

Михайловский В.Я., Вихор Л.Н., Максимук Н.В., Мочернюк Р.Н.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАСКАДНЫХ МОДУЛЕЙ С СЕКЦИОННЫМИ ВЕТВЯМИ НА ОСНОВЕ Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS

Представлены результаты компьютерного проектирования генераторных каскадных модулей на основе Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS с секционными ветвями для повышения эффективности термоэлектрического преобразования энергии. С использованием трехмерной модели найдены оптимальные материалы секций ветвей для каждого из каскадов и межкаскадная температура, при которой КПД каскадного модуля достигает максимального значения. Представлены сравнительные энергетические характеристики таких модулей в диапазоне рабочих температур 30–500 °С. Проектирование проведено с учетом температурных зависимостей параметров материалов, тепловых и электрических потерь на контактах секций и коммутациях каскадов.

Ключевые слова: компьютерное проектирование, трехмерная модель, каскадные генераторные модули, секционные ветви, эффективность, термоэлемент.

The results of computer design of generator staged modules based on Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS with segmented legs for improved efficiency of thermoelectric power conversion are presented. A three-dimensional model was used to find the optimal parameters of leg segment materials for each stage and the inter-stage temperature whereby the efficiency of staged module achieves maximum value. Comparative energy characteristics of such modules in the operating temperature range 30–500 °C are given. Design was performed with regard to the temperature dependences of material parameters, the thermal and electrical losses on segment contacts and stage connections.

Key words: computer design, three-dimensional model, staged generator modules, segmented legs, efficiency, thermoelement.

Введение

На сегодня традиционные методы повышения эффективности термоэлектрического превращения энергии в основном сводятся к созданию материалов с высокими значениями добротности ZT [1, 2]. Однако, несмотря на многочисленные исследования, реального улучшения добротности за последние 40 лет получить так и не удалось [3, 4]. Для кристаллических термоэлектрических материалов, в настоящее время применяемых в промышленности (материалы на основе Bi - Te , Pb - Te , Ag - Sb - Ge - Si), значения ZT на уровне 1.0–1.6 были достигнуты еще в середине прошлого столетия [5]. А внедрение наноструктурных материалов, ZT которых хоть и выше по сравнению с кристаллическими, является сейчас экономически невыгодным из-за высокой стоимости технологий их изготовления [6]. В связи с этим актуальными становятся принципиально новые подходы для повышения эффективности термоэлектрического преобразования, которые не связаны с ростом параметра добротности материалов, а направлены на разработку схем для рационального использования подведенного тепла [7–9].

Результатом практического применения таких схем стало создание каскадных термоэлектрических модулей на основе Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS, где каждый из каскадов оптимизирован на

свой уровень рабочих температур, что позволило повысить КПД термоэлектрического преобразования ~1.5 раза [10–12]. В свою очередь, для дальнейшего увеличения эффективности каскадных структур ни один из вариантов тепловых схем пока не используется.

С другой стороны КПД термоэлектрических преобразователей можно повысить, изготавливая ветви термоэлементов не из однородных материалов, а в виде секций. При этом для каждой секции можно подобрать свой материал в соответствующем интервале температур таким образом, чтобы обеспечить максимальную добротность ветви в целом [13, 14].

Поэтому целью нашей работы была оценка возможности повышения эффективности каскадных термоэлектрических модулей из материалов на основе Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS путем использования в термоэлементах каждого каскада секционных ветвей.

Физическая модель каскадного модуля с секционными ветвями и ее описание

Физическая модель каскадного модуля с секционными ветвями показана на рис. 1, а. Каждый каскад состоит из термоэлементов, выполненных в виде секций из разных термоэлектрических материалов и соединенных между собой электрически – последовательно и термически – параллельно. Для компьютерного проектирования использовалась модель элементарной структурной единицы такого модуля – блок из двух термоэлементов, которые состоятся из N -количества секций. Каждый термоэлемент оптимизирован на уровень рабочих температур «горячего» и «холодного» каскада соответственно (рис. 1, б).

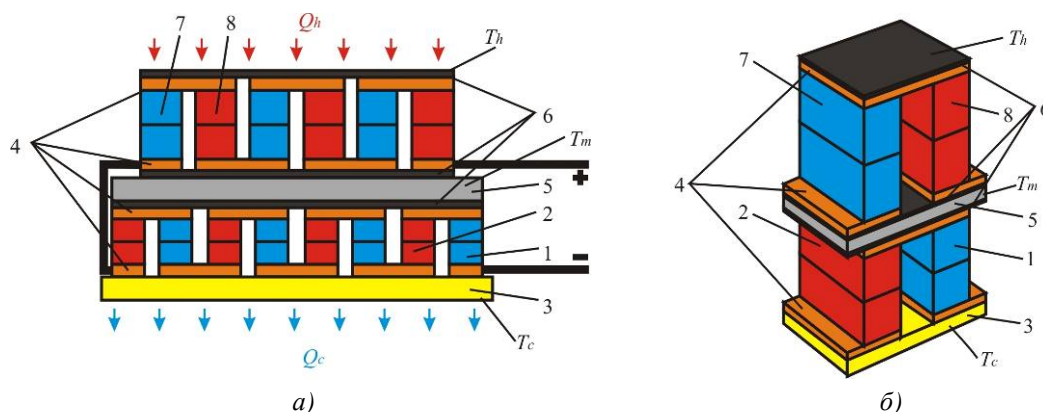


Рис. 1. Физическая модель двухкаскадного модуля (а) и его элементарной структурной единицы (б):

- 1, 2 – секционные n - и p - ветви холодного каскада; 3 – керамическая пластина;
- 4 – коммутационные пластины; 5 – теплопроводящая пластина;
- 6 – электроизоляция; 7, 8 – секционные n - и p - ветви горячего каскада.

В модели учтено контактное сопротивление между ветвями, секциями ветвей и коммутационными пластинами. Температуры на тепловыделяющих и теплопоглощающих поверхностях T_h и T_c термоэлемента фиксированы, боковая поверхность адиабатически изолирована. Параметры термоэлектрических материалов являются функцией температуры и концентрации легирующих примесей. Объем между ветвями заполнен воздухом с теплопроводностью κ_{air} . Для нахождения максимального КПД необходимо найти оптимальное распределение плотности тока в каскадах и оптимальную межкаскадную температуру.

Решение поставленной задачи реализуется численным методом последовательных приближений с использованием программной среды «Comsol Multiphysics» [15]. Выбором геометрических размеров термоэлементов достигается электрическая согласованность каскадов и согласованность между каскадами по тепловому потоку.

Математическое описание модели

Для описания потоков тепла и электричества в таком термоэлементе использовались законы сохранения энергии

$$\operatorname{div} \vec{W} = 0 \quad (1)$$

и электрического заряда

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2)$$

где

$$\vec{W} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (3)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (4)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T \quad (5)$$

Здесь \vec{W} – плотность потока энергии, \vec{j} – плотность электрического тока, U – электрический потенциал, T – температура, α , σ , κ – коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности материалов.

Учитывая (3) – (5), получим:

$$\vec{W} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (6)$$

Тогда законы сохранения (1), (2) приобретают вид:

$$-\nabla [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla [(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (7)$$

$$-\nabla (\sigma \alpha \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \quad (8)$$

Этими нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных (7) и (8) определяются распределения температуры T и потенциала U в материалах ветвей, контактных, коммутационных и изоляционных слоях термоэлемента.

Граничные условия для решения уравнений (7) и (8) выбирались следующим образом. Фиксировались температуры теплопоглощающей и тепловыделяющей поверхностей термоэлемента $T_h = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_c = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Задавалось нулевое значение потенциала на коммутационной пластине ветви n -типа проводимости. На другой коммутационной пластине ветви p -типа проводимости задавалось значение U , которое представляет половину термоЭДС, генерируемой термоэлементом. В свою очередь значение генерируемой термоЭДС определялось системой уравнений (7) и (8) при отсутствии протекания тока через термоэлемент.

На границах ветвей и контактного слоя, контактного слоя и коммутационных пластин, изоляционных и коммутационных пластин учитывались условия равенства температур и тепловых потоков.

Общее уравнение программы «Comsol Multiphysics»:

$$\nabla(-C \nabla M + \alpha M + \gamma) + \delta M + \beta \nabla M = f, \quad (9)$$

где

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}, \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix}, \quad \delta = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{bmatrix},$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} T \\ U \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Из анализа выражений (7) – (10) следует, что уравнение (9) можно упростить к следующему виду:

$$\nabla(-C \nabla M) = 0. \quad (11)$$

Дифференциальное уравнение для компонент матрицы M имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \nabla(-C_{11} \nabla T) + \nabla(-C_{12} \nabla U) &= 0 \\ \nabla(-C_{21} \nabla T) + \nabla(-C_{22} \nabla U) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Сравнивая законы сохранения в виде (7), (8) с уравнениями (12) получим коэффициенты для компьютерной модели:

$$C = \begin{pmatrix} \kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma & \alpha \sigma T + U \sigma \\ \sigma \alpha & \sigma \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Результаты исследований

Используя описанный метод рассчитаны энергетические характеристики двухкаскадных модулей с двух- и трехсекционными ветвями.

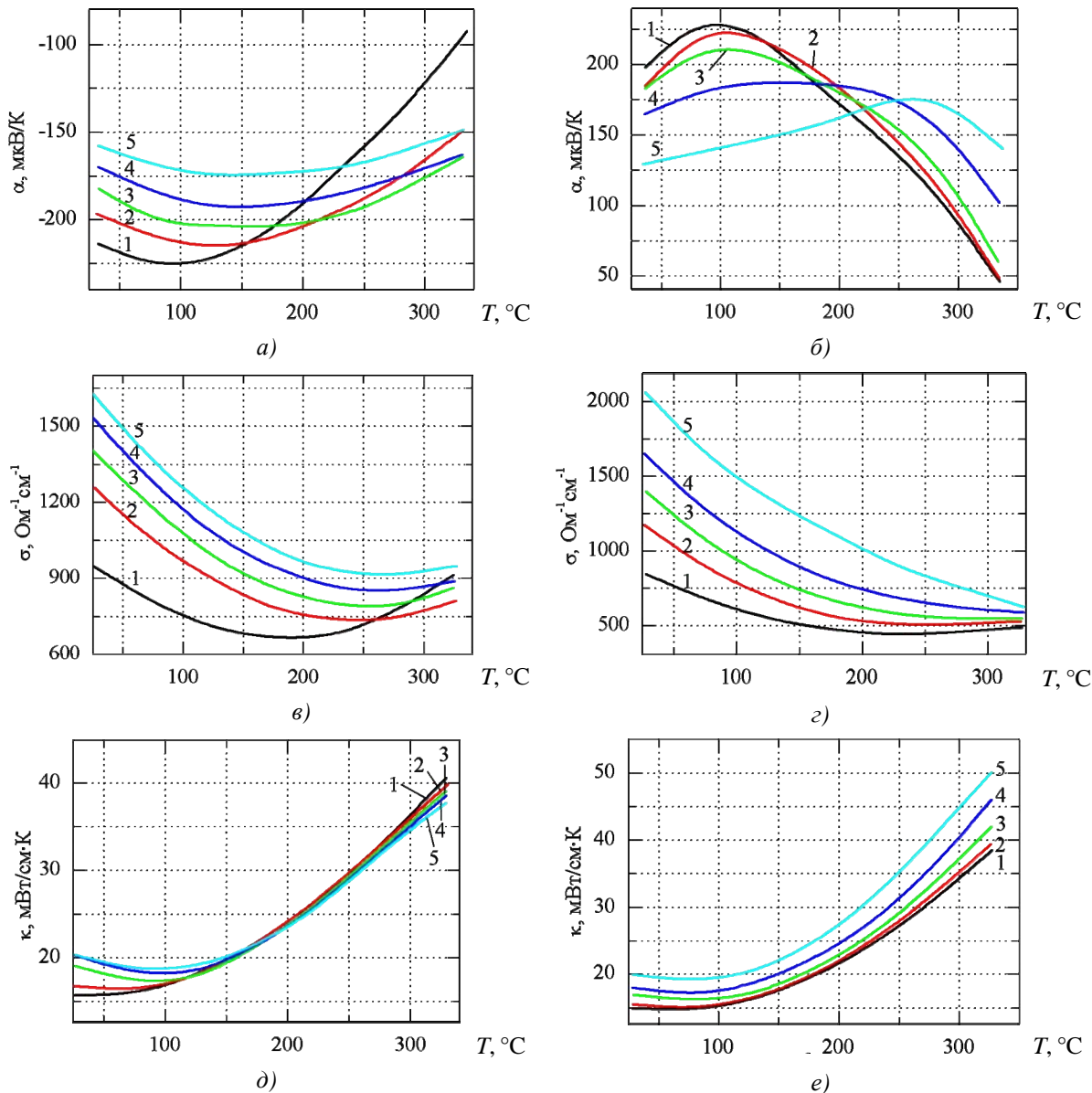


Рис. 2. Температурные зависимости термоэлектрических параметров материалов холодного каскада, с различными значениями электропроводности σ_0^n , σ_0^p при $T = 300 \text{ K}$ [16]:

а) $n\text{-(Bi}_2\text{Te}_3)_{0.90}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.05}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.05}$, легированный иодом (1 – $\sigma_0^n = 970 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$; 2 – $\sigma_0^n = 1250 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$; 3 – $\sigma_0^n = 1400 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$; 4 – $\sigma_0^n = 1550 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$; 5 – $\sigma_0^n = 1650 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$);

б) $p\text{-(Bi}_2\text{Te}_3)_{0.25}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.72}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.03}$, легированный свинцом (1 – $\sigma_0^p = 880 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$; 2 – $\sigma_0^p = 1100 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$; 3 – $\sigma_0^p = 1380 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$; 4 – $\sigma_0^p = 1660 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$; 5 – $\sigma_0^p = 2000 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$).

В качестве входных данных использовали экспериментально измеренные в [16-18] температурные зависимости термоэлектрических параметров α , σ , κ материалов на основе n - и p - Bi_2Te_3 для холодного и n - PbTe и p - TAGS – для горячего каскада соответственно.

Температурные зависимости, показанные на рис. 2, 3, аппроксимировались двумерными полиномами (рис 4, 5) в виде $\alpha^{n,p} = \alpha^{n,p}(x_0^{n,p}, T)$, $\sigma^{n,p} = \sigma^{n,p}(x_0^{n,p}, T)$, $\kappa^{n,p} = \kappa^{n,p}(x_0^{n,p}, T)$, коэффициенты которых вводились в компьютерную программу.

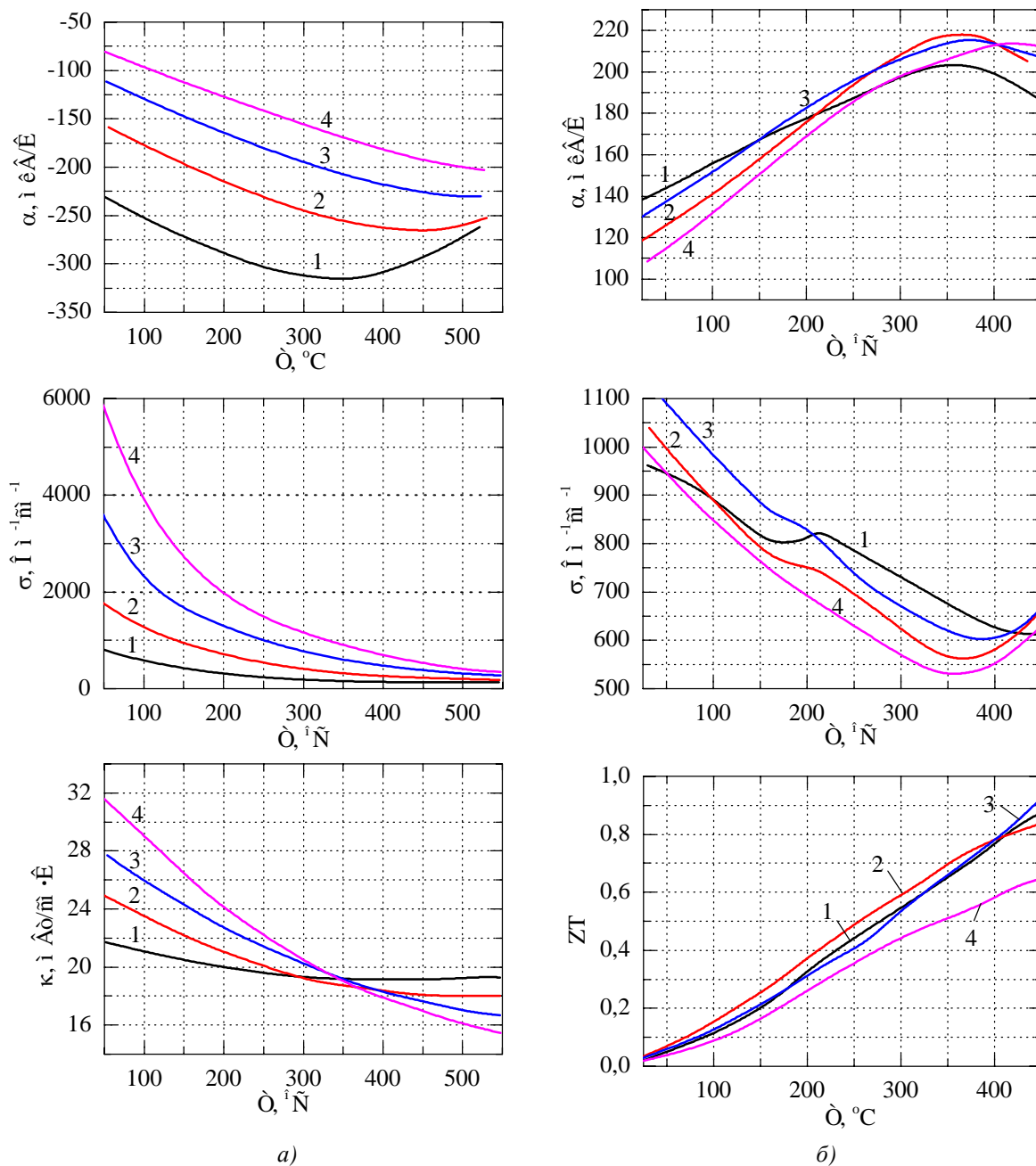


Рис. 3. Температурные зависимости термоэлектрических параметров материалов горячего каскада n - PbTe и p - TAGS :

а) $\text{PbTe} < x \text{ мл. \% PbI}_2 >$ (1 – $x=0.01$; 2 – $x=0.03$; 3 – $x=0.055$; 4 – $x=0.1$) [17];

б) $(\text{GeTe})_{80}(\text{Ag}_y\text{Sb}_{2-y}\text{Te}_{3-y})_{20}$ (1 – $y=0.8$; 2 – $y=1.0$; 3 – $y=1.2$; 4 – $y=1.4$) [18].

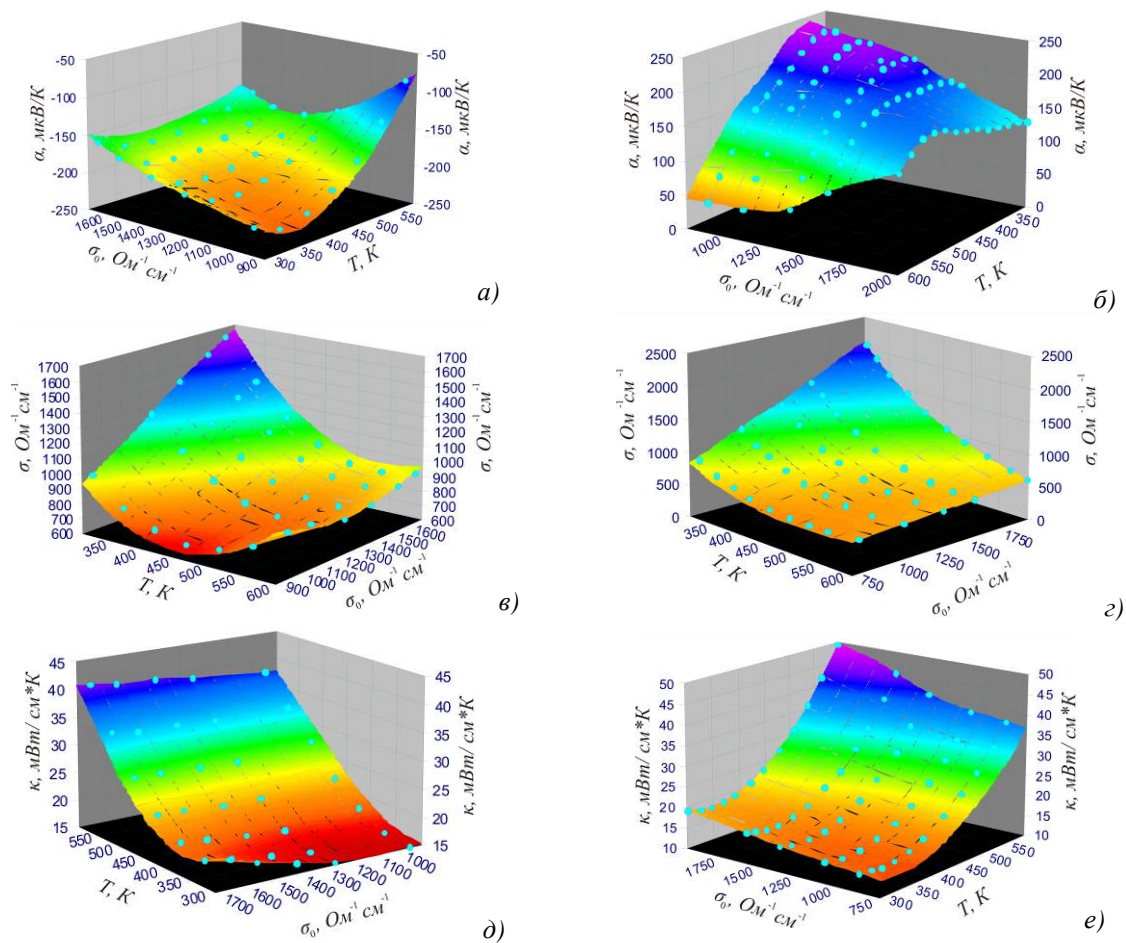
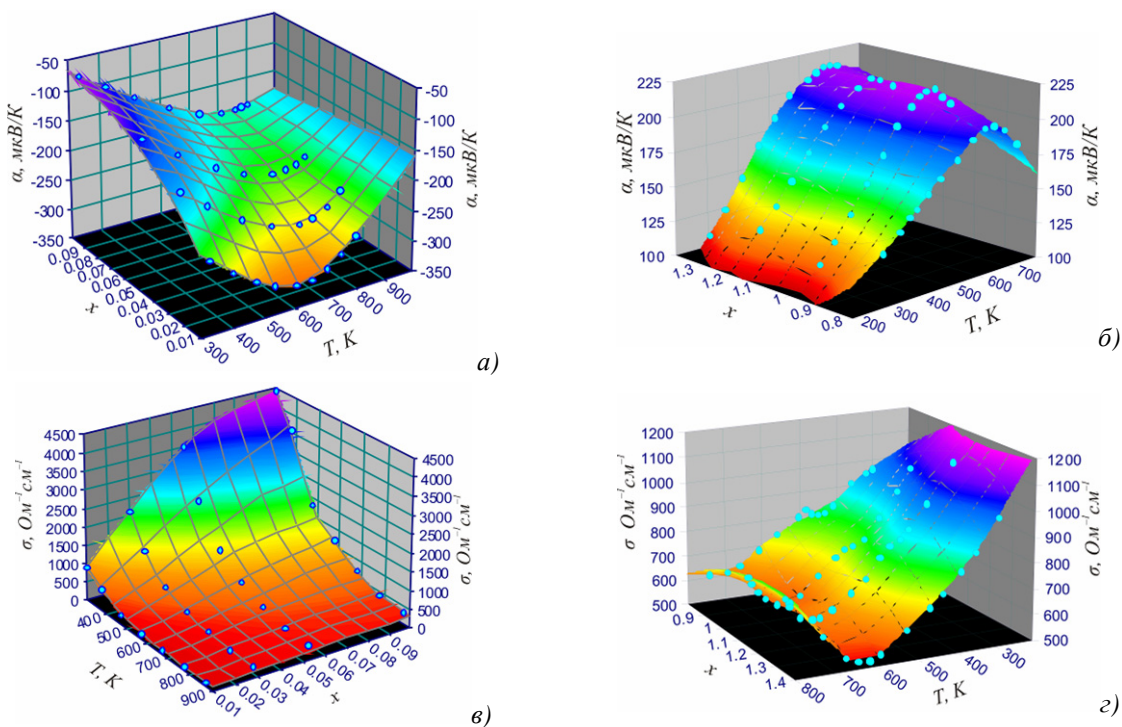


Рис. 4. Температурно-концентрационные зависимости термоэлектрических параметров материалов для холодного каскада а), в), д) $n\text{-}(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.90}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.05}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.05}$, легированный иодом. б), г), е) $p\text{-}(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.25}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.72}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.03}$, легированный свинцом.



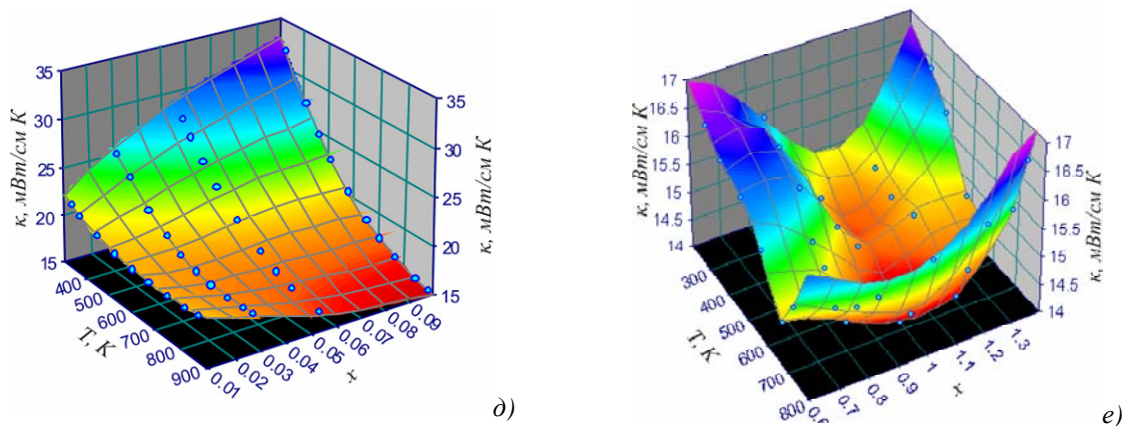


Рис. 5. Температурно-концентрационные зависимости термоэлектрических параметров материалов горячего каскада:
 а), в), д) $n\text{-PbTe} < x \text{ м.л. \% PbI}_2 >$; б), з), е) $p\text{-}(Ag_{0.5}Sb_{0.5}Te_{1-x})(Pb_{0.16}Ge_{0.84}Te)_x$.

В результате моделирования получены распределения температуры и электрического потенциала в двухкаскадном модуле с двухсекционными и трехсекционными ветвями (рис. 6, 7).

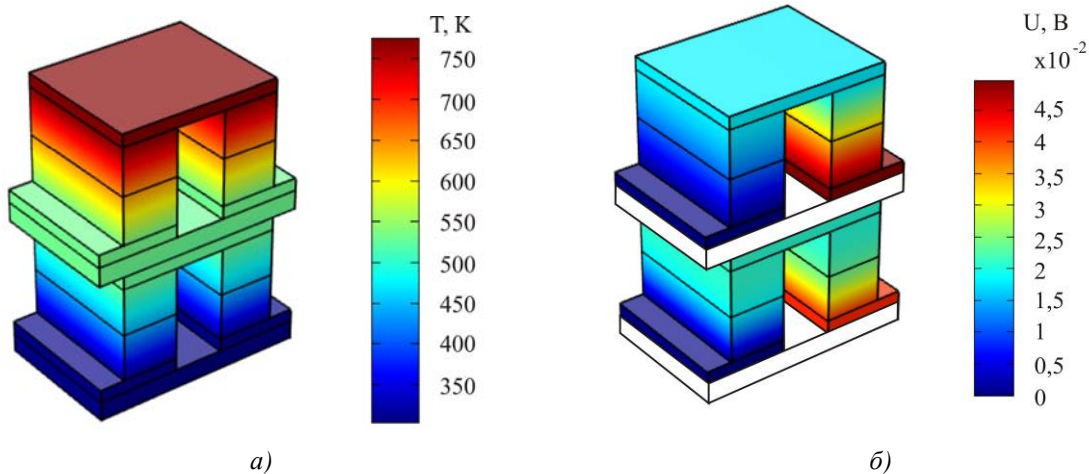


Рис. 6. Распределение температур (а) и потенциала (б) в каскадном модуле с двухсекционными ветвями.

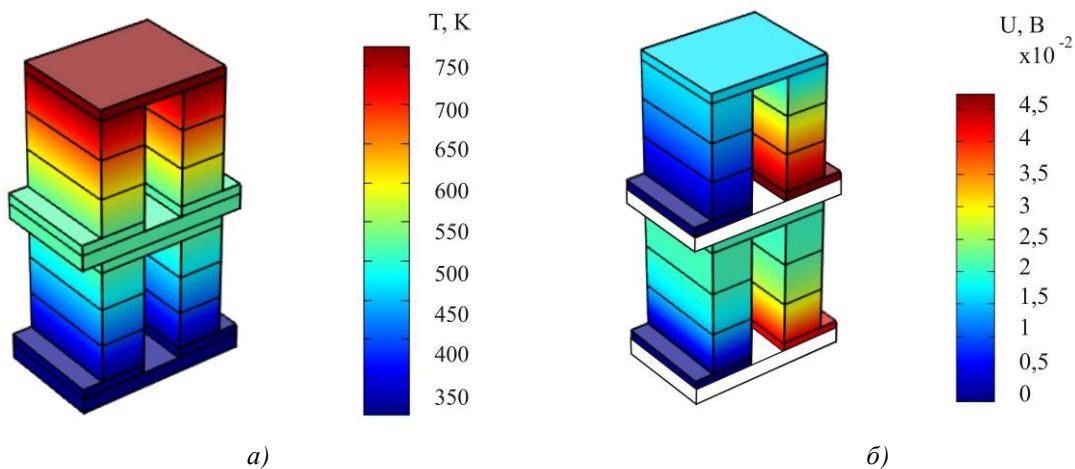


Рис. 7. Распределение температур (а) и потенциала (б) в каскадном модуле с трехсекционными ветвями.

Оптимальные параметры материалов секций для каскадного модуля приведены в таблице 1. Оптимизация проводилась путем определения таких концентраций примесей в материалах каждой секции, при которых КПД каскадного модуля в температурном интервале 30 – 250 °С и 250 – 500 °С достигает максимальных значений. Величины контактных сопротивлений в расчетах приняты равными $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см на спаях термоэлементов и $1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см – на границах между секциями ветвей.

Таблица 1

Оптимальные материалы секций каскадного модуля

Модуль	Каскад	Ветвь	Секция	Материал	Концентрация	
Каскадный с двухсекц. ветвями	холодный	n-тип	первая	$(Bi_2Te_3)_{0.90}(Sb_2Te_3)_{0.05}(Sb_2Se_3)_{0.05}$, легированный иодом	$\sigma_0 = 1250$ Ом ⁻¹ см ⁻¹	
			вторая		$\sigma_0 = 1400$ Ом ⁻¹ см ⁻¹	
		p-тип	первая	$(Bi_2Te_3)_{0.25}(Sb_2Te_3)_{0.72}(Sb_2Se_3)_{0.03}$, легированный свинцом	$\sigma_0 = 1100$ Ом ⁻¹ см ⁻¹	
			вторая		$\sigma_0 = 2000$ Ом ⁻¹ см ⁻¹	
		горячий	n-тип	первая	$PbTe+x$ мл.% PbI_2	$x = 0.055$
				вторая		$x = 0.1$
	p-тип		первая	$(Ag_{0.5}Sb_{0.5}Te)_{1-x}(Pb_{0.16}Ge_{0.84}Te)_x$	$x = 0.58$	
			вторая		$x = 0.6$	
	Каскадный с трехсекц. ветвями	холодный	n-тип	первая	$(Bi_2Te_3)_{0.90}(Sb_2Te_3)_{0.05}(Sb_2Se_3)_{0.05}$, легированный иодом	$\sigma_0 = 1380$ Ом ⁻¹ см ⁻¹
				вторая		$\sigma_0 = 1660$ Ом ⁻¹ см ⁻¹
третья				$\sigma_0 = 2000$ Ом ⁻¹ см ⁻¹		
p-тип			первая	$(Bi_2Te_3)_{0.25}(Sb_2Te_3)_{0.72}(Sb_2Se_3)_{0.03}$, легированный свинцом		$\sigma_0 = 1250$ Ом ⁻¹ см ⁻¹
			вторая			$\sigma_0 = 1400$ Ом ⁻¹ см ⁻¹
			третья			$\sigma_0 = 1550$ Ом ⁻¹ см ⁻¹
горячий		n-тип	первая	$PbTe+x$ мл.% PbI_2	$x = 0.6$	
			вторая		$x = 0.6$	
			третья		$x = 0.6$	
		p-тип	первая		$(Ag_{0.5}Sb_{0.5}Te)_{1-x}(Pb_{0.16}Ge_{0.84}Te)_x$	$x = 0.055$
			вторая			$x = 0.055$
			третья			$x = 0.1$

На рис. 8 а, б показана зависимость эффективности каскадного модуля с двух- и трехсекционными ветвями от межкаскадной температуры.

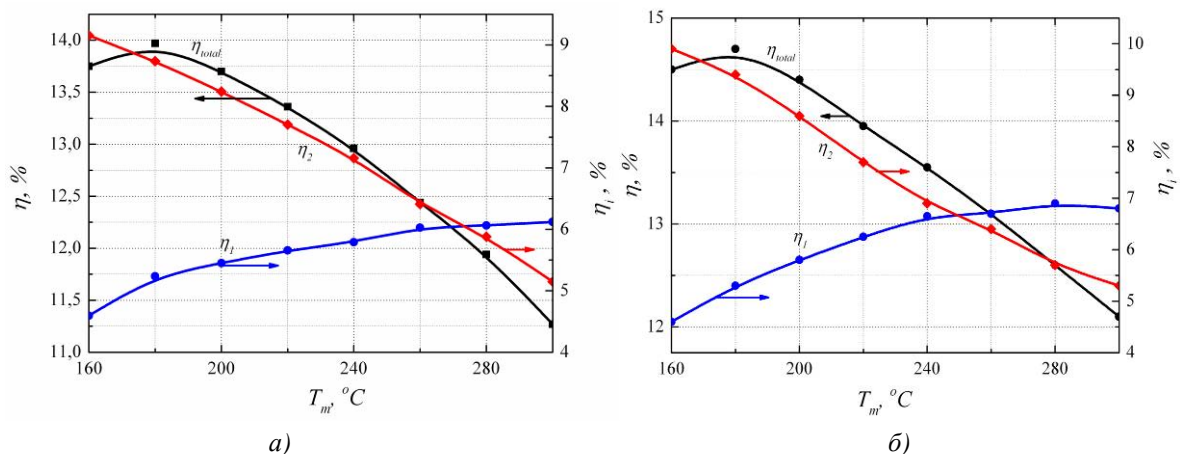


Рис. 8. Зависимость КПД холодного η_1 и горячего η_2 каскадов, а также обций КПД η_{total} двухкаскадного модуля с: а) двухсекционными ветвями; б) трехсекционными ветвями от межкаскадной температуры T_m ($T_h = 500^\circ\text{C}$, $T_c = 30^\circ\text{C}$).

Как видно из продемонстрированных данных, максимальный КПД каскадного модуля из двухсекционных ветвей составляет 14% при межкаскадной температуре на уровне 180 °С. При этой межкаскадной температуре и температурах горячей стороны 500°С, холодной – 30 °С распределение эффективности по каскадам следующее: холодный каскад – 5.2%, горячий каскад – 8.8% (рис. 8, а). В случае трехсекционных ветвей (рис. 8, б) максимальная эффективность каскадного модуля возрастает до 14.7 %, что связано в основном с увеличением η горячего каскада ($\eta_2 = 9.4\%$). Использование третьей секции в холодном каскаде на повышение общего КПД η_{total} модуля существенно не влияет ($\eta_1 = 5.3\%$).

На рис. 9 представлены сравнительные зависимости эффективности двухкаскадного модуля на основе материалов Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS с однородными, двух- и трехсекционными ветвями от межкаскадной температуры.

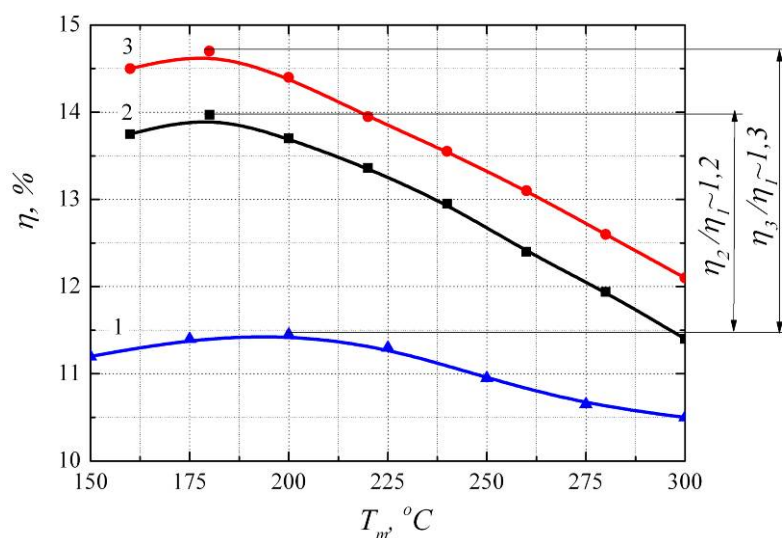


Рис. 9. Зависимость эффективности двухкаскадного модуля с 1 – однородными ветвями; 2 – двухсекционными ветвями; 3 – трехсекционными ветвями от межкаскадной температуры T_m .

Из анализа рис. 9 следует, что максимальное повышение КПД двухкаскадного модуля из Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS в диапазоне рабочих температур 30 – 500 °С наблюдается при переходе от односекционных ветвей к двухсекционным и составляет ~ 20%. Введение третьей секции позволяет увеличить эффективность термоэлектрического преобразования еще на 5%.

С целью исследования влияния количества секций на общую эффективность модуля аналогичные расчеты проводились для двухкаскадного модуля с четырехсекционными ветвями (рис. 10).

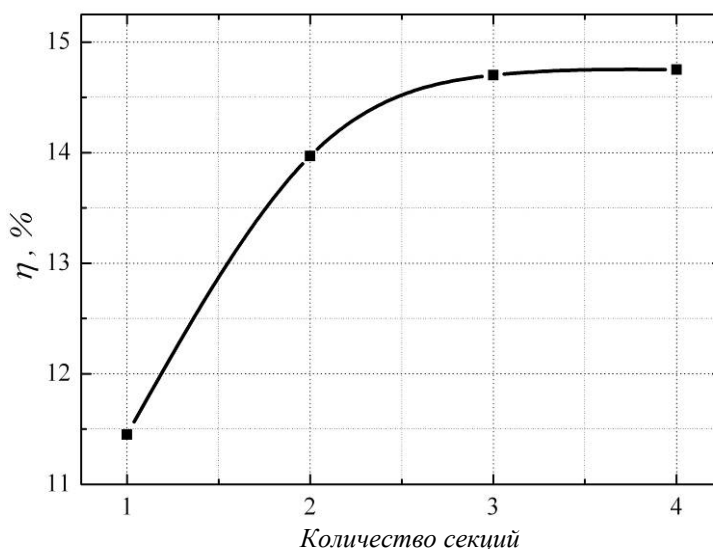


Рис. 10. Зависимость максимальной эффективности двухкаскадного модуля из материалов на основе Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS от количества секций в ветвях термоэлементов.

Расчеты показывают, что применение четырех секций в ветвях каждого из каскадов нецелесообразно, поскольку КПД такого модуля будет составлять ~14.75%. Вклад четвертой секции в повышение максимального КПД не превышает 0.5% по сравнению с модулем, где использованы трехсекционные ветви. Такое поведение КПД обусловлено прежде всего дополнительным контактным сопротивлением в местах соединения секций, которое в свою очередь приводит к увеличению количества тепла Джоуля.

На основе результатов компьютерного проектирования рассчитаны электрические параметры элементарной структурной единицы двухкаскадного модуля в случае двух- и трехсекционных ветвей (табл. 2).

Таблица 2

Электрические параметры элементарной структурной единицы двухкаскадного модуля с двух- и трехсекционными ветвями. Поперечное сечение ветвей 1.8×4.3 мм.

Количество секций	U, В	I, А	P, Вт	Высота ветвей каскадов, мм
2 секции	0.09	2.76	0.25	$h_1 = 3$ мм $h_2 = 7$ мм
3 секции	0.09	3.1	0.28	$h_1 = 3$ мм $h_2 = 7.5$ мм

Используя данные, приведенные в таблице 2, можно спроектировать термоэлектрический генераторный модуль с необходимыми электрическими характеристиками. Например, для создания двухкаскадного модуля с двухсекционными ветвями электрической мощностью 5 Вт, при условии последовательного соединения термоэлементов, необходимо 20 «блоков». При этом исходное электрическое напряжение такого модуля будет составлять 1.8 В.

Выводы

1. Представлен метод повышения эффективности термоэлектрических генераторных двухкаскадных модулей из материалов на основе Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS путем использования в термоэлементах каждого каскада секционных ветвей.
2. Компьютерными методами осуществлено проектирование и определена эффективность таких модулей с двухсекционными и трехсекционными ветвями в диапазоне рабочих температур 30 – 500 °С. Показано, что максимальная эффективность каскадных модулей с двух- и трехсекционными ветвями достигается при межкаскадной температуре на уровне 180 °С и составляет 14% и 14.7% соответственно.
3. Использование в каскадах модуля термоэлементов с двухсекционными и трехсекционными ветвями позволяет повысить эффективность термоэлектрического преобразования энергии на 20 – 25% по сравнению с традиционным каскадным модулем на основе Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS. Дальнейшее наращивание количества секций ветвей в каскадах малоэффективно, вследствие увеличения выделения тепла в местах контактных сопротивлений.

Литература

1. Иоффе А. Ф. Термоэлектричество в полупроводниках / А. Ф. Иоффе // Журнал Технической Физики. – 1953. – Т. 23, №8. – С. 1452 – 1459.
2. Иоффе А. Ф. О повышении эффективности полупроводниковых термопар / А. Ф. Иоффе, С. В. Айрапетянц, А. В. Иоффе [та ін.] // ДАН СССР. – 1956. – Т. 106, №6. – С. 981 – 983.
3. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 / Б. М. Гольцман, В. А. Кудинов, И. А. Смирнов – М.: Наука, 1972. – 320 с.
4. Yim W. M. Compound tellurid and their alloys for peltier colling / W. M. Yim, F. D. Rosi // Solid-State Electronics. – 1972. – V. 15, № 10. – P. 1121 – 1134.
5. Anatyshuk L. I. Thermoelectricity: Functionally Graded Thermoelectric Materials / L. I. Anatyshuk, L. N. Vikhor. – Chernivtsi, 2012. – Vol. IV – 172 p.
6. Булат Л.П., Бочков Л.В., Нефедова И.А., Ахыска Р. Наноструктурирование как способ повышения эффективности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – №4(92). – С. 48-56.
7. Анагичук Л.І., Лусте О.Я., Михайловський В.Я. Секційні термоелектричні генератори на органічному паливі // Термоелектрика. – 2005. – №4. – С. 20-25.
8. Михайловский В.Я. Физические модели термогенераторов на органическом топливе. Основные пути повышения их эффективности и расширения практического применения // Термоэлектричество. – 2005. – №2. – С. 7-42.
9. Анагичук Л.І., Михайловський В.Я. Двохсекційний термоелектричний генератор на газовому паливі // Термоелектрика. – 2008. – №1. – С. 76-86.
10. Анагичук Л.И. Компьютерное проектирование каскадных модулей для генераторов / Л.И. Анагичук, Л.Н. Вихор // Термоэлектричество. – 2002. – №4. – С. 19 – 27.

11. Михайловський В.Я., Білінський-Слотило В.Р. Термоелектричні каскадні модулі з матеріалів на основі Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS // Термоелектрика. – 2012. – №4. – С. 67-74.
12. Вихор Л.М. Оптимізація матеріалів та оцінка характеристик генераторних модулів для рекуператорів тепла / Л.М. Вихор, В.Я. Михайловський, Р.М. Мочернюк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2014. – №1. – Т15. – С. 206-213.
13. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Лудчак І.Ю., Термена І.С. Проектування й технологія генераторних модулів із секційних термоелементів на основі Bi - Te // Термоелектрика. – 2010. – №1. – С. 58-69.
14. Струтинська Л.Т. Проектування секційних модулів на основі $PbTe$ /TAGS для термоелектричних генераторів. / Л.Т. Струтинська, В.Р. Білінський-Слотило, В.Я. Михайловський // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – №4. – Т. 13. – С. 1032-1036.
15. <http://www.comsol.com>
16. L.N. Vikhor, L.I. Anatyshuk, Generator Modules of Segmented Thermoelements, Energy Conversion and Management 50, 2366 (2009).
17. Шперун В.М. Термоелектричество теллурида свинца и его аналогов / Шперун В.М., Фрейк Д.М., Запхляк Р.И. – Ивано-Франковск: Плай. 2000. – 250 с.
18. Yusufu, K. Kurosaki, T. Sugahara et al. Thermoelectric properties and microstructures of $AgSbTe_2$ -added p -type $Pb_{0.16}Ge_{0.84}Te$, Phys. Status Solidi A 209 (1), 167 (2012).

Поступила в редакцію 11.04.2015.