

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ /  
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2025. Т. 28, № 1. С. 55—63.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202406.592

УДК 621.315:36

**Холодильные коэффициенты  
термоэлектрических каскадных модулей  
и модулей с сегментированными ветвями**

© 2025 г. М. П. Волков, Д. В. Воробьев, И. А. Драбкин,  
Л. Б. Ершова, М. Г. Лаврентьев✉

*ООО «РМТ», Варшавское ш., 46, Москва, 115230, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: lavrentev.mihail@gmail.com

**Аннотация.** Приведены расчеты холодильного коэффициента для термоэлектрических модулей с сегментированными ветвями и каскадных охладителей в широком интервале перепада температур. Объекты расчета — однокаскадный термоэлектрический модуль с двухсекционными ветвями и двухкаскадный термоэлектрический охладитель. Расчет термоэлектрических модулей проведен для режима максимального холодильного коэффициента. В случае однокаскадного модуля рассмотрена работа одной ветви. Для двухкаскадного модуля число ветвей в первом и втором каскаде одинаково. Длина ветвей в секциях и каскадах совпадает. В расчете не учтены температурные потери на теплопереходах и тепло Джоуля, выделяющееся на коммутации. Температурные зависимости термоэлектрических параметров в аналитических выражениях не учитываются, а при расчете модулей учитываются численно (методом последовательных приближений). Результаты расчетов показали, что двухкаскадный охладитель всегда энергетически выгоднее охладителя с двухсекционными ветвями, и чем больше рабочий перепад температур модуля, тем больше разница в их максимальных холодильных коэффициентах. Преимущество каскадного охладителя обусловлено тем, что в нем каждый каскад работает в режиме максимального холодильного коэффициента, а для сегментированной ветви обеспечить максимум холодильного коэффициента каждой секции невозможно. Результаты расчетов подтверждены результатами измерений энергетических параметров реальных термоэлектрических модулей в двух рабочих режимах  $\Delta T = 77$  и  $55$  К. Однокаскадные и двухкаскадные термоэлектрические модули спроектированы так, чтобы их холодильные коэффициенты были максимальны в этих рабочих режимах. Для режима  $\Delta T = 77$  К холодильный коэффициент двухкаскадного модуля превышает холодильный коэффициент однокаскадного модуля в пять раз. При уменьшении перепада температур до  $55$  К двухкаскадный модуль остается более энергетически эффективным решением. Эти результаты важно учитывать для грамотного проектирования термоэлектрических модулей.

**Ключевые слова:** однокаскадный термоэлектрический модуль, сегментированная ветвь, каскадный термоэлектрический модуль, холодильный коэффициент

**Для цитирования:** Волков М.П., Воробьев Д.В., Драбкин И.А., Ершова Л.Б., Лаврентьев М.Г. Холодильные коэффициенты термоэлектрических каскадных модулей и модулей с сегментированными ветвями. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2025; 28(1): 55—63. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202406.592>

© 2025 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

# Performance coefficients of thermoelectric cascade modules and modules with segmented branches

M. P. Volkov, D. V. Vorobyev, I. A. Drabkin, L. B. Ershova, M. G. Lavrentev✉

*RMT Ltd., 46 Warshavskoe Highway, Moscow 115230, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: lavrentev.mihail@gmail.com*

**Abstract.** The paper presents calculations of the performance coefficient for thermoelectric modules with segmented branches and cascade coolers in a wide range of temperature differences. The objects of calculation are a single-stage thermoelectric module with two-section branches and a two-stage thermoelectric cooler. The calculation of thermoelectric modules is carried out for the maximum performance coefficient mode. In the case of a single-stage module, the operation of one branch is considered. For a two-stage module, the number of branches in the first and second stages is the same. The length of the branches in sections and stages is the same. The calculation does not take into account the temperature losses at heat transfers and the Joule heat released during switching. The temperature dependences of thermoelectric parameters are not taken into account in analytical expressions, and are taken into account numerically (by the method of successive approximations) when calculating modules. The calculation results showed that a two-stage cooler is always energetically more advantageous than a cooler with two-section branches, and the greater the operating temperature difference of the module, the greater the difference in their maximum coefficients of performance. The advantage of a cascade cooler is due to the fact that each stage operates in the maximum coefficient of performance mode, and for a segmented branch it is impossible to ensure the maximum coefficient of performance of each section. The calculation results are confirmed by the results of measurements of the energy parameters of real thermoelectric modules in two operating modes  $\Delta T = 77$  and  $55$  K. Single-stage and two-stage thermoelectric modules are designed so that their coefficients of performance are maximum in these operating modes. For the mode  $\Delta T = 77$  K, the coefficient of performance of the two-stage module exceeds the coefficient of performance of the single-stage module by five times. When the temperature difference decreases to  $55$  K, the two-stage module remains a more energy-efficient solution. These results are important to consider for the competent design of thermoelectric modules.

**Keywords:** single-stage thermoelectric module, segmented branch, cascade thermoelectric module, coefficient of performance

**For citation:** Volkov M.P., Vorobyev D.V., Drabkin I.A., Ershova L.B., Lavrentev M.G. Performance coefficients of thermoelectric cascade modules and modules with segmented branches. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2025; 28(1): 55—63. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202406.592>

## Введение

Возможность повышения максимального перепада температур  $\Delta T_{\max}$  в стандартных термоэлектрических охлаждающих модулях напрямую определяется величиной термоэлектрической эффективности материалов  $Z$ , используемых в этих устройствах:

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} Z T_c^2,$$

где  $T_c$  — температура холодной стороны модуля [1]. Использование сегментированных ветвей, состоящих из последовательно соединенных секций материалов с различной концентрацией носителей

заряда, позволяет обойти это ограничение и получить большую разность температур  $\Delta T_{\max}$  [2, 3].

Материал  $i$ -й секции характеризуется коэффициентом Зеебека  $\alpha_i$ , электрическим сопротивлением  $\rho_i$ , теплопроводностью  $\kappa_i$  и термоэлектрической эффективностью  $Z_i = \frac{\alpha_i^2}{\rho_i \kappa_i}$  [4]. В данной

работе нумерация секций начинается с горячей стороны ветви.

Принцип сегментирования в холодильной ветви существенно отличается от принципа сегментирования генераторной ветви. Если в генераторной ветви улучшение характеристик связано с тем, что каждая секция имеет оптимальную

термоэлектрическую эффективность  $Z_i$  для ее рабочего интервала температур, то использование сегментирования в холодильной ветви ставит целью не оптимизацию  $Z_i$ , а моделирование эффекта Томсона [5—7]. Известно, что несмотря на то, что в однородной ветви на основе  $A_2V_3^{VI}$  с понижением температуры  $Z$  материалов падает и энергетические характеристики ухудшаются [8], в основном за счет падения абсолютной величины  $\alpha_i$ , максимально достижимая разность температур такой ветви соответствует  $Z_i$  при комнатной температуре. Это достигается именно за счет эффекта Томсона и характера температурных зависимостей  $\rho_i$  и  $\kappa_i$  [9]. Благодаря такому сочетанию термоэлектрических параметров  $A_2V_3^{VI}$  для модулей, собранных из этих материалов,  $\Delta T_{\max}$  можно определить из измерений  $Z_i$  методом Хармана при комнатной температуре [10—12].

Так как однородную ветвь можно рассматривать как сегментированную ветвь с бесконечным числом секций [13], то в случае сегментированной ветви просто должны лучше использоваться температурные зависимости материалов, которые обычно применяются в стандартных термоэлектрических модулях. Поэтому по мере увеличения  $i$  нужно брать материалы секций с растущей концентрацией носителей заряда (с меньшей абсолютной величиной  $\alpha_i$ ), хотя они и будут иметь меньшее значение  $Z_i$ . Так как сегментированная ветвь лишь усиливает эффекты, которые имеют место в обычной однородной ветви, то результирующий эффект влияния сегментирования на  $\Delta T_{\max}$  не может превышать нескольких градусов [2, 3, 14].

Основным критерием эффективного использования термоэлектрических охладителей является не значение максимальной разности температур, а величина холодильного коэффициента  $\varepsilon$  [4—6, 8, 9, 15]. Безусловно, по значению  $\varepsilon$  для разности температур, превышающих  $\Delta T_{\max}$ , сегментированная ветвь выгоднее однородной. Но секционная конструкция ветви сближает ее с каскадным охладителем, поэтому разумнее проводить сравнение работы сегментированной ветви с работой каскадных термоэлектрических модулей [16].

### Методика расчета

Ограничимся рассмотрением двухсекционной ветви  $i = 1, 2$  и двухкаскадного модуля. Стандартная процедура расчета двухкаскадных модулей направлена на то, чтобы получить максимальный холодильный коэффициент при заданной температуре  $T_0$  [17—19]. В качестве такой температуры можно взять  $T_{01}$  — минимальную температуру, достижимую для однородной ветви на однокаскадном модуле [20]. Для удобства ограничимся случаем термоэлектрических параметров, не за-

висящих от температуры. Будем считать, что число ветвей в однокаскадном модуле с однородными и сегментированными ветвями совпадает. Поэтому для простоты можно ограничиться рассмотрением работы только одной ветви. В двухкаскадном модуле будем считать, что число ветвей в первом и втором каскаде совпадают. Первостепенное значение в работе термоэлектрического охладителя имеют материалы [21], а не детали конструкции (теплопереходы, коммутационные пластины и т. п.). Поэтому предположим, что температурные потери на теплопереходах и тепло Джоуля, выделяющееся на коммутации, пренебрежимо малы. Пусть  $L$  — высота ветви,  $s_i$  — сечение  $i$ -й секции ветвей. Так как оптимизировать двухкаскадный модуль можно путем изменения сечения ветвей, то будем считать, что длины ветвей в секциях (каскадах) совпадают и равны  $L/2$ . Значение  $T_{01}$  при температуре на горячем конце модуля  $T_h$  можно определить из следующего уравнения [8]:

$$T_{01} = \frac{\sqrt{1 + 2Z_1 T_h} - 1}{Z_1}. \quad (1)$$

Температуру на стыке каскадов обозначим  $T_m$ . Уравнения теплового баланса при сделанных предположениях на стыке секций в сегментированной ветви и каскадов для каскадного модуля совпадают, поэтому все приведенные ниже выражения для сегментированной ветви имеют точно такой же вид и для двухкаскадного охладителя. Холодильные коэффициенты для первой и второй секции  $\varepsilon_i$  в режиме максимального холодильного коэффициента тогда можно определить из следующих выражений [8]:

$$\varepsilon_1 = \frac{M_1 T_m - T_h}{(T_h - T_m)(M_1 + 1)}; \quad \varepsilon_2 = \frac{M_2 T_0 - T_m}{(T_m - T_0)(M_2 + 1)}, \quad (2)$$

где  $M_i$  — параметр эффективности  $i$ -го каскада (секции) при средней температуре  $T_{(av)i}$ . Он определяется выражением

$$M_i = \sqrt{1 + Z_i T_{(av)i}}. \quad (3)$$

Для получения максимального холодильного коэффициента ветви холодильные коэффициенты в секциях (каскадах) должны совпадать [22]. Приравняв  $\varepsilon_i$  друг другу, получим уравнение для оптимальной величины  $T_m$ :

$$T_m^2 - T_m \frac{(M_2 - M_1)}{(M_1 M_2 - 1)} (T_h - T_0) - T_h T_0 = 0. \quad (4)$$

Подчеркнем, что это уравнение для  $T_m$  зависит только от температур на концах ветви и термоэлектрической эффективности материалов секций. Никаких других характеристик ветви в уравнении (4) нет. Если считать, что в первом приближении  $M_i$  не зависят от номера секции (каскада), то получаем

из выражения (4) хорошо известное соотношение [16] для  $T_m$  в двухкаскадном модуле для нулевого приближения  $T_m^{(0)}$ :

$$T_m^{(0)} = \sqrt{T_h T_0}. \quad (5)$$

Введем обозначение:

$$T_m = T_m^{(0)} + \delta = T_m^{(0)} \left( 1 + \frac{\delta}{T_m^{(0)}} \right). \quad (6)$$

Величину  $\Delta$  будем считать малой по сравнению с  $T_m^{(0)}$ , тогда  $\Delta/T_m^{(0)}$  мала по сравнению с единицей.

Примем для  $T_{(av)i}$

$$T_{(av)1} = \frac{T_h + T_m}{2}, \quad T_{(av)2} = \frac{T_m + T_0}{2}. \quad (7)$$

Из формул (3) и (6) следует, что

$$M_i = \sqrt{1 + Z_i T_{(av)i}} = M_i^{(0)} \sqrt{1 + \frac{Z_i \delta}{2M_i^{(0)}}}, \quad (8)$$

где символом  $M_i^{(0)}$  обозначено значение  $M_i$  при  $T_m = T_0$ .

Пренебрегая членами второго порядка по  $\Delta$ , из уравнения (4) можно получить следующее выражение для  $\Delta$  в первом приближении:

$$\delta = - \frac{\left( T_m^{(0)} \right)^2 - \frac{T_m^{(0)} (T_h - T_0) (M_{2m}^{(0)} - M_{1m}^{(0)})}{(M_{1m}^{(0)} M_{2m}^{(0)} - 1)} - T_h T_0}{2T_m^{(0)} - \frac{T_m^{(0)} (T_h - T_0) (M_{2m}^{(0)} - M_{1m}^{(0)})}{(M_{1m}^{(0)} M_{2m}^{(0)} - 1)} \left[ \frac{\left( \frac{Z_2}{M_{2m}^{(0)}} - \frac{Z_1}{M_{1m}^{(0)}} \right)}{4(M_{2m}^{(0)} - M_{1m}^{(0)})} + \frac{1}{T_m^{(0)}} - \frac{\left( \frac{Z_1 M_{2m}^{(0)}}{4M_{1m}^{(0)}} + \frac{Z_2 M_{1m}^{(0)}}{4M_{2m}^{(0)}} \right)}{(M_{1m}^{(0)} M_{2m}^{(0)} - 1)} \right]}. \quad (9)$$

Из выражения (9) в соответствии с формулой (6) можно найти значение  $T_m$  в первом приближении  $T_m^{(1)}$ . Далее можно в качестве  $T_m^{(0)}$  взять полученную величину  $T_m^{(1)}$  и повторить вычисления, начиная с уравнения (6). Это можно продолжать до получения значения  $T_m$  с необходимой точностью. С хорошей точностью можно ограничиться вторым приближением.

После того, как была определена величина  $T_m$ , перейдем к определению оптимального сечения ветви во второй секции. Из равенства оптимальных токов в режиме максимального холодильного коэффициента

$$I_1 = \frac{2\alpha_1 (T_h - T_m) s_1}{\rho_1 L (M_1 - 1)}, \quad I_2 = \frac{2\alpha_2 (T_m - T_0) s_2}{\rho_2 L (M_2 - 1)}, \quad (10)$$

имеем

$$\frac{\alpha_1 (T_h - T_m) s_1}{\rho_1 (M_1 - 1)} = \frac{\alpha_2 (T_m - T_0) s_2}{\rho_2 (M_2 - 1)}, \quad (11)$$

или

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\alpha_2 (T_m - T_0) \rho_1 (M_1 - 1)}{\alpha_1 (T_h - T_m) \rho_2 (M_2 - 1)}. \quad (12)$$

Холодопроизводительность первой секции составляет

$$Q_{0m} = \alpha_1 I T_m - \frac{1}{2} I^2 \rho_1 \frac{L}{2s_1} - \kappa_1 \frac{2s_1}{L} (T_h - T_m), \quad (13)$$

здесь  $I$  — сила тока.

Воспользовавшись (10), можно получить

$$Q_{0m} = \frac{2Z_1 \kappa_1 (T_h - T_m) T_m s_1}{L (M_1 - 1)} \times \left[ 1 - \frac{(T_h - T_m)}{2T_m (M_1 - 1)} - \frac{(M_1 - 1)}{T_m Z_1} \right]. \quad (14)$$

Аналогично для теплопроизводительности второй секции имеем

$$Q_m = \frac{2Z_2 \kappa_2 (T_m - T_0) T_m s_2}{L (M_2 - 1)} \times \left[ 1 + \frac{(T_m - T_0)}{2T_m (M_2 - 1)} - \frac{(M_2 - 1)}{Z_2 T_m} \right]. \quad (15)$$

Для теплового согласования секций отношение  $Q_{0m}/Q_m$  должно быть равно 1. Выражение для него имеет вид

$$\frac{Q_{0m}}{Q_m} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left[ \frac{1 - \frac{(T_h - T_m)}{2T_m (M_1 - 1)} - \frac{(M_1 - 1)}{T_m Z_1}}{1 + \frac{(T_m - T_0)}{2T_m (M_2 - 1)} - \frac{(M_2 - 1)}{Z_2 T_m}} \right]. \quad (16)$$

В формуле (16) при обычных для сегментированных ветвей соотношениях [2, 3, 13, 19] множитель  $\alpha_1/\alpha_2 > 1$ , а отношение выражений в квадратных скобках всегда меньше единицы, поэтому  $Q_{0m}/Q_m$  может быть определено только численным расчетом. Можно показать, что при разумных значениях термоэлектрических параметров получится  $Q_{0m}/Q_m < 1$ , т. е. холодопроизводительности первой секции оказывается недостаточно, чтобы отвести все тепло от второй секции в режиме максимального холодильного коэффициента, т. е. сегментированная ветвь не может работать в оптимальном режиме. В двухкаскадном модуле

равенство  $Q_{0m}/Q_m = 1$  можно обеспечить тем, что количество ветвей в каскадах  $N_i$  будет удовлетворять соотношению

$$\frac{N_1}{N_2} \approx \frac{Q_m}{Q_{0m}}. \quad (17)$$

При переходе к двухкаскадному модулю из уравнения (2) становится ясно, что нет никакой необходимости использовать во втором каскаде материал с заведомо низкими коэффициентом Зеебека и электрическим сопротивлением и, следовательно, с низкой величиной  $Z_2$ . Предпочтительнее оказывается одинаковый материал в каскадах с большим значением  $Z$ .

### Результаты и их обсуждение

Для иллюстрации полученных результатов проведем численные расчеты. В термоэлектрических модулях использовался материал, полученный методом горячей экструзии по стандартной технологии компании ООО «РМТ». Подробное описание технологического процесса получения материала представлено в работе [23]. Пусть материал первой секции имеет следующие параметры:  $\alpha = 235$  мкВ/К,  $\sigma = 760$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ ,  $\kappa = 1,37$  Вт/мК, а материал второй секции:  $\alpha = 200$  мкВ/К,  $\sigma = 1200$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ ,  $\kappa = 1,6$  Вт/мК. Обозначим эти материалы ТЭМ1 и ТЭМ2, соответственно. Расчет проведен для температуры горячей стороны 300 К и максимально достижимой температуры для модуля из материала ТЭМ1, равной 222,36 К, что соответствует разности температур  $\Delta T_{\max} = 77,64$  К. Данные расчета сегментированной ветви в сравнении с однородной ветвью приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

#### Основные параметры сегментированной ветви в сравнении с однородной ветвью

Main parameters of a segmented branch compared to a homogeneous branch

| Материал 1 секции | Материал 2 секции | $\Delta T_{\max}$ , К | $\epsilon$ (при $\Delta T = 77,64$ К) |
|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| ТЭМ1              | ТЭМ2              | 80,20                 | 0,018                                 |
| ТЭМ1              | ТЭМ1              | 77,64                 | 0                                     |

Результаты расчетов двухкаскадного модуля приведены в табл. 2.

Из приведенных в табл. 1 и 2 данных видно, что, действительно, сегментированная ветвь выигрывает у однородной ветви по разности температур и, конечно, по холодильному коэффициенту при  $\Delta T_{\max}$ , но существенно проигрывает по холодильному коэффициенту двухкаскадного модуля. Причем замена материала во втором каскаде на более эффективный материал первого каскада дает дополнительный выигрыш в холодильном коэффициенте. Таким образом, традиционный двухкаскадный охладитель по своим энергетическим характеристикам заметно превосходит однокаскадный модуль, состоящий из сегментированных ветвей.

Представляет интерес сравнение энергетических характеристик однокаскадных модулей, состоящих из сегментированных и однородных ветвей, с аналогичными характеристиками двухкаскадных модулей в диапазоне разностей температур ниже  $\Delta T_{\max}$  однородной ветви. Такие данные по холодильным коэффициентам приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что нет области разности температур, для которых сегментированная ветвь имела бы наибольший холодильный коэффициент. Для больших разностей температур  $\Delta T > 50$  К лучшие характеристики имеют каскадные охладители, а для меньших разностей температур даже простая ветвь превосходит сегментированную [24]. Таким образом, во всем диапазоне разностей температур при использовании тех же термоэлектрических материалов всегда имеется техническое решение, позволяющее построить более эффективный охладитель, чем охладитель из сегментированных ветвей.

Последовательность технологических операций сборки модулей с сегментированными ветвями была следующей: на первом этапе происходила сборка полумодулей на основе материалов ТЭМ1 и ТЭМ2 для верхней и нижней секций; на втором этапе проводилось соединение полумодулей в установке вакуумной пайки Budatec VS160. Внешний вид модулей с сегментированными ветвями представлен на рис. 2.

Были проведены измерения для однокаскадных модулей, состоящих из однородных и сегмен-

Таблица 2 / Table 2

#### Основные параметры двухкаскадного модуля из материалов ТЭМ1 и ТЭМ2

Main parameters of a two-stage module made of TEM1 and TEM2 materials

| Материал 1 каскада | Материал 2 каскада | $T_m$ , К | M1     | M2     | $s_1/s_2$ | $\epsilon_1$ | $\epsilon_2$ | $\epsilon$ |
|--------------------|--------------------|-----------|--------|--------|-----------|--------------|--------------|------------|
| ТЭМ1               | ТЭМ2               | 256,20    | 1,3245 | 1,2748 | 1,475     | 0,3725       | 0,3680       | 0,0788     |
| ТЭМ1               | ТЭМ1               | 257,75    | 1,3253 | 1,2906 | 1,098     | 0,3934       | 0,3896       | 0,0860     |

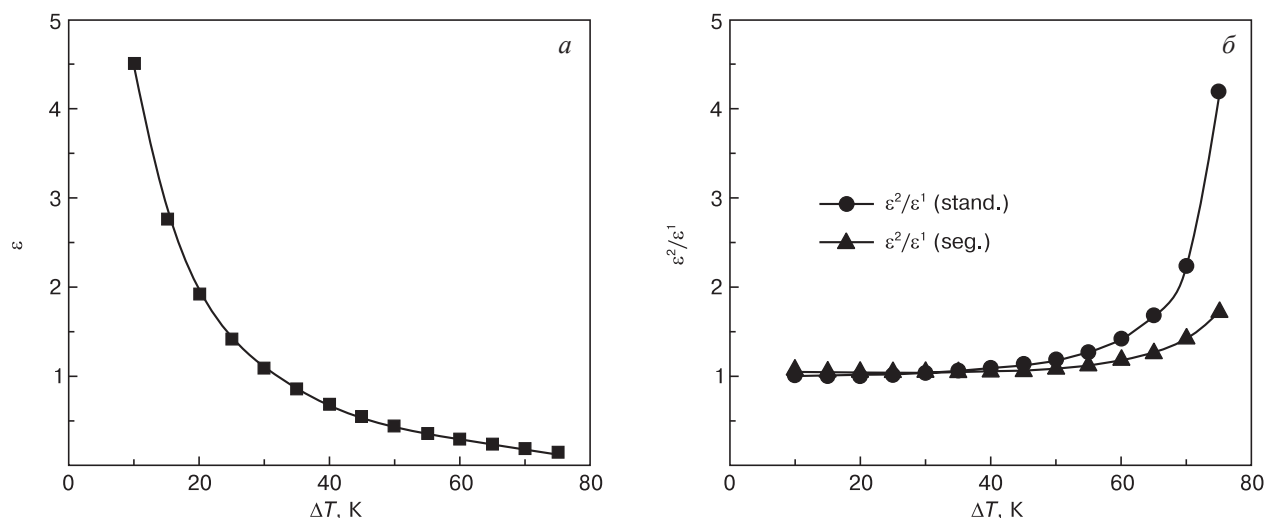


Рис. 1. Зависимости холодильного коэффициента двухкаскадного модуля (а) и отношение холодильных коэффициентов двухкаскадного и однокаскадного модуля (б) от разности температур  $\Delta T$ :  
● — отношение холодильных коэффициентов двухкаскадного и однокаскадного модуля с однородными ветвями; ▲ — отношение холодильных коэффициентов двухкаскадного и однокаскадного модуля с сегментированными ветвями

Fig. 1. Dependences of the coefficient of performance of a two-stage module (a) and the ratio of the coefficients of performance of a two-stage and single-stage module (b) on the temperature difference  $\Delta T$ :  
● is ratio of the coefficients of performance of a two-stage and single-stage module with homogeneous branches; ▲ is ratio of the coefficients of performance of a two-stage and single-stage module with segmented branches

тированных ветвей, а также для двухкаскадного модуля, спроектированных так, чтобы их холодильные коэффициенты были максимальны в точках  $\Delta T = 77$  К и  $\Delta T = 55$  К (будем называть такие модули «оптимальными» для данных условий).  
Тепловую нагрузку для  $\Delta T = 77$  К считали равной 0,06 Вт. Тогда оптимальным модулем с сегментированными ветвями будет 1ML06(07)–023–18 (сечение ветвей в секциях —  $0,6 \times 0,6$  мм<sup>2</sup>,  $0,7 \times 0,7$  мм<sup>2</sup>, число пар ветвей — 23, высота ветви — 1,8 мм, материалы ТЭМ2 — на верхней секции, ТЭМ1 — на нижней). Соответствующий оптимальный двухкаскадный модуль — 2МС06–015–15 (сечение ветвей —  $0,6 \times 0,6$  мм<sup>2</sup>, число пар ветвей — 15 (по каскадам 4+11), высота ветви — 1,5 мм, материал ТЭМ1 на обоих каскадах). Оптимальные модули рассчитаны с помощью метода, изложенного в работе [25]. Измерения термоэлек-

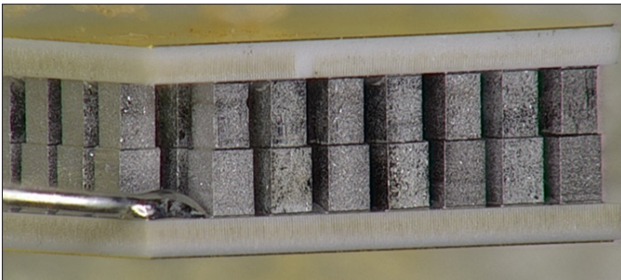


Рис. 2. Внешний вид термоэлектрического модуля с сегментированными ветвями

Fig. 2. External view of a thermoelectric module with segmented branches

трических параметров модулей проводили на установке DX8020 (ООО «РМТ», Россия). Точность измерения параметров модулей составляла: перепад температур —  $\pm 0,01$  К, сила тока —  $\pm 2$  мА, падение напряжения —  $\pm 2$  мВ.

Таблица 3 / Table 3

**Параметры модулей 1ML06(07)–023–18 (сегментированные ветви) и 2МС06–015–15 в рабочем режиме (вакуум, 300 К,  $Q = 0,06$  Вт,  $\Delta T = 77$  К)**

Parameters of modules 1ML06(07)–023–18 (segmented branches) and 2MS06–015–15 in operating mode (vacuum, 300 К,  $Q = 0.06$  W,  $\Delta T = 77$  К)

| Параметр      | Расчет                        |                    | Измерения                     |                    |
|---------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|
|               | 1ML06(07)–023–18/<br>ТЭМ2ТЭМ1 | 2МС06–015–15/ ТЭМ1 | 1ML06(07)–023–18/<br>ТЭМ2ТЭМ1 | 2МС06–015–15/ ТЭМ1 |
| $I$ , А       | 1,150                         | 0,548              | 1,295                         | 0,663              |
| $U$ , В       | 2,879                         | 1,100              | 3,062                         | 1,248              |
| $P$ , Вт      | 3,3109                        | 0,6026             | 3,9653                        | 0,8227             |
| $\varepsilon$ | 0,0181                        | 0,0996             | 0,0151                        | 0,0725             |

Таблица 4 / Table 4

**Параметры модулей 1ML06(07)–023–18 (сегментированные ветви) и 2МС06–050–10 в рабочем режиме (вакуум, 300 К,  $Q = 0,43$  Вт,  $\Delta T = 55$  К)**  
 Parameters of modules 1ML06(07)–023–18 (segmented branches) and 2MS06–050–10 in operating mode (vacuum, 300 K,  $Q = 0.43$  W,  $\Delta T = 55$  K)

| Параметры     | Расчет                        |                    | Измерения                     |                    |
|---------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|
|               | 1ML06(07)–023–18/<br>ТЭМ2ТЭМ1 | 2МС06–050–10/ ТЭМ1 | 1ML06(07)–023–18/<br>ТЭМ2ТЭМ1 | 2МС06–050–10/ ТЭМ1 |
| $I$ , А       | 0,838                         | 0,583              | 0,840                         | 0,642              |
| $U$ , В       | 2,137                         | 2,504              | 2,086                         | 2,658              |
| $P$ , Вт      | 1,7898                        | 1,4585             | 1,7518                        | 1,7080             |
| $\varepsilon$ | 0,2514                        | 0,2948             | 0,2477                        | 0,2529             |

В табл. 3 приведены результаты расчетов и измерений этих модулей при охлаждении от 300 К на  $\Delta T = 77$  К под нагрузкой 0,06 Вт в вакууме.

Как и следовало ожидать, оптимальный двухкаскадный модуль, собранный на одном материале ТЭМ1, в точке, близкой к  $\Delta T_{\max}$  стандартного однокаскадного модуля, имеет неоспоримое преимущество перед оптимальным однокаскадным модулем с сегментированными ветвями.

Для  $\Delta T = 55$  К оптимальным модулем с сегментированными ветвями остается 1ML06(07)–023–18/ТЭМ2ТЭМ1. Тогда оптимальная тепловая нагрузка составит 0,43 Вт. Оптимальным двухкаскадным модулем будет 2МС06–50–10 (сечение ветвей —  $0,6 \times 0,6$  мм<sup>2</sup>, число пар ветвей — 50 (по каскадам 20+30), высота ветви — 1,0 мм, материал ТЭМ1 на обоих каскадах).

В табл. 4 даны результаты расчетов и измерений этих модулей при охлаждении от 300 К на  $\Delta T = 55$  К в вакууме под нагрузкой 0,43 Вт.

Из данных табл. 4 видно, что оптимальный двухкаскадный модуль, действительно, имеет более высокий холодильный коэффициент при  $\Delta T = 55$  К. Можно также сделать вывод, что, вероятно, потери на теплопереходах и контактах в двухкаскадном модуле вносят более значительный вклад, чем учтено в расчетах. Это необходимо принимать во внимание при разработке модуля.

### Заключение

Показано, что использование сегментированных ветвей в однокаскадном модуле дает преимущество перед однородными ветвями только в режиме максимального перепада температур. Однако в сравнении с двухкаскадным охладителем однокаскадный модуль с сегментированными ветвями существенно уступает по значению холодильного коэффициента. При перепаде температур, близком к  $\Delta T_{\max}$  однокаскадного модуля, значения холодильных коэффициентов могут

различаться в несколько раз. При уменьшении  $\Delta T$  эта разница уменьшается, однако, начиная с  $\Delta T < 40$  К холодильный коэффициент однокаскадного модуля с сегментированными ветвями уступает холодильному коэффициенту стандартного однокаскадного модуля.

Приведенное аналитическое рассмотрение не учитывает температурных зависимостей термоэлектрических параметров. Однако уравнения теплового баланса и в этом случае можно записать в обычной форме, воспользовавшись методом эффективных значений термоэлектрических параметров [9, 26]. Наличие температурных зависимостей тогда не сможет сделать отношение  $Q_{0m}/Q_m$  в уравнении (16) равным единице, и, следовательно, и в этом случае модуль с сегментированными ветвями проигрывает двухкаскадному.

Рассмотрение было ограничено двухсекционной ветвью. Увеличение числа секций будет приводить к повторному отклонению отношения  $Q_{0m}/Q_m$  от 1 на границах секций, т. е. к дальнейшему ухудшению свойств по сравнению с каскадным модулем с увеличенным количеством каскадов. Поэтому всегда реальный охладитель с ветвями, состоящими из  $n$  секций, будет проигрывать каскадному охладителю из  $n$  каскадов.

Наличие промежуточных теплопереходов и промежуточной коммутации [27] в каскадных модулях, безусловно, будет ухудшать ситуацию, однако, правильный подбор этих конструктивных элементов может свести их влияние к минимуму.

### Библиографический список

1. Nolas G.S., Sharp J., Goldsmid H.J. Thermoelectrics: Basic principles and new materials developments. Springer Berlin; 2001. 293 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04569-5>
2. Семенюк В.А., Нечипорук О.Л. Максимальное понижение температур в составных полупроводниковых термопарах. *Известия высших учебных заведений: Энергетика*. 1976; (2): 105—110.

3. Bian Zh., Shakouri A. Beating the maximum cooling limit with graded thermoelectric materials. *Applied Physics Letters*. 2006; 89(21): 212101. <https://doi.org/10.1063/1.2396895>
4. Ioffe A.F. Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling. London: Infosearch ltd.; 1957. 254 p.
5. Бурштейн А.И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств. М.: Государственное издательство физико-математической литературы; 1962. 135 с.
6. Стильбанс Л.С. Физика полупроводников. М.: Советское радио; 1967. 452 с.
7. Buist R.J. The extrinsic Thomson effect (ETE). In: *Proceed. of XIV Inter. conf. on thermoelectrics. St. Petersburg, Russia. June 27–30, 1995*. St. Petersburg: A.F. Ioffe Physical-Technical Institute; 1995. P. 301–304.
8. Лукишкер Э.М., Вайнер А.Л., Сомкин М.Н., Водолагин В.Ю. Термоэлектрические охладители. М.: Радио и связь; 1983. 176 с.
9. Drabkin I. Optimization of thermoelectric cooling and generator batteries. LAP LAMBERT Academic Publishing; 2017. 60 p.
10. Harman T.C. Special techniques for measurement of thermoelectric properties. *Journal of Applied Physics*. 1958; 29(9): 1373–1374. <https://doi.org/10.1063/1.1723445>
11. Babin V.P., Gorodetskiy S.M. Thermoelectric modules quality testing by a manufacturer. In: *Proceed. of XIV Inter. conf. on thermoelectrics. St. Petersburg, Russia. June 27–30, 1995*. St. Petersburg: A.F. Ioffe Physical-Technical Institute; 1995. P. 338–339.
12. Buist R.J. Methodology for testing thermoelectric materials and devices. In: Rowe D.M. (ed.). *CRC Handbook of Thermoelectrics*. London: CRC Press LLC; 1995. P. 189–209.
13. Вайнер А.Л., Колomoец Н.В., Лукишкер Э.М., Ржевский В.М. К теории составного термоэлемента. *Физика и техника полупроводников*. 1977; 11(3): 546–552.
14. Semeniouk V.A., Svechnikova T.E., Ivanova L.D. Single stage thermoelectric coolers with temperature difference of 80 K. In: *Proceed. of XIII Inter. conf. on thermoelectrics. Kansas City, MO, 1994*. New York: AIP Press; 1994. P. 485–489.
15. Goldsmid H.J. Conversion efficiency and figure-of-merit. In: Rowe D.M. (ed.). *CRC Handbook of Thermoelectrics*. London: CRC Press; 1995. P. 19–25.
16. Вайнер А.Л. Каскадные термоэлектрические источники холода. М.: Советское радио; 1976. 137 с.
17. Анатыхчук Л.И., Вихор Л.Н., Малышко В.В., Нехай В.А. Охлаждающие модули из секционных термоэлементов. *Термоэлектричество*. 2006; (3): 66–74.
18. Ball C.A., Jesser W.A., Maddux J.R. The distributed Peltier effect and its influence on cooling devices. In: *Proceed. of XIV Inter. conf. on thermoelectrics. St. Petersburg, Russia. June 27–30, 1995*. St. Petersburg: A.F. Ioffe Physical-Technical Institute; 1995. P. 305–309.
19. Драбкин И.А. Оптимизация составной охлаждающей ветви. *Физика и техника полупроводников*. 2017; 51(7): 952–954.
20. Marlow R., Burke E. Module design and fabrication. In: Rowe D.M. (ed.). *CRC Handbook of Thermoelectrics*; 1995. P. 597–607.
21. Mahan G., Sales B., Sharp J. Thermoelectric materials: New approaches to an old problem. *Physics Today*. 1997; 50(3): 42–47. <https://doi.org/10.1063/1.881752>
22. Galperin V.L. A Generalized procedure to study multistage thermoelectric cooler operated in the regime of maximum energy efficiency. In: *Proceed. of XIV Inter. conf. on thermoelectrics. St. Petersburg, Russia. June 27–30, 1995*. St. Petersburg: A.F. Ioffe Physical-Technical Institute; 1995. P. 442–445.
23. Lavrentev M.G., Drabkin I.A., Ershova L.B., Volkov M.P. Improved extruded thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials*. 2020; 49(7): 2937–2942. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07988-0>
24. Драбкин И.А. Холодильный коэффициент составной охлаждающей термоэлектрической ветви. *Физика и техника полупроводников*. 2019; 53(5): 685–688. <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.05.47563.21>
25. Драбкин И.А., Ершова Л.Б. Сравнение различных подходов к оптимизации однокаскадных термоэлектрических модулей. В: *Сб. X Межгосудар. семинара «Термоэлектрики и их применение»*. Санкт-Петербург, ноябрь 2006 г. СПб.: ФТИ; 2006. С. 386–390.
26. Драбкин И.А., Дашевский З.М. Основные энергетические соотношения для холодильной ветви с учетом температурных зависимостей термоэлектрических параметров. В: *Сб. материалы VII Междунар. семинара по термоэлектричеству*. Санкт-Петербург; 2000. С. 292–297.
27. Semeniouk V.A., Berzverkbov D.B. Modeling and minimization of intercascade thermal resistance in multistage thermoelectric cooler, XVI ICT '97. In: *Proceed. ICT'97. 16th Inter. conf. on thermoelectrics (Cat. No. 97TH8291). Dresden, Germany, 26–29 August 1997*. IEEE; 1997. P. 701–704. <https://doi.org/10.1109/ICT.1997.667627>

## References

1. Nolas G.S., Sharp J., Goldsmid H.J. Thermoelectrics: Basic principles and new materials developments. Springer Berlin; 2001. 293 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04569-5>
2. Semenyuk V.A., Nechiporuk O.L. Maximum temperature reduction in composite semiconductor thermocouples. *Izvestiya vuzov: Energetika*. 1976; (2): 105–110. (In Russ.)
3. Bian Zh., Shakouri A. Beating the maximum cooling limit with graded thermoelectric materials. *Applied Physics Letters*. 2006; 89(21): 212101. <https://doi.org/10.1063/1.2396895>
4. Ioffe A.F. Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling. London: Infosearch ltd.; 1957. 254 p.
5. Burnshtein A.I. The physical basis of the calculation of semiconductor thermoelectric devices. Moscow: Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziki-tehnicheskoi literatury; 1962. 135 p. (In Russ.)
6. Stil'bans L.S. Physics of semiconductors. Moscow: Sovetskoe radio; 1967. 452 p. (In Russ.)
7. Buist R.J. The extrinsic Thomson effect (ETE). In: *Proceed. of XIV Inter. conf. on thermoelectrics. St. Petersburg, Russia. June 27–30, 1995*. St. Petersburg: A.F. Ioffe Physical-Technical Institute; 1995. P. 301–304.
8. Lukishker E.M., Vainer A.L., Somkin M.N., Vodolagin V.Yu. Thermoelectric coolers. Moscow: Radio i svyaz; 1983. 176 p. (In Russ.)
9. Drabkin I. Optimization of thermoelectric cooling and generator batteries. LAP LAMBERT Academic Publishing; 2017. 60 p.

10. Harman T.C. Special techniques for measurement of thermoelectric properties. *Journal of Applied Physics*. 1958; 29(9): 1373—1374. <https://doi.org/10.1063/1.1723445>
11. Babin V.P., Gorodetskiy S.M. Thermoelectric modules quality testing by a manufacturer. In: *Proceed. of XIV Inter. conf. on thermoelectrics. St. Petersburg, Russia. June 27–30, 1995*. St. Petersburg: A.F. Ioffe Physical–Technical Institute; 1995. P. 338—339.
12. Buist R.J. Methodology for testing thermoelectric materials and devices. In: Rowe D.M. (ed.). *CRC Handbook of Thermoelectrics*. London: CRC Press LLC; 1995. P. 189—209.
13. Vainer A.L., Kolomoets N.V., Lukishker E.M., Rzevskiy V.M. Towards the theory of a composite thermoelectric element. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 1977; 11(3): 546—552. (In Russ.)
14. Semeniyuk V.A., Svechnikova T.E., Ivanova L.D. Single stage thermoelectric coolers with temperature difference of 80 K. In: *Proceed. of XIII Inter. conf. on thermoelectrics. Kansas City, MO, 1994*. New York: AIP Press; 1994. P. 485—489.
15. Goldsmid H.J. Conversion efficiency and figure-of-merit. In: Rowe D.M. (ed.). *CRC Handbook of Thermoelectrics*. London: CRC Press; 1995. P. 19—25.
16. Vainer A.L. Cascade thermoelectric cold sources. Moscow: Sovetskoe radio; 1976. 137 p. (In Russ.)
17. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Malysheko V.V., Nekhai V.A. Cooling modules of segmented thermoelements. *Journal of Thermoelectricity*. 2006; (3): 64—71. (In Russ.)
18. Ball C.A., Jesser W.A., Maddux J.R. The distributed Peltier effect and its influence on cooling devices. In: *Proceed. of XIV Inter. conf. on thermoelectrics. St. Petersburg, Russia. June 27–30, 1995*. St. Petersburg: A.F. Ioffe Physical–Technical Institute; 1995. P. 305—309.
19. Drabkin I.A. Optimization of segmented cooling leg. *Semiconductors*. 2017; 51(7): 913—915. <https://doi.org/10.1134/S1063782617070077>
20. Marlow R., Burke E. Module design and fabrication. In: Rowe D.M. (ed.). *CRC Handbook of Thermoelectrics*; 1995. P. 597—607.
21. Mahan G., Sales B., Sharp J. Thermoelectric materials: New approaches to an old problem. *Physics Today*. 1997; 50(3): 42—47. <https://doi.org/10.1063/1.881752>
22. Galperin V.L. A Generalized procedure to study multistage thermoelectric cooler operated in the regime of maximum energy efficiency. In: *Proceed. of XIV Inter. conf. on thermoelectrics. St. Petersburg, Russia. June 27–30, 1995*. St. Petersburg: A.F. Ioffe Physical–Technical Institute; 1995. P. 442—445.
23. Lavrentev M.G., Drabkin I.A., Ershova L.B., Volkov M.P. Improved extruded thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials*. 2020; 49(7): 2937—2942. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07988-0>
24. Drabkin I.A. Coefficient of the performance of a segmented thermoelectric cooling leg. *Semiconductors*. 2019; 53(5): 678—681. <https://doi.org/10.1134/S1063782619050051>
25. Drabkin I.A., Ershova L.B. Comparison of different approaches to optimization of single-cascade thermoelectric modules. In: *Proceed. of the 10th Inter. seminar "Thermoelectrics and Their Application". St. Petersburg, November 2006*. St. Petersburg: FTI; 2006. P. 386—390. (In Russ.)
26. Drabkin I.A., Dashevskiy Z.M. The main energy ratios for the refrigeration leg taking into account the temperature dependences of thermoelectric parameters. In: *Proceed. of the VII Inter. seminar on thermoelectricity. St. Petersburg; 2000*. P. 292—297. (In Russ.)
27. Semeniyuk V.A., Berzverkbv D.B. Modeling and minimization of intercascade thermal resistance in multi-stage thermoelectric cooler, XVI ICT '97. In: *Proceed. ICT'97. 16th Inter. conf. on thermoelectrics (Cat. No. 97TH8291). Dresden, Germany, 26–29 August 1997*. IEEE; 1997. P. 701—704. <https://doi.org/10.1109/ICT.1997.667627>

### Информация об авторах / Information about the authors

**Волков Михаил Петрович** — канд. техн. наук, директор по качеству, ООО «РМТ», Варшавское ш., 46, Москва, 115230, Российская Федерация; e-mail: [mikhail.volkov@rmtltd.ru](mailto:mikhail.volkov@rmtltd.ru)

**Mikhail P. Volkov** — Cand. Sci. (Eng.), Quality Director, RMT Ltd., 46 Warshavskoe Highway, Moscow 115230, Russian Federation; e-mail: [mikhail.volkov@rmtltd.ru](mailto:mikhail.volkov@rmtltd.ru)

**Воробьев Дмитрий Владимирович** — руководитель отдела разработок, ООО «РМТ», Варшавское ш., 46, Москва, 115230, Российская Федерация; e-mail: [dmitriy.vorobiev@rmtltd.ru](mailto:dmitriy.vorobiev@rmtltd.ru)

**Dmitry V. Vorobyev** — Head of Development Department, RMT Ltd., 46 Warshavskoe Highway, Moscow 115230, Russian Federation; e-mail: [dmitriy.vorobiev@rmtltd.ru](mailto:dmitriy.vorobiev@rmtltd.ru)

**Драбкин Игорь Абрамович** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ООО «РМТ», Варшавское ш., 46, Москва, 115230, Российская Федерация; e-mail: [igordrabk@gmail.com](mailto:igordrabk@gmail.com)

**Igor A. Drabkin** — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, RMT Ltd., 46 Warshavskoe Highway, Moscow 115230, Russian Federation; e-mail: [igordrabk@gmail.com](mailto:igordrabk@gmail.com)

**Ершова Любовь Борисовна** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ООО «РМТ», Варшавское ш., 46, Москва, 115230, Российская Федерация; e-mail: [liubov.ershova@rmtltd.ru](mailto:liubov.ershova@rmtltd.ru)

**Lyubov B. Ershova** — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, RMT Ltd., 46 Warshavskoe Highway, Moscow 115230, Russian Federation; e-mail: [liubov.ershova@rmtltd.ru](mailto:liubov.ershova@rmtltd.ru)

**Лаврентьев Михаил Геннадьевич** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ООО «РМТ», Варшавское ш., 46, Москва, 115230, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2845-8366>; e-mail: [lavrentev.mihail@gmail.com](mailto:lavrentev.mihail@gmail.com)

**Mikhail G. Lavrentev** — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, RMT Ltd., 46 Warshavskoe Highway, Moscow 115230, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2845-8366>; e-mail: [lavrentev.mihail@gmail.com](mailto:lavrentev.mihail@gmail.com)

Поступила в редакцию 03.06.2024; поступила после доработки 31.07.2024; принята к публикации 24.01.2025  
Received 3 June 2024; Revised 31 July 2024; Accepted 24 January 2025

\* \* \*

## VI Международная научная конференция «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов»

В рамках крупного научного проекта «Математические модели и численные методы как основа для разработки робототехнических комплексов, новых материалов и интеллектуальных технологий конструирования» 21–23 октября 2024 г. в Москве в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН) прошла VI Международная научная конференция «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов» (ММЭК–2024). Организаторы научного форума — ФИЦ ИУ РАН, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО НИИМЭ), факультет Вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова, Консорциум «Перспективные материалы и элементная база информационных и вычислительных систем», Научный совет РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для их создания».

В работе конференции приняли участие ведущие специалисты в области математического моделирования в материаловедении ЭКБ (электронно-компонентной базы), в области физики твердого тела, неорганической химии, представляющие ведущие научные школы Москвы, Новосибирска, Хабаровска, регионов РФ и ближнего и дальнего зарубежья. Главной задачей конференции стало представление широкой общественности результатов исследований в области моделирования и создания новых наноматериалов, а также устройств на их основе для современной наноэлектроники.

На секциях конференции были рассмотрены: современные проблемы создания исследовательской инфраструктуры для синтеза новых материалов с заданными свойствами, включая применение новых методов и средств анализа больших данных; квантовые технологии. Проблемы развития материаловедения квантоворазмерных электронных гетероструктур; математическое моделирование в структурном материаловедении (многоуровневые, многомасштабные модели, имитационные модели и т.д.); моделирование размерных, радиационных, поверхностных и других дефектов в полупроводниковой наноэлектронике; моделирование структур и свойств конструкционных материалов для производства изделий ЭКБ, включая композиционные материалы с нанокристаллами, нанокластерами, наноморфными включениями и т.д.; проблемы обеспечения надежности ЭКБ микроэлектроники и систем на ее основе; методы математического моделирования в фотонике.

21 октября 2024 г. на открытии конференции с приветственным словом выступил директор ФИЦ ИУ РАН, чл.-корр. РАН Посыпкин Михаил Анатольевич. На пленарном заседании выступили: д.ф.-м.н. Зацаринный А.А. с докладом на тему «О научных результатах российских ученых в развитии материаловедения. К 300-летию РАН», д.ф.-м.н. Абгарян К.К. с докладом на тему «Компьютерное моделирование работы ячеек энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM», к.т.н. Тельминов О.А. «Особенности архитектур нейро- и нейроморфных процессоров».

