1,58	0,9998
$\Delta T=50 K$							
$Z_M=2,4 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	4,70	0,70	1,00	0,125	29,6	91,30	0,9909
λ_{min}	2,82		0,60	0,145	63,4	26,35	0,9974
$Z_M=2,6 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	5,50	0,63	1,00	0,150	19,6	60,45	0,9940
λ_{min}	2,94		0,54	0,200	47,2	12,30	0,9988
$Z_M=2,75 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	6,05	0,59	1,00	0,170	15,7	48,40	0,9952
λ_{min}	3,00		0,50	0,230	40,3	7,92	0,9992
$\Delta T=60 K$							
$Z_M=2,4 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	4,56	0,91	1,00	0,034	106,9	332,0	0,9673
λ_{min}	3,80		0,83	0,036	157,7	244,5	0,9758
$Z_M=2,6 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	5,43	0,82	1,00	0,072	43,7	135,6	0,9865
λ_{min}	4,00		0,73	0,075	73,5	69,3	0,9931
$Z_M=2,75 \cdot 10^{-3} 1/K$							
Q_{0max}	5,87	0,77	1,00	0,092	30,6	95,0	0,9905
λ_{min}	4,00		0,68	0,100	55,1	39,3	0,9961

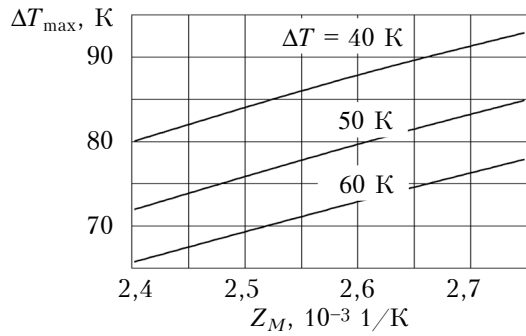


Рис. 1. Зависимость максимального перепада температуры от Z_M модуля однокаскадного ТЭУ при $T = 300$ К и различных значениях ΔT

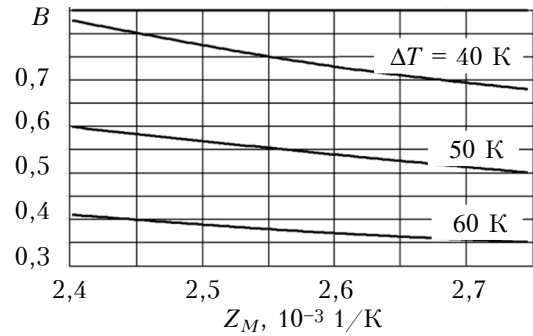


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока однокаскадного ТЭУ от Z_M модуля для режима $\lambda_{\min}$ при $T = 300$ К и различных значениях ΔT

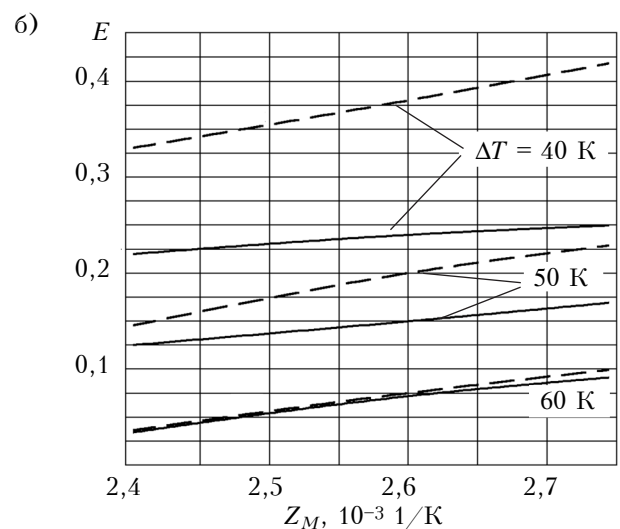
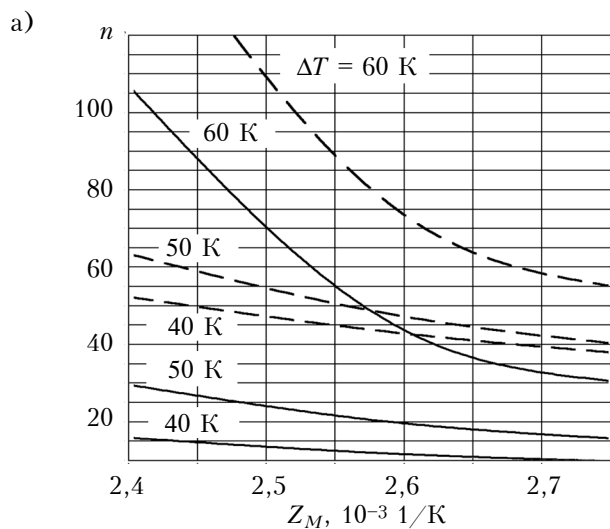


Рис. 3. Зависимость количества термоэлементов (а) и холодильного коэффициента E (б) от Z_M модуля однокаскадного ТЭУ для режимов $Q_{0\max}$ (сплошные линии) и $\lambda_{\min}$ (пунктир) при $T = 300$ К и различных значениях ΔT

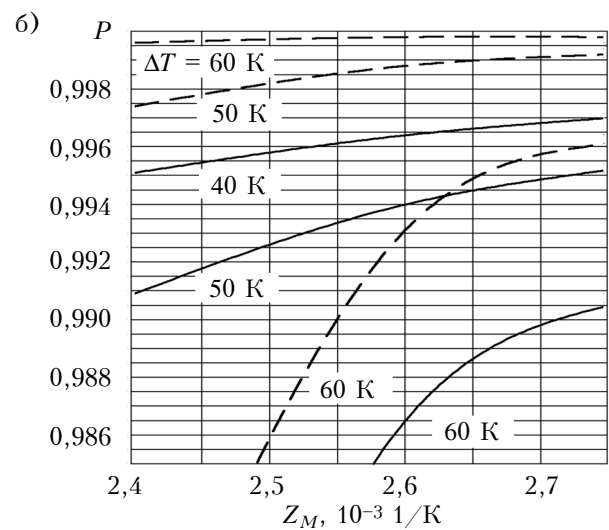
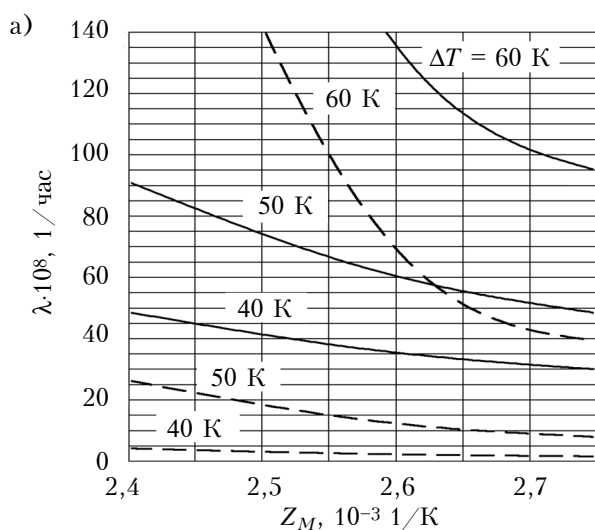


Рис. 4. Зависимость интенсивности отказов (а) и вероятности безотказной работы (б) от Z_M модуля однокаскадного ТЭУ для режимов $Q_{0\max}$ (сплошные линии) и $\lambda_{\min}$ (пунктир) при $T = 300$ К и различных значениях ΔT

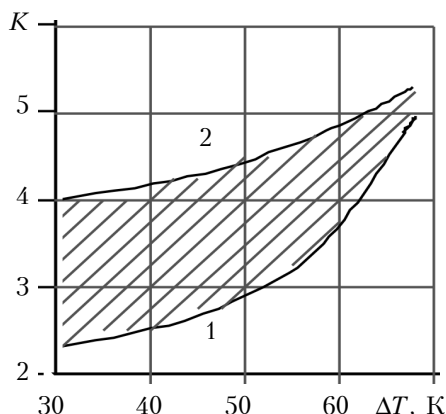


Рис. 5. Зависимость коэффициента $K = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\Delta Z/Z}$ от общего перепада температуры ΔT для режимов $Q_{0\max}$ (1) и $\lambda_{\min}$ (2) при $T=300$ К, $l/S=10$ см⁻¹

- уменьшается до 15% относительный перепад температуры;
- уменьшается до 15% относительный рабочий ток в режиме $\lambda_{\min}$ (рис. 2; в режиме $Q_{0\max}$ $B=1,0=\text{const}$);
- уменьшается количество термоэлементов (в режиме $Q_{0\max}$ — до 40% при значениях ΔT , равных 40 и 50 К, и резко уменьшается при $\Delta T = 60$ К; рис. 3, а);
- увеличивается до 30% холодильный коэффициент E (рис. 3, б);
- уменьшается интенсивность отказов (в среднем на 50% в режиме $Q_{0\max}$ и на 70% в режиме $\lambda_{\min}$, причем при увеличении ΔT до 60 К происходит резкое снижение λ ; рис. 4, а)
- увеличивается вероятность безотказной работы (с ростом ΔT наблюдается резкий рост P ; рис. 4, б).

На рис. 5 приведена зависимость от общего перепада температуры коэффициента K , отражающего взаимосвязь относительных изменений интенсивности отказов $\Delta\lambda/\lambda$ и термоэлектрической эффективности $\Delta Z_M/Z_M$.

Следует отметить, что на рис. 5 заштрихована область, образованная кривыми для экстремальных режимов $Q_{0\max}$ и $\lambda_{\min}$, в которой лежат зависимости для всех промежуточных режимов.

Анализ полученных данных показывает, что рост термоэлектрической эффективности исхо-

дных материалов в модуле приводит к уменьшению интенсивности отказов λ с ростом перепада температуры ΔT . Например, увеличение Z_M на 1% позволяет уменьшить интенсивность отказов на 2,6–4,3% в режиме $Q_{0\max}$ и на 4,2–5,0% в режиме $\lambda_{\min}$ при изменении ΔT в диапазоне от 40 до 60 К.

Выводы

Проведенные исследования показали, что увеличение термоэлектрической эффективности исходных материалов позволяет улучшить показатели надежности ТЭУ — уменьшить интенсивность отказов λ и увеличить вероятность безотказной работы P для заданных параметров (перепад температуры, тепловая нагрузка и режим работы). Совмещение конструктивных методов (выбор режима работы $\lambda_{\min}$) с параметрическими позволяет построить ТЭУ повышенной надежности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зайков В.П., Моисеев В.Ф. Влияние режима работы термоэлектрического устройства на его надежность // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 4–5. — С. 30–32.
2. Зайков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. и др. Выбор режима термоэлектрического охлаждающего устройства, обеспечивающего минимальную интенсивность отказов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 2. — С. 45–47.
3. Зайков В.П., Киншова Л.А., Марченко В.И. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности термоэлектрического устройства // Тепловые режимы и охлаждение РЭА. — 2003. — Вып. 1. — С. 56–62.
4. Зайков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехпериодика, 2009.
5. Лау П.С., Нэйджи М.Дж. Оценка надежности термоэлектрических холодильников // Термическое оборудование. Технология. — 2004. — Вып. 1. — С. 43–46.
6. Iversen B.B., A Palmqvist E., Cox D.E. et al. Why are clathrates good candidates for thermoelectric materials // Solid State Chem. — 2000. — Vol. 149. — P. 455–458.
7. Riffat S.R., Xiaoli M. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems // International journal of energy research. — 2004. — Vol. 28. — P. 78–85.
8. Коленко Е.А., Стильбанс Л.С. Термоэлектрические холодильники // Полупроводники в науке и технике. — Изд-во АН СССР, 1958. — С. 249–250.

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.12 2013 г.

В. П. ЗАЙКОВ, В. І. МЕЩЕРЯКОВ, Г. А. ГНАТОВСЬКА, Ю. І. ЖУРАВЛЬОВ
Україна, м. Одеса, ¹НДІ «Шторм», ²Одеський державний екологічний університет,
³Одеська національна морська академія
E-mail: gradan@ua.fm

ВПЛИВ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРВИННИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ. ЧАСТИНА І: ОДНОКАСКАДНІ ТЕП

Розглянуто вплив термоелектричної ефективності первинних матеріалів у модулі на показники надійності термоелектричного охолоджувального пристрою (ТЕП), який функціонує в умовах гранич-

них токових режимів (Q_{0max} и λ_{min}) при різних перепадах температури. Показано, що із зростанням термоелектричної ефективності матеріалів в модулі зменшується інтенсивність відмов ТЕП, а відповідно, зростає вірогідність його безвідмовної роботи.

Ключові слова: термоелектричний пристрій, надійність, інтенсивність відмов, ефективність, температура, робочий струм.

DOI: 10.15222/TKEA2015.1.44
UDC 621.317: 621.3.08

V. P. ZAIKOV¹, V. I. MESHCHERYAKOV²,
A. A. GNATOVSKAYA², Yu. I. ZHURAVLEV³

Odessa, Ukraine, ¹Research Institute «Storm»,
²Odessa State Environmental University,
³Odessa National Maritime Academy
E-mail: gradan@ua.fm

INFLUENCE OF THE EFFECTIVENESS OF RAW MATERIALS ON THE RELIABILITY OF THERMOELECTRIC COOLING DEVICES. PART I: SINGLE-STAGE TEDs

Increase of the reliability of information systems depends on the reliability improvement of their component elements, including cooling devices, providing efficiency of thermally loaded components. Thermoelectric devices based on the Peltier effect have significant advantages compared with air and liquid systems for thermal modes of the radio-electronic equipment. This happens due to the absence of moving parts, which account for the failure rate.

The article presents research results on how thermoelectric efficiency modules affect the failure rate and the probability of non-failure operation in the range of working temperature of thermoelectric coolers. The authors investigate a model of relative failure rate and the probability of failure-free operation single-stage thermoelectric devices depending on the main relevant parameters: the operating current flowing through the thermocouple and resistance, temperature changes, the magnitude of the heat load and the number of elements in the module.

It is shown that the increase in the thermoelectric efficiency of the primary material for a variety of thermocouple temperature changes causes the following: maximum temperature difference increases by 18%; the number of elements in the module decreases; cooling coefficient increases; failure rate reduces and the probability of non-failure operation of thermoelectric cooling device increases. Material efficiency increase by 1% allows reducing failure rate by 2,6–4,3% in maximum refrigeration capacity mode and by 4,2–5,0% in minimal failure rate mode when temperature difference changes in the range of 40–60 K.

Thus, the increase in the thermoelectric efficiency of initial materials of thermocouples can significantly reduce the failure rate and increase the probability of failure of thermoelectric coolers depending on the temperature difference and the current operating mode.

Key words: thermoelectric device, reliability, failure rate, temperature, operating current

REFERENCES

1. Zaikov V. P., Moiseev V. F. [Effect of operating a thermoelectric device on its reliability] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2001, no 4-5, pp. 30-32. (in Russian)
2. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F., Efremov V. I., Melnik Yu. V. [Choice of operation mode of the thermoelectrical cooling device, ensuring the minimal failure rate]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2008, no 2, pp. 45-47. (in Russian)
3. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Marchenko V.I. [Effect of the heat load on reliability parameters of the thermoelectric device]. *Teplovye rezhimy i okhlazhdeniye REA*, 2003, iss. 1, pp. 56-62. (in Russian)
4. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognozirovaniye pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Forecasting reliability performance of thermoelectric cooling devices. Book 1. Single stage device]. Odessa, Politehprirodika, 2009, 118 p. (in Russian)
5. Lau P.S., Neiji M.J. [Evaluation of reliability of thermoelectric coolers] *Termicheskoe oborudovaniye. Tekhnologiya*, 2004, iss. 1, pp. 43-46. (in Russian)
6. Iversen B.B., A Palmqvist E., Cox D.E., Nolas G.S., Stucky G.D., Blake N.P., Metiu H. Why are clathrates good candidates for thermoelectric materials. *Solid State Chem.*, 2000, vol. 149, pp. 455-458.
7. Riffat S.R., Xiaoli M. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems. *International journal of energy research*, 2004, vol. 28, pp. 78-85.
8. Kolenko E.A., Stil'bans L.S. [Thermoelectric coolers]. *Poluprovodniki v nauke i tekhnike*. Izd-vo AN SSSR, 1958, pp. 249-250. (in Russian)