

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДВУХКАСКАДНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ ПРИ ВАРИАЦИИ ГЕОМЕТРИИ ВЕТВЕЙ В КАСКАДАХ

Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлев Ю. И.

### 1. Введение

Термоэлектрические охлаждающие устройства относятся к наиболее перспективным устройствам обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры. Это обусловлено отсутствием перемещающихся компонентов, малыми габаритами, высоким быстродействием, механической и ударной прочностью. Недостатком термоэлектрических охладителей (ТЭУ) является более низкая холодопроизводительность по сравнению с компрессионными охлаждающими устройствами, что делает актуальными исследования, направленные на повышение их холодопроизводительности. Очевидно, что основным методом повышения холодопроизводительности ТЭУ является выбор материала термоэлементов ветвей с максимальным значением термоэлектрической эффективности. Однако выбор полупроводниковых материалов термоэлементов для промышленного применения достаточно ограничен, поэтому при существующей технологии и заданных материалах необходимы конструктивные приемы повышения холодопроизводительности термоэлектрических охладителей.

### 2. Объект исследования и его технологический аудит

*Объектом исследования* является аналитическая модель связи показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охладителя с геометрией ветвей термоэлементов и его охлаждающими возможностями.

Термоэлектрический охладитель представляет собой конструкцию из параллельно расположенных керамических холодного и горячего электродов, между которыми установлены термоэлементы, электрически последовательно соединенные между собой. Существующая модель термоэлектрического охлаждающего устройства основана на законе сохранения энергии, в частности, на балансе тепловых потоков за счет теплопроводности между нагрузкой, холодным электродом, термоэлементами, горячим электродом, радиатором и внешней средой.

Термоэлектрические охлаждающие устройства относятся к твердотельным охладителям, надежность и массогабаритные характеристики которых существенно превосходят компрессионные устройства данного назначения до мощности охлаждения 500 Вт [1]. Это особо важно для теплонагруженных радиоэлектронных бортовых элементов, работающих в широком диапазоне климатических и механических воздействий [2]. Спектр использования термоэлектрических преобразователей широк: от систем обеспечения тепловых режимов электронной аппаратуры, медицинских систем формирования температурных полей, бытовых холодильников и кондиционеров до генераторов электрической энергии [3]. Более низкая по сравнению с компрессионными холодопроизводи-

тельность термоэлектрических охлаждающих устройств сделала актуальной проблему повышения энергетических параметров ТЭУ, поскольку по иным показателям они находятся вне конкуренции.

Другой проблемой являются показатели надежности, поскольку современные теплонагруженные элементы работают в условиях, близких к критическим. В соответствующих условиях работают и термоэлектрические системы обеспечения их тепловых режимов [4]. Повышенная тепловая нагрузка существенно ухудшает показатели надежности ТЭУ [5], поэтому проектирование устройства по критерию максимума охлаждающих возможностей должно осуществляться с учетом данного обстоятельства. В [6] проанализировано влияние изменение геометрии термоэлементов на показатели надежности однокаскадных ТЭУ, однако двухкаскадные охладители обладают рядом особенностей, учет которых обязателен [7]. Целесообразность выявления связи показателей надежности при вариации геометрии ветвей каскадного термоэлектрического охлаждающего устройства обусловлена потенциальной возможностью повышения качества двухкаскадных охладителей. При этом остается неизменной существующая технология их изготовления.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Целью работы* является выявление связи охлаждающих возможностей и показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охладителя с геометрией ветвей термоэлементов при их последовательном электрическом соединении.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать модель связи интенсивности отказов с конструктивными параметрами и энергетическими показателями двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства.
2. Провести анализ результатов моделирования для определения условий достижения максимального перепада температур.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Среди основных направлений устранения проблемы повышения холодопроизводительности термоэлектрических охлаждающих устройств, выявленных в ресурсах мировой научной периодики, могут быть выделены:

- создание новых материалов с повышенной термоэлектрической эффективностью [8, 9];
- использование тонкопленочных технологий изготовления материала термоэлементов [10–12];
- переход на нано структурные технологии изготовления материала термоэлементов [13–15];
- привлечение внешних электромагнитных полей для управления переносом зарядов в материале термоэлемента [16];
- оптимизация теплообмена в термоэлектрическом устройстве [17, 18];
- привлечение элементов теории надежности в технологии изготовления термоэлектрических охладителей [19–21].

Как следует из подходов, представленных в мировой периодике, основным направлением является создание новых материалов с более высокими значениями термоэлектрической эффективности и технологий изготовления материалов, что непосредственно определяет холодопроизводительность термоэлектрического устройства. Вместе с тем, промышленно используемые термоэлектрические материалы уже в течение полусотни лет имеют весьма ограниченное значение термоэлектрической эффективности [4, 5]. Управление показателями термоэлектрического охладителя электромагнитными полями существенно усложняет систему обеспечения тепловых режимов, поэтому может быть рекомендовано только в специальных применениях.

Исследования термоэлектрических охладителей на эксплуатационные показатели надежности осуществляется либо на этапе подготовки технологии изготовления изделий, либо после изготовления [21]. Это ограничивает возможности влияния проектирования на результирующие показатели надежности термоэлектрического устройства.

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что определение связи между показателями надежности термоэлектрического устройства и конструктивными параметрами термоэлементами актуально.

## **5. Методы исследования**

В качестве методов исследования воспользуемся методами математического моделирования, теории теплопередачи и надежности, которые позволяют получить аналитические выражения, используемые для анализа. С прикладной точки зрения данный подход позволяет сопоставлять проектные решения и проектировать каскадные термоэлектрические охлаждающие устройства с приоритетом критерию надежности. При этом учитываются конструктивные и энергетические показатели, удовлетворяющие требованиям технического задания при существующей технологии.

## **6. Результаты исследования**

### **6.1. Разработка надежно-ориентированной модели**

В ряде случаев в распоряжении разработчика имеется ряд различных конструкций каскадных термоэлектрических устройств (КТЭУ). Эти устройства могут отличаться друг от друга количеством термоэлементов  $n_1$ ,  $n_2$  в каскадах (отношением  $n_1/n_2$ ) и геометрией их ветвей (отношения высоты  $l$  ветви каскада к площади ее поперечного сечения  $S$ ). Возможны также ряды стандартных (унифицированных) модулей, на базе которых можно построить КТЭУ при  $(l/S)_i = \text{const}$  либо  $(l/S)_i = \text{var}$ .

В [6] рассмотрен режим максимального перепада температур  $\Delta T_{\text{max}}$  двухкаскадных ТЭУ различных конструкций ( $n_1/n_2 = \text{var}$ ) при  $(l/S)_1 = (l/S)_2 = 10 \text{ см}^{-1}$  и определены их максимальные охлаждающие возможности и показатели надежности. Проведены расчеты максимальных охлаждающих возможностей, а именно величины максимального перепада температуры  $\Delta T_{\text{max}}$ , при  $(l/S)_1 = (l/S)_2 = 40 \dots 2,0 \text{ см}^{-1}$  и различных значений  $n_1/n_2$ . Анализ результатов показал, что  $\Delta T_{\text{max}}$

не зависит от геометрии ветвей термоэлементов в каскадах, а зависит от эффективности исходных материалов.

Рассмотрим оценку охлаждающих возможностей и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций ( $n_1/n_2 = \text{var}$ ) при  $(l/S)_1 = \text{var} = 20; 15; 10; 4,5 \text{ см}^{-1}$  и  $(l/S)_2 = 10 \text{ см}^{-1}$  при последовательном электрическом соединении каскадов.

Для определения оптимальной геометрии ветвей термоэлементов в первом каскаде  $(l/S)_{1\text{опт}}$ , соответствующей наибольшему значению максимального перепада температуры  $\Delta T_{\text{max}}$  двухкаскадного ТЭУ при заданной геометрии ветвей термоэлементов во втором каскаде  $(l/S)_2 = \text{const}$ , воспользуемся соотношениями [5].

Условие теплового сопряжения каскадов можно записать в виде:

$$Q_{01} + W_1 = Q_{02}, \quad (1)$$

где  $Q_{01} = 0$  при  $\Delta T_{\text{max}}$  – тепловая нагрузка ТЭУ, Вт.

Входящие в это выражение мощность потребления первого каскада  $W_1$  и холодопроизводительность второго каскада  $Q_{02}$  рассчитываются по формулам:

$$W_1 = 2n_1 \left[ I^2 R_1 + \bar{e}_1 I (T_1 - T_0) \right] = 2n_1 \left[ I^2 \frac{(l/S)_1}{\bar{\sigma}_1} + \bar{e}_1 I (T_1 - T_0) \right]; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Q_{02} &= 2n_2 \left[ \bar{e}_2 I T_1 - 0,5 I^2 R_2 - K_2 (T - T_1) \right] = \\ &= -2n_2 \left[ \bar{e}_2 I T_1 - \frac{0,5 I^2 (l/S)_2}{\bar{\sigma}_2} - \frac{\bar{\chi}_2}{(l/S)_2} (T - T_1) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $n_1, n_2$  – количество термоэлементов в каскадах, шт.;

$I$  – величина рабочего тока, А;

$R_i$  – электрическое сопротивление ветви термоэлемента в  $i$ -м каскаде, Ом,  
 $R_i = (l/S)_i / \bar{\sigma}_i$ ;

$\bar{e}_i, \bar{\sigma}_i, \bar{\chi}_i$  – соответственно, усредненные значения коэффициента термо-ЭДС, В/К, электропроводности, См/см, и теплопроводности, Вт/(см·К), ветвей термоэлементов в  $i$ -м каскаде;

$T_0$  – температура теплопоглощающего спая, К;

$T_1$  – промежуточная температура, К;

$T$  – температура теплопоглощающего спая, К.

Подставим (2) и (3) в (1) и получим выражение для промежуточной температуры:

$$T_1 = T_0 \left( 1 + \frac{\bar{e}_1 I}{\bar{\chi}_1} (l/S)_1 \right) - 0,5 I^2 \frac{(l/S)_1^2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1}. \quad (4)$$

Подставив (2)–(4) в (1), получим выражение для определения температуры теплопоглощающего спая:

$$T_0 = \frac{1}{\bar{e}_2 I + \frac{\bar{\chi}_2}{(I/S)_2} + I \frac{\bar{e}_1 (I/S)_1}{\bar{\chi}_1} \left( \bar{e}_2 I + \frac{\bar{\chi}_2}{(I/S)_2} \right) - I^2 \frac{n_1 \bar{e}_1^2 (I/S)_1}{n_2 \bar{\chi}_1} \left[ \frac{\bar{\chi}_2}{(I/S)_2} T + \right. \\ \left. + 0,5 I^2 \frac{(I/S)_1^2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1} \left( \bar{e}_2 I + \frac{\bar{\chi}_2}{(I/S)_2} \right) + 0,5 I^2 \frac{(I/S)_2}{\bar{\sigma}_2} + I^2 \frac{n_1 (I/S)_1}{n_2 \bar{\sigma}_1} - 0,5 I^3 \frac{n_1 \bar{e}_1 (I/S)_1^2}{n_2 \bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1} \right]. \quad (5)$$

Введем следующие обозначения:

$$A = \frac{\bar{\chi}_2}{(I/S)_2} T; \quad B = 0,5 I^2 \frac{1}{\bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1}; \quad f = \bar{e}_2 I + \frac{\bar{\chi}_2}{(I/S)_2}; \\ C = 0,5 I^2 \frac{(I/S)_2}{\bar{\sigma}_2}; \quad D = I^2 \frac{n_1}{n_2 \bar{\sigma}_1}; \\ E = 0,5 I^3 \frac{n_1 \bar{e}_1}{n_2 \bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1}; \quad p = I \frac{\bar{e}_1}{\bar{\chi}_1}; \quad K = I^2 \frac{n_1 \bar{e}_1^2}{n_2 \bar{\chi}_1}.$$

С учетом этого выражение (5) примет вид:

$$T_0 = \frac{A + Bf(I/S)_1^2 + C + D(I/S)_1 - E(I/S)_1^2}{f + (I/S)_1 (pf - K)}. \quad (6)$$

Из условия  $\frac{dT_0}{d(I/S)_1} = 0$  получим:

$$(I/S)_{\text{опт}} = \frac{f}{pf - K} \left( \sqrt{1 - \frac{D(pf - K)}{(Bf - E)f} + \frac{(A + C)(pf - K)^2}{(Bf - E)f^2}} - 1 \right). \quad (7)$$

Интенсивность отказов  $\lambda/\lambda_0$  двухкаскадного ТЭУ можно определить из выражения:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left( \frac{B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \Theta_1}{T_0}}{1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \Theta_1}{T_0}} \right)^2 K_{T1} +$$

$$+ n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left( \frac{B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2} \Theta_2}{T_1}}{1 + \frac{\Delta T_{\max 2} \Theta_2}{T_1}} \right)^2 K_{T2}, \quad (8)$$

где  $\Theta_i$  – относительный перепад температуры в  $i$ -м каскаде,  $\Theta_1 = (T_1 - T_0)/\Delta T_{\max 1}$ ,  $\Theta_2 = (T - T_1)/\Delta T_{\max 2}$ ;

$\Delta T_{\max i}$  – максимальный перепад температуры в  $i$ -м каскаде,  $K$ ,  $\Delta T_{\max i} = 0,5 \bar{z}_i T_{i-1}^2$ ;

$C_i$  – относительная тепловая нагрузка в  $i$ -м каскаде,  $C_1 = \frac{Q_{01}}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1}$ ,

$$C_2 = \frac{W_1 + Q_{01}}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2};$$

$B_i$  – относительный рабочий ток в  $i$ -м каскаде,  $B_i = I/I_{\max i}$ ;

$I_{\max i}$  – максимальный рабочий ток в  $i$ -м каскаде,  $A$ ,  $I_{\max i} = \bar{e}_i T_{i-1}/R_i$ ;

$\bar{z}_i$  – усредненное значение эффективности материала ветвей термоэлементов  $i$ -го каскада,  $1/K$ ;

$K_{Ti}$  – коэффициент значимости, учитывающий влияние пониженной температуры в  $i$ -м каскаде.

Вероятность безотказной работы  $P$  двухкаскадного ТЭУ можно определить из выражения:

$$P = \exp(-\lambda t), \quad (9)$$

где  $t$  – назначенный ресурс, ч.

Падение напряжения двухкаскадного ТЭУ можно определить из выражения:

$$U_{\Sigma} = W_{\Sigma}/I. \quad (10)$$

Выражения являются основой для проведения расчетов параметров и показателей надежности двухкаскадного охладителя.

## 6.2. Анализ разработанной надежно-ориентированной модели

Расчет основных параметров и показателей надежности проводился для различных конструкций двухкаскадного ТЭУ ( $n_2/n_2=\text{var}$ ) при фиксированном количестве термоэлементов во втором каскаде  $n_2=27$ , оптимальном значении  $(I/S)_1$  и  $(I/S)_2=10 \text{ см}^{-1}$ . Для поиска оптимальной геометрии ветвей термоэлементов первого каскада  $(I/S)_{1\text{опт}}$  использовался параметр, учитывающий геометрию ветвей в двух каскадах:

$$a = \frac{(I/S)_1}{(I/S)_2}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1 и на рис. 1–6.

Анализ расчетных данных показал, что при фиксированных значениях параметра  $a$  с уменьшением отношения  $n_1/n_2$ :

- промежуточная температура  $T_1$  уменьшается (рис. 1);
- относительный рабочий ток в каскадах  $B_1$  и  $B_2$  увеличивается (рис. 2);
- относительный перепад температуры в первом каскаде  $\Theta_1$  увеличивается для  $a=0,45$  и  $a=1,0$  и уменьшается, проходя через максимум для  $a=1,5$  и  $a=2,0$  (рис. 3, а). Во втором каскаде  $\Theta_2$  увеличивается для различных значений  $a$  (рис. 3, б);
- величина рабочего тока  $I$  увеличивается (рис. 4);
- оптимальное значение параметра геометрии ветвей термоэлементов  $a_{\text{опт}}$  уменьшается, проходя через минимум при  $n_1/n_2=0,5$  (рис. 4);
- максимальный перепад температуры  $\Delta T_{\text{max}}$  увеличивается (рис. 5);
- интенсивность отказов  $\lambda/\lambda_0$  увеличивается (рис. 6, а) за счет роста относительных рабочих токов  $B_1$  и  $B_2$ , а также роста относительных перепадов температуры  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ ;
- вероятность безотказной работы  $P$  уменьшается (рис. 6, б).

Анализ расчетных данных показал, что при фиксированных значениях отношения  $n_1/n_2$  с увеличением параметра  $a$ :

- промежуточная температура  $T_1$  увеличивается (рис. 1);
- относительный рабочий ток первого каскада  $B_1$  растет, а второго каскада  $B_2$  незначительно уменьшается (рис. 2);
- относительный перепад температуры во втором каскаде  $\Theta_2$  увеличивается (рис. 3, б);
- вероятность безотказной работы  $P$  уменьшается (рис. 6, б).

**Таблица 1**

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного термоэлектрического охладителя при  $T=300$  К,  $Q_0=1,0$  Вт,  $\bar{z}_m=2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $n_2=27$ ,  $(l/S)_2=10$  см<sup>-1</sup> и варьировании параметра  $a$  для различных значений  $n_1/n_2$  в режиме  $\Delta T_{\max}$

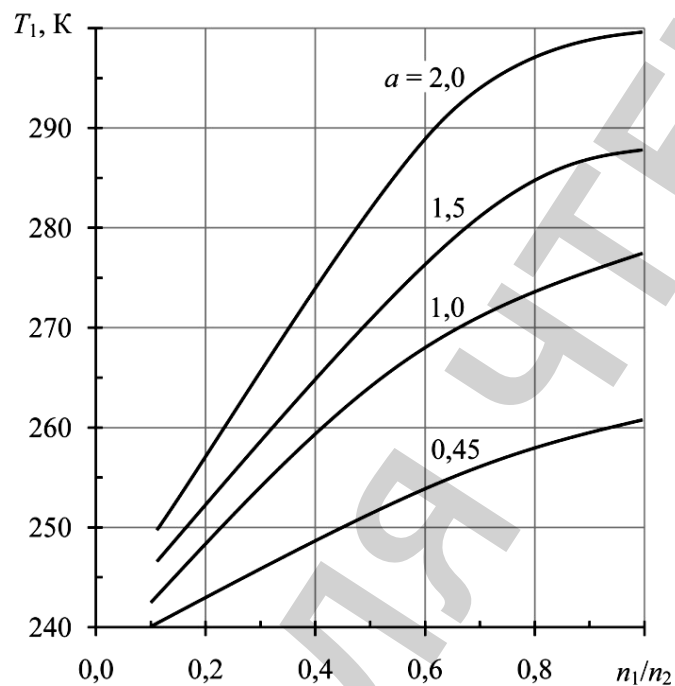
Конструкция (модули в каскадах)	$a$	$R_1 \cdot 10^3, \text{ Ом}$	$R_2 \cdot 10^3, \text{ Ом}$	$I_{\max 1}, \text{ А}$	$I_{\max 2}, \text{ А}$	$B_1$	$B_2$	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$T_1, \text{ К}$	$\Delta T_{\max}$	$W_{\Sigma}, \text{ Вт}$	$U_{\Sigma}, \text{ В}$	$(l/S)_1$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda \cdot 10^8, \text{ 1/ч}$	$P$
<b><math>n_1/n_2=1,0; n_1=27; I=2</math> А</b>																	
M4,5-27/ M10-27	0,45	3,88	10,1	1,11	5,02	0,18	0,40	0,33	0,48	261,0	59,6	3,87	1,94	4,5	0,63	1,89	0,99981
M10-27/ M10-27	1,0	9,43	10,53	4,7	5,25	0,43	0,380	0,67	0,23	279,0	64,0	5,63	2,82	10	1,33	4,0	0,99960
M13,8-27/ M10-27	1,38	12,1	10,42	3,51	5,38	0,57	0,372	0,825	0,174	283,3	66,6	6,23	3,11	13,8	3,52	10,6	0,99894
M15-27/ M10-27	1,5	13,9	10,64	3,13	5,41	0,64	0,37	0,87	0,124	287,7	66,1	6,64	3,33	15	5,38	16,1	0,9984
M20-27/ M10-27	2,0	18,9	11,1	2,37	5,40	0,84	0,37	0,95	0,0	300	62,2	9,75	4,9	20	14,7	44,2	0,9956
<b><math>n_1/n_2=0,67; n_1=18; I=2,6</math> А</b>																	
M4,5-18/ M10-27	0,45	3,81	10,0	1,06	4,97	0,245	0,523	0,43	0,57	255,9	68,7	6,2	2,4	4,5	2,11	6,32	0,99937
M10-18/ M10-27	1,0	8,47	10,42	4,65	5,06	0,56	0,51	0,80	0,36	269,0	74,7	7,43	2,86	10	3,56	10,7	0,99893
M11,3-18/ -18/	1,13	9,58	10,42	4,1	5,04	0,634	0,516	0,81	0,38	267,7	75,7	7,73	3,0	11,3	4,85	14,55	0,99855



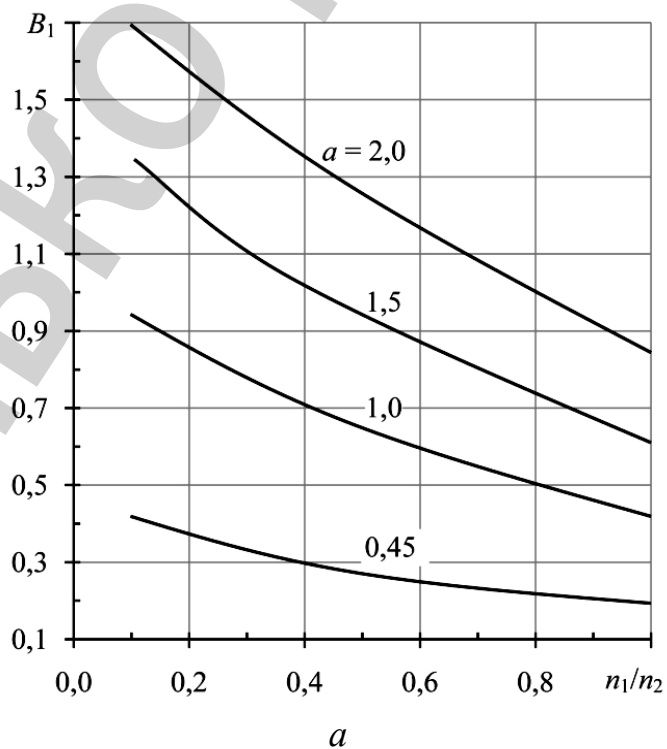
M10-27																		
M15-18/ M10-27	1,5	12,9	10,42	3,14	5,27	0,83	0,49	0,980	0,226	279,0	75,3	8,43	3,24	15	10,9	32,6	0,9967	
M20-18/ M10-27	2,0	18,2	10,9	2,36	5,35	1,10	0,49	0,987	0,084	291,4	68,6	9,70	3,72	20	27,3	82,0	0,99183	
<b><math>n_1/n_2=0,50; n_1=13,5; I=3,1 A</math></b>																		
M4,5-13,5/ M10-27	0,45	3,69	9,8	10,47	4,95	0,30	0,63	0,50	0,656	251,3	75,4	8,0	2,6	4,5	4,58	13,75	0,99862	
M9,5-13,5/ M10-27	0,95	7,8	10,1	4,83	5,11	0,64	0,61	0,91	0,44	263,5	82,4	9,1	2,95	9,5	6,27	18,8	0,99812	
M10-13,5/ M10-27	1,0	8,20	10,1	4,6	5,10	0,67	0,61	0,895	0,455	262,8	82,2	9,2	3,0	10	6,75	20,2	0,9980	
M15-13,5/ M10-27	1,5	12,1	10,1	3,1	5,3	1,0	0,59	1,0	0,32	272	79,0	10,0	3,25	15	17,25	51,8	0,99483	
M20-13,5/ M10-27	2,0	17,9	10,5	2,37	5,4	1,31	0,575	0,93	0,135	286,7	69,0	11,4	3,67	20	37,5	112,6	0,9988	
<b><math>n_1/n_2=0,33; n_1=9; I=3,3 A</math></b>																		
M4,5-9/ M10-27	0,45	3,46	9,62	10,67	4,88	0,31	0,68	0,524	0,744	247,1	78,9	8,4	2,54	4,5	6,32	19,0	0,99810	
M10-9/ M10-27	1,0	7,69	10,0	4,61	4,94	0,72	0,668	0,924	0,594	254,7	87,6	9,4	2,84	10	10,8	32,5	0,9968	
M11-9/ M10-27	1,11	8,54	10,0	4,14	4,93	0,80	0,67	0,925	0,61	254,0	88,1	9,56	2,83	11,1	9,85	29,6	0,99705	

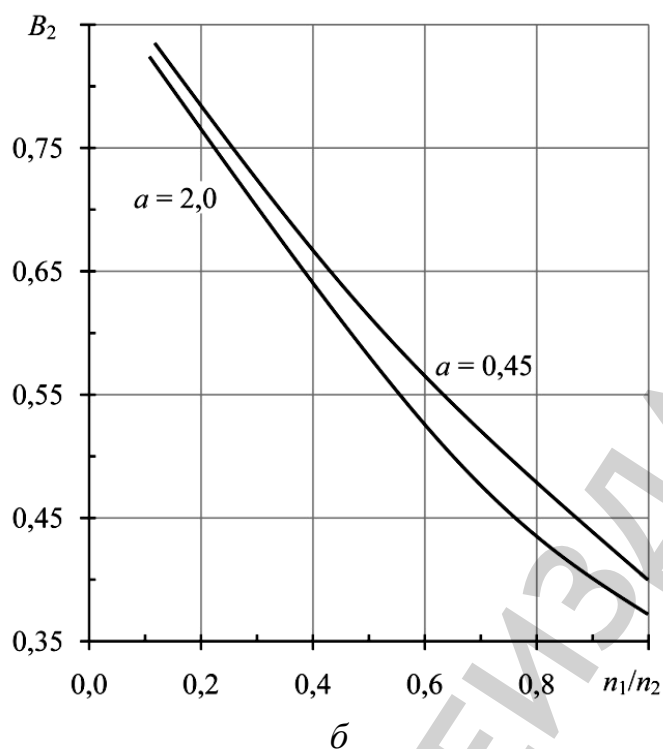
M15-9/ M10-27	1,5	1», 1	10,0	3,0 3	5,09	1,09	0,64 8	1,0	0,48 5	261	86, 8	10, 1	3,0 7	15	18, 1	54,2	0,994 6
M20-9/ M10-27	2,0	17, 0	10,0	2,3	5,20	1,43	0,63 5	0,81	0,41	265, 6	77, 3	10, 9	3,3 0	20	33, 4	100	0,990 0
<b><math>n_1/n_2=0,20; n_1=5; I=3,8 A</math></b>																	
M4,5-5/ M10-27	0,45	3,4 0	9,52	10, 1	4,85	0,38	0,78	0,61	0,83 5	243	84, 6	10, 3	2,7 1	4,5	10, 9	32,7	0,996 7
M9,99-5/ M10-27	0,99 3	7,6 4	9,62	4,3 9	4,91	0,86	0,77	0,98 4	0,71	248, 7	95, 5	10, 9	2,8 6	9,9 3	13, 2	39,6	0,996 0
M10-5/ M10-27	1,0	7,6 9	9,62	4,4 1	4,92	0,86	0,77	0,98	0,71	248, 7	93, 4	10, 9	2,8 6	10	13, 2	39,6	0,996 0
M15-5/ M10-27	1,5	11, 5	10,0	3,0 4	4,89	1,25	0,78	0,94	0,64	252	90, 0	11, 6	3,0 6	15	21, 9	65,7	0,993 5
M20-5/ M10-27	2,0	16, 1	10,0	2,3 9	5,03	1,59	0,75 5	0,66	0,53 5	258	76, 6	12, 0	3,1 6	20	29, 0	86,9	0,991 35
<b><math>n_1/n_2=0,1; n_1=3; I=4 A</math></b>																	
M4,5-3/ M10-27	0,45	3,4 0	9,52	9,9 7	4,79	0,40	0,83 5	0,63 7	0,90	240	88, 1	11, 1	2,7 8	4,5	14, 4	43,2	0,995 7
M9,99-3/ M10-27	1,0	7,5 2	9,52	4,3 2	4,85	0,92 6	0,82 5	0,99	0,83	243, 1	96, 9	11, 4	2,8 6	9,9 97	15, 9	47,7	0,995 24
M10-3/ M10-27	1,0	7,5 2	9,52	4,3 2	4,85	0,92 6	0,82 5	0,99	0,83	243	96, 8	11, 4	2,8 6	10	15, 9	47,7	0,995 2
M15-3/ M10-27	1,5	11, 3	9,52	2,9 6	4,91	1,35	0,81 5	0,87 5	0,76 9	246	91, 2	11, 6	2,9 1	15	21, 5	64,4	0,993 6

M10-27																		
M20-3/ M10-27	2,0	15,9	9,62	2,35	4,91	1,70	0,815	0,51	0,71	248,7	77,3	12,0	3,0	20	25,2	75,5	0,9925	

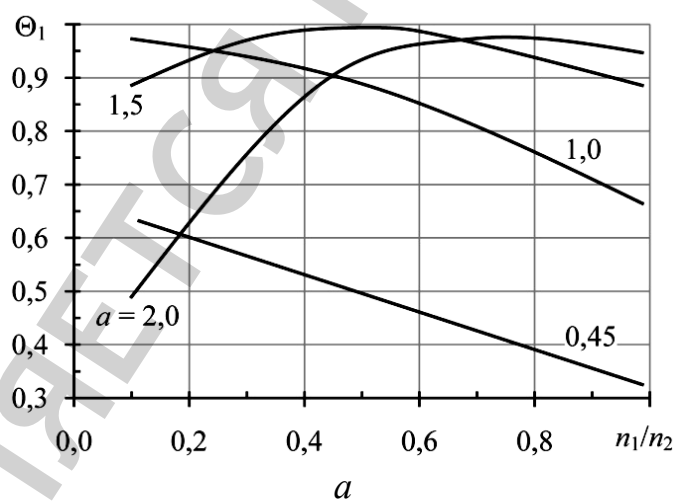


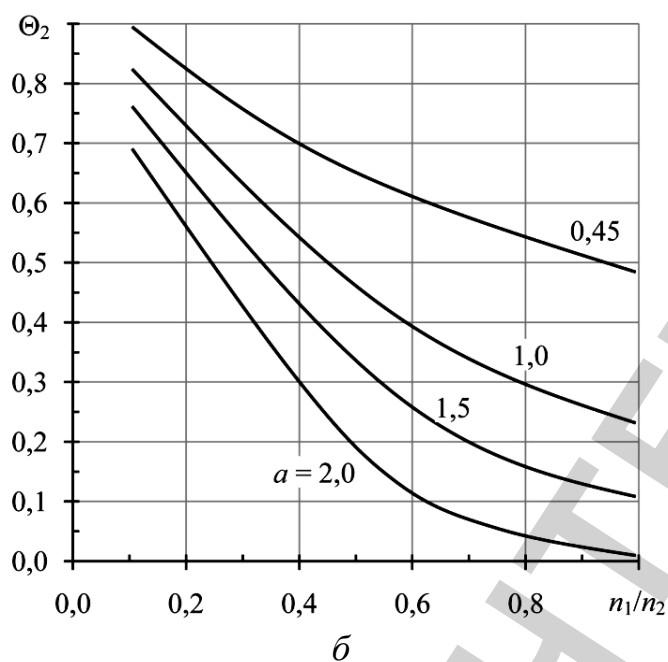
**Рис. 1.** Зависимость промежуточной температуры  $T_1$  двухкаскадного термоэлектрического охладителя от отношения  $n_1/n_2$  для различных значений параметра  $a$  при  $T=300$  К;  $(l/S)_2=10$  см<sup>-1</sup>;  $n_2=27$  в режиме  $\Delta T_{\max}$



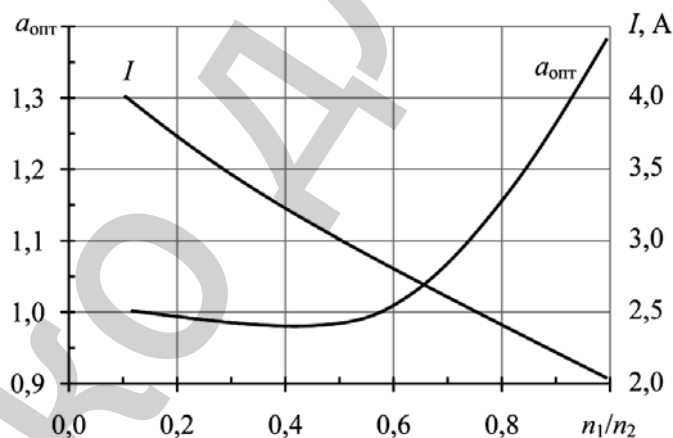


**Рис. 2.** Зависимость относительного рабочего тока каскадов двухкаскадного термоэлектрического охладителя от отношения  $n_1/n_2$  для различных значений параметра  $a$  при  $T=300$  К;  $(l/S)_2=10$  см<sup>-1</sup>;  $n_2=27$  в режиме  $\Delta T_{\max}$ : а – первого каскада  $B_1$ ; б – второго каскада  $B_2$ .

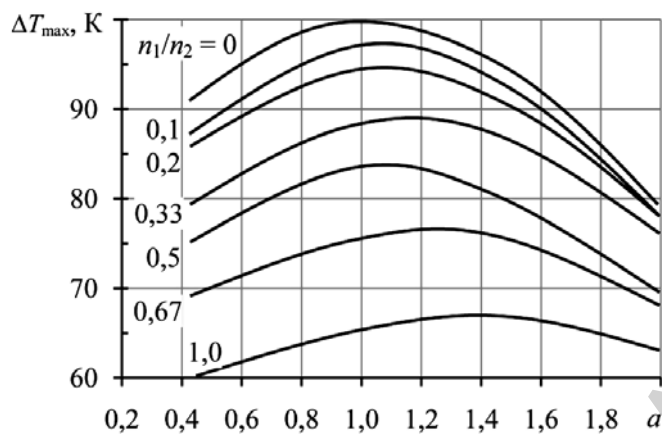




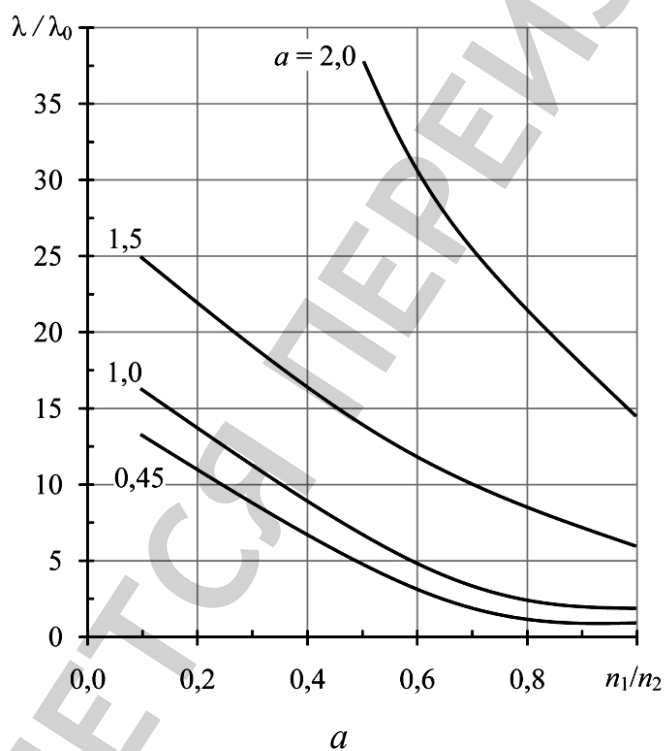
**Рис. 3.** Зависимость относительного перепада температуры каскадов двухкаскадного термоэлектрического охладителя от отношения  $n_1/n_2$  для различных значений параметра  $a$  при  $T=300$  К;  $(l/S)_2=10$  см<sup>-1</sup>;  $n_2=27$  в режиме  $\Delta T_{\max}$ : а – первого каскада  $\Theta_1$ ; б – второго каскада  $\Theta_2$ .

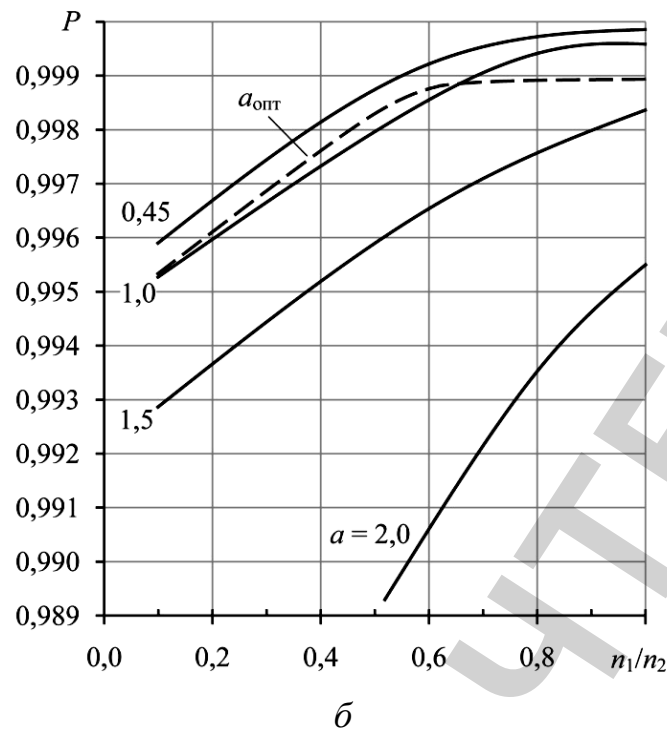


**Рис. 4.** Зависимость оптимального значения параметра  $a$ , соответствующего наибольшему значению перепада температуры: параметра геометрии вервей  $a$  и рабочего тока  $I$  двухкаскадного термоэлектрического охладителя от отношения  $n_1/n_2$  при  $T=300$  К;  $(l/S)_2=10$  см<sup>-1</sup>;  $n_2=27$  в режиме  $\Delta T_{\max}$



**Рис. 5.** Зависимость максимального перепада температуры  $\Delta T_{\max}$  двухкаскадного термоэлектрического охладителя от величины параметра  $a$  для различных значений отношения  $n_1/n_2$  при  $T=300$  К;  $(l/S)_2=10$  см<sup>-1</sup>;  $n_2=27$  в режиме  $\Delta T_{\max}$





**Рис. 6.** Зависимость относительной интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  и вероятности безотказной работы  $P$  двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства от отношения  $n_1/n_2$  для различных значений параметра  $a$  при  $T=300$  К;  $(l/S)_2=10$  см<sup>-1</sup>;  $n_2=27$  в режиме  $\Delta T_{\max}$ : а – относительной отказов  $\lambda/\lambda_0$ ; б – вероятности безотказной работы  $P$

Как видно из рис. 5, функциональная зависимость  $\Delta T_{\max}=f(a)$  для различных значений отношения  $n_1/n_2$  имеет ярко выраженный максимум при заданной величине рабочего тока  $I$ . Для каждого значения отношения  $n_1/n_2$  можно определить оптимальную геометрию ветвей термоэлементов  $a_{\text{опт}}=(l/S)_1/(l/S)_2$ , соответствующую наибольшему значению максимального перепада температуры  $\Delta T_{\max}$ . Следует отметить, что с ростом отношения  $n_1/n_2$  величина параметра  $a_{\text{опт}}$  смещается в сторону больших значений от традиционного  $a=1$  (когда  $(l/S)_1=(l/S)_2=10$ ).

Результаты расчета максимального перепада температуры  $\Delta T_{\max}$  при  $a_{\text{опт}}$  ( $\Delta T_{\max a_{\text{опт}}}$ ) и при  $a=1$  ( $\Delta T_{\max a=1}$ ) приведены в табл. 2.

**Таблица 2**

Результаты расчета максимального перепада температуры

$n_1/n_2$	$a_{\text{опт}}$	$\Delta T_{\max a_{\text{опт}}}$	$\Delta T_{\max a=1}$	$\gamma=\Delta T_{\max a_{\text{опт}}}/\Delta T_{\max a=1}$
1,0	1,38	66,6	64,0	1,041
0,67	1,13	75,7	74,7	1,01
0,50	0,95	82,4	82,2	1,0024
0,33	1,11	88,1	87,6	1,005
0,20	0,993	95,5	93,4	1,022
0,11	1,0	96,9	96,8	1,001
0,0	1,0	100	100	1,0

Как следует из последней колонки табл. 2, выигрыш зависит от отношения числа термоэлементов в каскадах и достигает максимума при значении отношения термоэлементов равном единице.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Сильной стороной данного исследования явилось обоснование возможности повышения показателей надежности двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств до 4% без доработки существующей технологии промышленного производства и изменения материала термоэлементов. С прикладной точки зрения это позволяет сохранить неизменными технические условия эксплуатации по климатическим, механическим и радиационным показателям выпускаемых изделий при повышении их качественных характеристик.

*Weakness.* Слабой стороной данного исследования является тот факт, что в предложенной модели учтено ограниченное число влияющих факторов, в частности не учтены термические деформации, которые возникают в местах соединения термоэлементов с теплоотводящими керамическими электродами. В каскадных термоэлектрических охладителях температурные условия функционирования термоэлементов в каскадах разнятся, что может оказывать влияние на пластические свойства паяных соединений. Данная составляющая не учтена предложенной моделью, и ее влияние на показатели надежности термоэлектрических охладителей нуждается в дальнейших исследованиях и соответствующих финансовых затратах.

*Opportunities.* Дополнительные возможности по повышению показателей надежности двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств состоят в учете геометрии термоэлементов и распределения термоэлементов в каскадах. Это позволяет оптимизировать проектные решения для достижения максимальных значений перепадов температур. При внедрении на предприятиях элементов данных исследований появляется возможность уже на стадии проектирования закладывать изделия, обладающие повышенными показателями надежности.

*Threats.* Сложности практического использования полученных результатов связаны с расширением номенклатуры выпускаемых двухкаскадных охладителей, привязанных к конкретным условиям эксплуатации. Поэтому данная функция должна быть заложена в алгоритм автоматизированной системы проектирования и изготовления, что является общей тенденцией современного производства. Дополнительные затраты связаны с доработкой программного продукта системы автоматизированного проектирования термоэлектрических охладителей в направлении учета исследованной составляющей надежности.

Таким образом, SWOT-анализ позволяет оценить основные направления повышения качества проектирования и изготовления двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств по надежности-ориентированному критерию.

## 8. Выводы

1. Предложена и проанализирована модель взаимосвязи показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций с геометрией ветвей термоэлементов в каскадах в режиме  $\Delta T_{max}$  при последовательном электриче-



ском соединении каскадов. Полученные соотношения позволяют оценить максимальные охлаждающие возможности и показатели надежности двухкаскадных охладителей различных конструкций.

2. Показана возможность увеличения максимального перепада температуры  $\Delta T_{\max}$  до 4 % за счет выбора оптимальной геометрии ветвей термоэлементов в каскадах  $(l/S)_1 > (l/S)_2$ , отличающейся от традиционной  $(l/S)_1 = (l/S)_2$ , при заданном рабочем токе. Предложенный подход позволяет оценить максимальные охлаждающие возможности двухкаскадных охладителей и вести оптимизационное проектирование систем обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры.

### Литература

1. Zebarjadi, M. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications [Text] / M. Zebarjadi, K. Esfarjani, M. S. Dresselhaus, Z. F. Ren, G. Chen // Energy & Environmental Science. – 2012. – Vol. 5, № 1. – P. 5147–5162. doi:[10.1039/c1ee02497c](https://doi.org/10.1039/c1ee02497c)
2. Jurgensmeyer, A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques [Text] / A. L. Jurgensmeyer. – Colorado State University, 2011. – 54 p.
3. Tsai, H.-L. Self-sufficient energy recycling of light emitter diode/thermoelectric generator module for its active-cooling application [Text] / H.-L. Tsai, P. T. Le // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 118. – P. 170–178. doi:[10.1016/j.enconman.2016.03.077](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.077)
4. Rowe, D. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics [Text] / ed. by D. Rowe // Thermoelectrics and its Energy Harvesting, 2 Volume Set. – Boca Raton: CRC Press, 2012. – 544 p. doi:[10.1201/b11891](https://doi.org/10.1201/b11891)
5. Zaykov, V. Prediction of reliability on thermoelectric cooling devices [Text]. Book 1. Single-stage devices / V. Zaykov, L. Kirshova, V. Moiseev. – Odessa: Politehperiodika, 2009. – 120 p.
6. Zaykov, V. Prediction of reliability indices of a two-stage thermoelectric cooling device in the  $\Delta T_{\max}$  mode [Text] / V. Zaykov, L. Kirshova, V. Moiseev, L. Kazanzhi // Technology and design in electronic equipment. – 2009. – № 4. – P. 45–47.
7. Zaykov, V. Prediction of reliability on thermoelectric cooling devices [Text]. Book 2. Cascade devices / V. Zaykov, V. Mescheryakov, Yu. Zhuravlov. – Odessa: Politehperiodika, 2016. – 124 p.
8. Brown, S. R. Yb 14 MnSb 11: New High Efficiency Thermoelectric Material for Power Generation [Text] / S. R. Brown, S. M. Kauzlarich, F. Gascoin, G. J. Snyder // Chemistry of Materials. – 2006. – Vol. 18, № 7. – P. 1873–1877. doi:[10.1021/cm060261t](https://doi.org/10.1021/cm060261t)
9. Riffat, S. B. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems [Text] / S. B. Riffat, X. Ma // International Journal of Energy Research. – 2004. – Vol. 28, № 9. – P. 753–768. doi:[10.1002/er.991](https://doi.org/10.1002/er.991)
10. Gromov, G. Obiemye ili tonkoplenochnye termoelektricheskie moduli [Text] / G. Gromov // Komponenty i tehnologii. – 2014. – № 9. – P. 38.

11. Mischenko, A. S. Giant Electrocaloric Effect in Thin-Film  $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$  [Text] / A. S. Mischenko // Science. – 2006. – Vol. 311, № 5765. – P. 1270–1271. doi:[10.1126/science.1123811](https://doi.org/10.1126/science.1123811)
12. Singh, R. Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxial [Text] / R. Singh. – University of California, 2008. – 54 p.
13. Kruglyak, Yu. A. Landauer-Datta-Lundstrom Generalized Electron Transport Model [Text] / Yu. A. Kruglyak // Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2013. – Vol. 11, № 3. – P. 519–549.
14. Sootsman, J. R. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials [Text] / J. R. Sootsman, D. Y. Chung, M. G. Kanatzidis // Angewandte Chemie International Edition. – 2009. – Vol. 48, № 46. – P. 8616–8639. doi:[10.1002/anie.200900598](https://doi.org/10.1002/anie.200900598)
15. Nesterov, S. B. Evaluation of the possibility of increasing the thermoelectric quality of nanostructured semiconductor materials for refrigeration equipment [Text] / S. B. Nesterov, A. I. Kholopkin // Refrigerating Technique. – 2014. – № 5. – P. 40–43.
16. Gorskyi, P. Layered structure effects as realisation of anisotropy in magnetic, galvanomagnetic and thermoelectric phenomena [Text] / P. Gorskyi. – New York: Nova Publishers, 2014. – Vol. XIV. – 352 p.
17. Sano, S. Development of high-efficiency thermoelectric power generation system [Text] / S. Sano, H. Mizukami, H. Kaibe // KOMATSU Technical Report. – 2003. – Vol. 49, № 152. – P. 1–7.
18. DiSalvo, F. J. Thermoelectric Cooling and Power Generation [Text] / F. J. DiSalvo // Science. – 1999. – Vol. 285, № 5428. – P. 703–706. doi:[10.1126/science.285.5428.703](https://doi.org/10.1126/science.285.5428.703)
19. Wereszczak, A. A. Thermoelectric Mechanical Reliability [Text] / A. A. Wereszczak, H. Wang // Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. – Arlington, 2011. – 18 p.
20. Thermoelectric Cooler Reliability Report [Text]. – Melcor Corporation, 2002. – 36 p.
21. Choi, H.-S. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics-of-failure [Text] / H.-S. Choi, W.-S. Seo, D.-K. Choi // Electronic Materials Letters. – 2011. – Vol. 7, № 3. – P. 271–275. doi:[10.1007/s13391-011-0917-x](https://doi.org/10.1007/s13391-011-0917-x)
- 22.