

**Михайловський В.Я., Вихор Л.М.,
Максимук М.В., Мочернюк Р.М.**

Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна

ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ КАСКАДНИХ МОДУЛІВ ІЗ СЕКЦІЙНИМИ ВІТКАМИ НА ОСНОВІ Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS

Наведено результати комп'ютерного проектування генераторних каскадних модулів на основі Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS з секційними вітками для підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії. З використанням трьохвимірної моделі знайдено оптимальні параметри матеріалів секцій віток для кожного з каскадів та міжкаскадну температуру, за якої ККД каскадного модуля досягає максимального значення. Подано порівняльні енергетичні характеристики таких модулів у діапазоні робочих температур 30 – 500 °С. Проектування здійснено з урахуванням температурних залежностей параметрів матеріалів, теплових і електричних втрат на контактах секцій і комутаціях каскадів.

Ключові слова: комп'ютерне проектування, трьохвимірний модель, каскадні генераторні модулі, секційні вітки, ефективність, термоелемент.

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.

Вступ

На сьогодні традиційні методи підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії в основному зводяться до створення матеріалів з високими значеннями добротності ZT [1, 2]. Однак, незважаючи на численні дослідження, реального покращення добротності за останні 40 років отримати так і не вдалося [3, 4]. Для кристалічних термоелектричних матеріалів, що нині застосовуються в промисловості (матеріали на основі Bi - Te , Pb - Te , Ag - Sb - Ge - Si), значення ZT на рівні 1.0-1.6 були досягнуті ще в середині минулого століття [5]. А впровадження наноструктурних матеріалів, які хоч і володіють вищими значеннями ZT порівняно з кристалічними, є наразі економічно не вигідним через високу вартість технологій їх виготовлення [6]. У зв'язку з цим актуальними стають принципово нові підходи для підвищення ефективності термоелектричного перетворення, що не пов'язані зі зростанням параметра добротності матеріалів, а спрямовані на розробку схем для раціонального використання підведеного тепла [7-9].

Результатом практичного застосування таких схем стало створення каскадних термоелектричних модулів на основі Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS, де кожний з каскадів оптимізований на свій рівень робочих температур, що дало можливість підвищити ККД термоелектричного перетворення ~1.5 рази [10-12]. У свою чергу для дальшого збільшення ефективності каскадних структур жоден з варіантів теплових схем поки не використовується.

З іншого боку, ККД термоелектричних перетворювачів можна підвищити, виготовляючи вітки термоелементів не з однорідних матеріалів, а у вигляді секцій. При цьому для кожної секції можна підібрати свій матеріал у відповідному інтервалі температур таким чином, щоб забезпечити максимальну добротність вітки в цілому [13, 14].

Тому мета нашої роботи – оцінка можливості підвищення ефективності каскадних термоелектричних модулів з матеріалів на основі Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS шляхом використання в термоелементах кожного каскаду секційних віток.

Фізична модель каскадного модуля з секційними вітками та її опис

Фізичну модель каскадного модуля з секційними вітками наведено на рис. 1а. Кожний каскад складається з термоелементів, виконаних у вигляді секцій з різних термоелектричних матеріалів та з'єднаних між собою електрично – послідовно і термічно – паралельно. Для комп'ютерного проектування використовувалась модель елементарної структурної одиниці такого модуля – блок з двох термоелементів, які складаються з N -кількості секцій. Кожен термоелемент оптимізований на рівень робочих температур «гарячого» та «холодного» каскаду відповідно (рис. 1б).

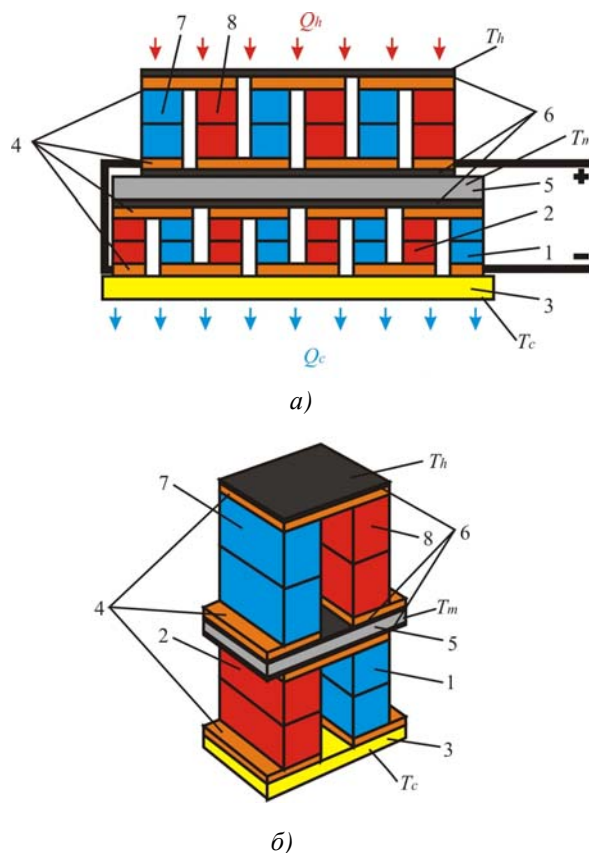


Рис. 1. Фізична модель двокаскадного модуля (а) та його елементарної структурної одиниці (б): 1, 2 – секційні n - і p -вітки холодного каскаду; 3 – керамічна пластина; 4 – комутаційні пластини; 5 – теплопровідна пластина;

6 – електроізоляція; 7, 8 – секційні n - і p -вітки гарячого каскаду.

У моделі враховано контактний опір між вітками, секціями віток та комутаційними пластинами. Температури на тепловиділяючих і теплопоглинальних поверхнях T_h і T_c термоелемента фіксовані, бічна поверхня адіабатично ізольована. Параметри термоелектричних матеріалів є функцією температури та концентрації легуючих домішок. Об'єм між вітками заповнений повітрям з теплопровідністю κ_{air} . Для знаходження максимального ККД необхідно знайти оптимальний розподіл густини струму в каскадах та оптимальну міжкаскадну температуру.

Розв'язок поставленої задачі реалізується чисельним методом послідовних наближень з використанням програмного середовища «Comsol Multyphisys» [15]. Вибором геометричних розмірів термоелементів досягається електрична узгодженість каскадів та узгодженість між каскадами по тепловому потоку.

Математичний опис моделі

Для опису потоків тепла та електрики в такому термоелементі використовувалися закони збереження енергії

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

та електричного заряду

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

де

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

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

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

де \vec{W} – густина потоку енергії, \vec{j} – густина електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності та теплопровідності матеріалів.

Враховуючи (3) - (5), отримаємо:

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

Тоді закони збереження (1), (2) набувають вигляду

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

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

Цими нелінійними диференціальними рівняннями другого порядку у частинних похідних (7) і (8) визначаються розподіли температури T та потенціалу U в матеріалах віток, контактних, комутаційних та ізоляційних шарах термоелемента.

Граничні умови для розв'язку рівнянь (7) і (8) вибиралися таким чином. Фіксувалися температури теплопоглинальної та тепловиділяючої поверхонь термоелемента $T_h=200$ °C та $T_c=30$

°C. Задавалося нульове значення потенціалу на комутаційній пластині вітки n -типу провідності. На іншій комутаційній пластині вітки p -типу провідності задавалося значення U , яке становить половину термоЕРС, що генерується термоелементом. У свою чергу значення генерованої термоЕРС визначалося системою рівнянь (7) і (8) за відсутності протікання струму через термоелемент.

На границях віток і контактного шару, контактного шару та комутаційних пластин, ізоляційних і комутаційних пластин враховувалися умови рівності температур та теплових потоків.

Загальне рівняння програми «Comsol Multiphysics» має такий вигляд:

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

де

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

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

Із аналізу виразів (7) – (10) випливає, що рівняння (9) можна спростити до такого вигляду:

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

Диференціальне рівняння для компонент матриці M має вигляд

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

Порівнюючи закони збереження у вигляді (7), (8) з рівняннями (12), отримаємо коефіцієнти для комп'ютерної моделі:

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

Результати досліджень

Із застосуванням наведеного методу розраховано енергетичні характеристики двокаскадних модулів з дво- та трисекційними вітками. Як вхідні дані використовували експериментально виміряні в [16-18] температурні залежності термоелектричних параметрів α , σ , κ матеріалів на основі n - і p - Bi_2Te_3 для холодного та n - $PbTe$ і p -TAGS – для гарячого каскаду відповідно.

Температурні залежності, наведені на рис. 2, 3, апроксимувалися двовимірними поліномами (рис. 4, 5) у вигляді $\alpha^{n,p} = \alpha^{n,p}(x_0^{n,p}, T)$, $\sigma^{n,p} = \sigma^{n,p}(x_0^{n,p}, T)$, $\kappa^{n,p} = \kappa^{n,p}(x_0^{n,p}, T)$, коефіцієнти яких вводилися в комп'ютерну програму.

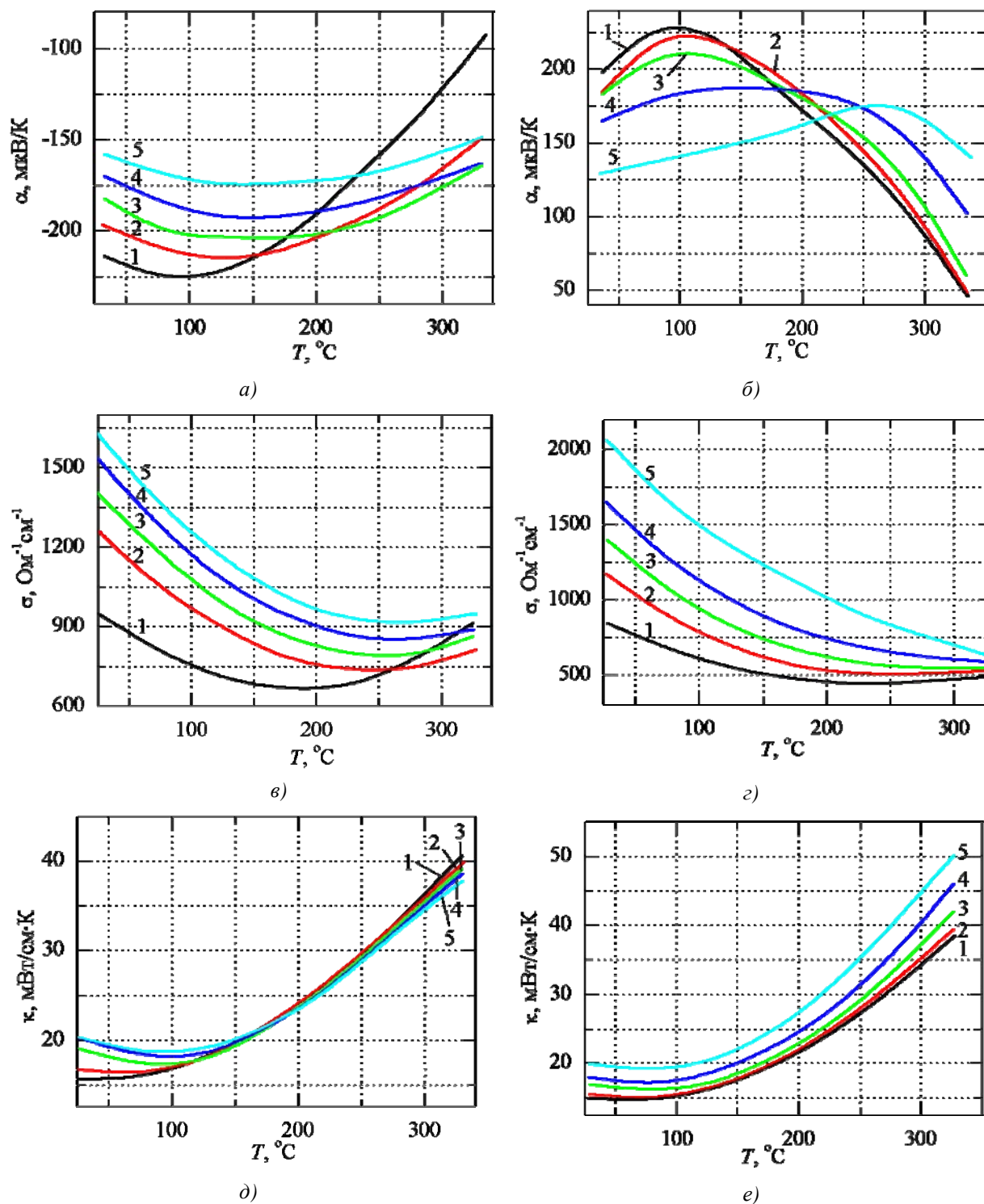


Рис. 2. Температурні залежності термоелектричних параметрів матеріалів

холодного каскаду з різними значеннями електропровідності σ_0^n , σ_0^p за $T=300\text{ K}$ [16]:

a) n- $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.90}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.05}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.05}$, легований йодом (1 – $\sigma_0^n = 970\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$; 2 – $\sigma_0^n = 1250\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$;

3 – $\sigma_0^n = 1400\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$; 4 – $\sigma_0^n = 1550\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$; 5 – $\sigma_0^n = 1650\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$);

б) p- $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.25}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.72}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.03}$, легований свинцем (1 – $\sigma_0^p = 880\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$;

2 – $\sigma_0^p = 1100\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$; 3 – $\sigma_0^p = 1380\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$; 4 – $\sigma_0^p = 1660\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$; 5 – $\sigma_0^p = 2000\text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$).

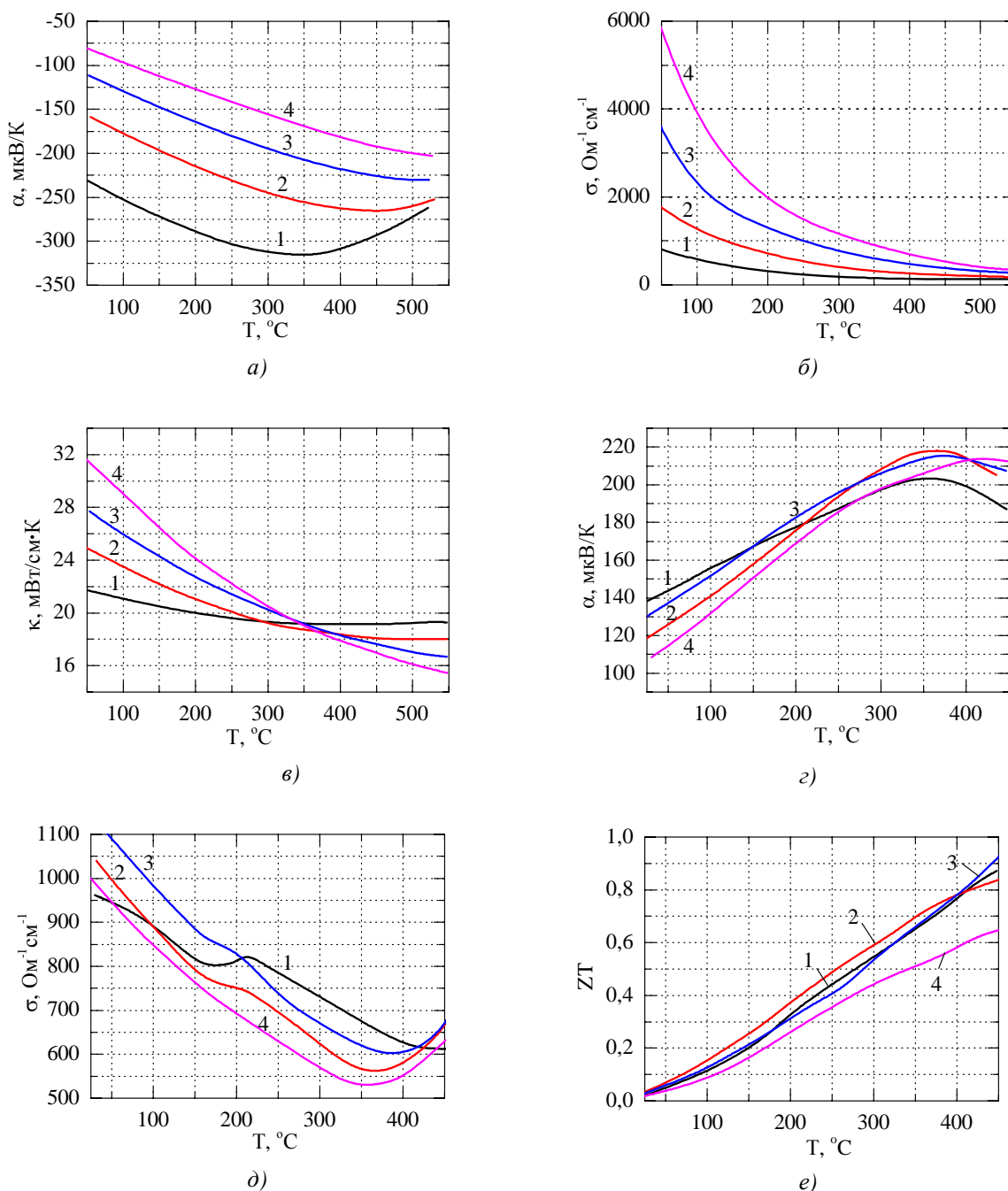


Рис. 3. Температурні залежності термоелектричних параметрів матеріалів гарячого каскаду $n\text{-PbTe}$ і $p\text{-TAGS}$:

а) $\text{PbTe} <x \text{ мол. \% PbI}_2>$ (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].

У результаті моделювання отримано розподіли температури і електричного потенціалу в двокаскадному модулі з двосекційними та трьосекційними вітками (рис. 6, 7).

Оптимальні параметри матеріалів секцій для каскадного модуля наведено в табл. 1. Оптимізація здійснювалась шляхом визначення таких концентрацій домішок у матеріалах кожної секції, за яких ККД каскадного модуля в температурному інтервалі 30–250 $^{\circ}\text{C}$ і 250–500 $^{\circ}\text{C}$ досягає максимального значення. Величини контактних опорів у розрахунках прийняті рівними $5 \cdot 10^{-6} \text{ Om}\cdot\text{cm}$ на спаях термоелементів і $1 \cdot 10^{-5} \text{ Om}\cdot\text{cm}$ – на границях між секціями віток.

Таблиця 1

Оптимальні матеріали секцій каскадного модуля

| Модуль | Каскад | Вітка | Секція | Матеріал | Концентрація |
|------------------------------|----------|-------|--------|---|--|
| Каскадний з двосекц. вітками | холодний | n-тип | перша | $(Bi_2Te_3)_{0.90}(Sb_2Te_3)_{0.05}(Sb_2Se_3)_{0.05}$, легований йодом | $\sigma_0 = 1250 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | | | друга | | $\sigma_0 = 1400 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | | p-тип | перша | $(Bi_2Te_3)_{0.25}(Sb_2Te_3)_{0.72}(Sb_2Se_3)_{0.03}$, легований свинцем | $\sigma_0 = 1100 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | | | друга | | $\sigma_0 = 2000 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | гарячий | n-тип | перша | $PbTe+x \text{ мол.}\% \text{ PbI}_2$ | $x = 0.055$ |
| | | | друга | | $x = 0.1$ |
| | | p-тип | перша | $(Ag_{0.5}Sb_{0.5}Te)_{1-x}(Pb_{0.16}Ge_{0.84}Te)_x$ | $x = 0.58$ |
| | | | друга | | $x = 0.6$ |
| Каскадний з трисекц. вітками | холодний | n-тип | перша | $(Bi_2Te_3)_{0.90}(Sb_2Te_3)_{0.05}(Sb_2Se_3)_{0.05}$, легований йодом | $\sigma_0 = 1380 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | | | друга | | $\sigma_0 = 1660 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | | | третя | | $\sigma_0 = 2000 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | | p-тип | перша | $(Bi_2Te_3)_{0.25}(Sb_2Te_3)_{0.72}(Sb_2Se_3)_{0.03}$, легований свинцем | $\sigma_0 = 1250 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | | | друга | | $\sigma_0 = 1400 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | | | третя | | $\sigma_0 = 1550 \text{ Ом}^1\text{см}^{-1}$ |
| | гарячий | n-тип | перша | $PbTe+x \text{ мол.}\% \text{ PbI}_2$ | $x = 0.6$ |
| | | | друга | | $x = 0.6$ |
| | | | третя | | $x = 0.6$ |
| | | p-тип | перша | $(Ag_{0.5}Sb_{0.5}Te)_{1-x}(Pb_{0.16}Ge_{0.84}Te)_x$ | $x = 0.055$ |
| | | | друга | | $x = 0.055$ |
| | | | третя | | $x = 0.1$ |

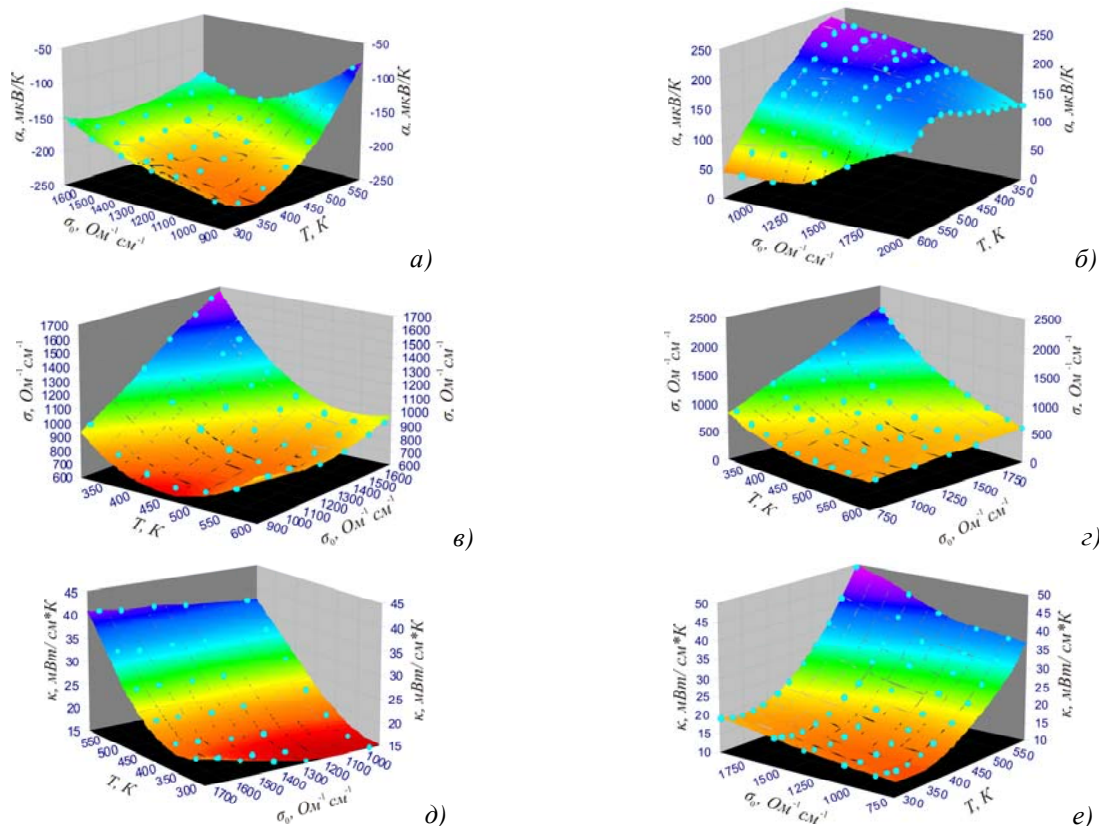


Рис. 4. Температурно-концентраційні залежності термоелектричних параметрів матеріалів для холодного каскаду а) n - $(Bi_2Te_3)_{0.90}(Sb_2Te_3)_{0.05}(Sb_2Se_3)_{0.05}$, легований йодом; б) p - $(Bi_2Te_3)_{0.25}(Sb_2Te_3)_{0.72}(Sb_2Se_3)_{0.03}$, легований свинцем.

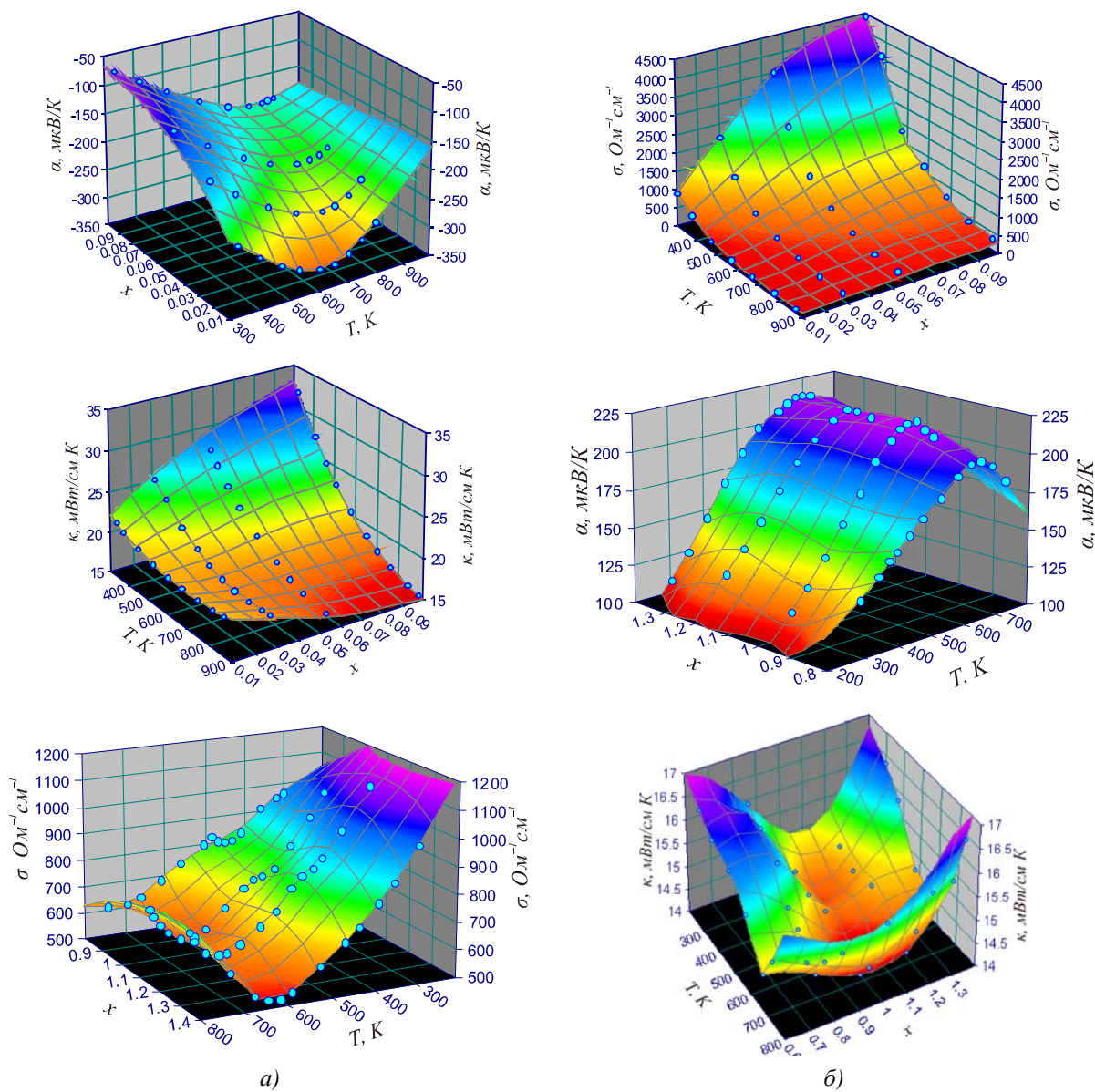


Рис. 5. Температурно-концентраційні залежності термоелектричних параметрів матеріалів гарячого каскаду:

а) n - $PbTe < x \text{ мол.} \% PbI_2 >$; б) p - $(Ag_{0.5}Sb_{0.5}TeI_{1-x}(Pb_{0.16}Ge_{0.84}Te)_x$

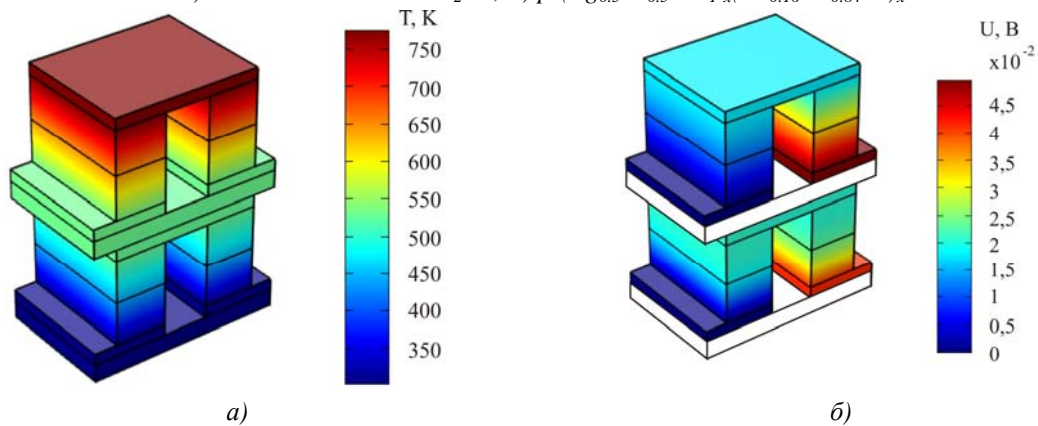


Рис. 6. Розподіл температур (а) та потенціалу (б) в каскадному модулі з двосекційними вітками.

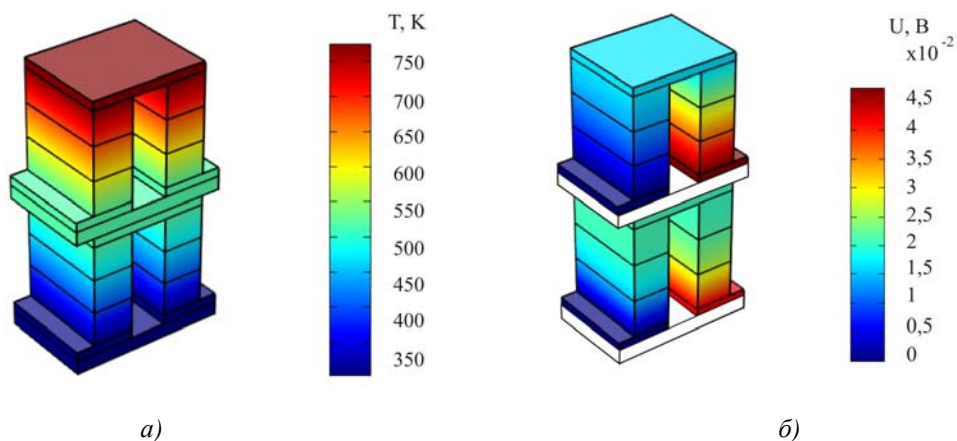
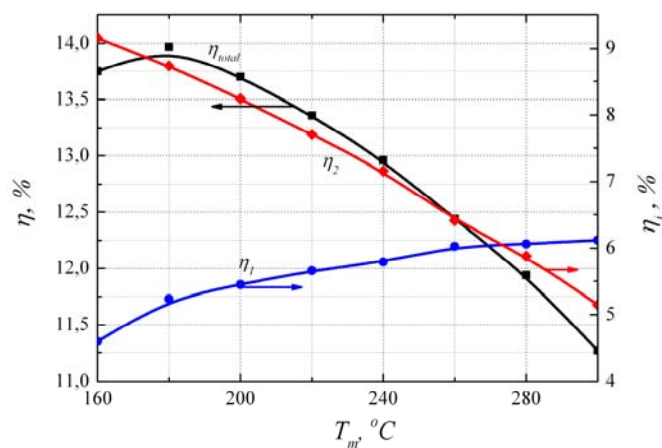
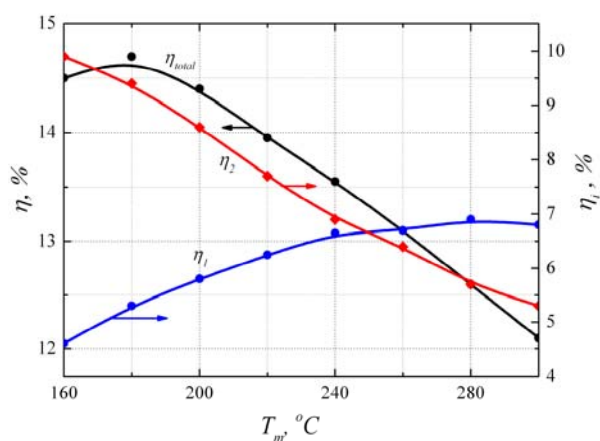


Рис. 7. Розподіл температур (а) та потенціалу (б) в каскадному модулі з трьосекційними вітками.

На рис. 8 а, б наведено залежність ефективності каскадного модуля з дво- та трьосекційними вітками від міжкаскадної температури.



а)



б)

Рис. 8. Залежність ККД холодного η_1 і гарячого η_2 каскадів, а також загальний ККД η_{total} двокаскадного модуля з: а) двосекційними вітками; б) трьосекційними вітками від міжкаскадної температури T_m ($T_h=500^\circ\text{C}$, $T_c=30^\circ\text{C}$).

Як видно з наведених даних, максимальний ККД каскадного модуля з двосекційних віток становить 14% за міжкаскадної температури на рівні 180 °С. За цієї міжкаскадної температури й температурах гарячої сторони 500°С, холодної – 30°С розподіл ефективності по каскадах такий: холодний каскад – 5.2%, гарячий каскад – 8.8% (рис. 8 а). У випадку трисекційних віток (рис. 8 б) максимальна ефективність каскадного модуля зростає до 14.7 %, що зв'язано в основному зі збільшенням η гарячого каскаду ($\eta_2=9.4\%$). Використання третьої секції в холодному каскаді на підвищення загального ККД η_{total} модуля суттєво не впливає ($\eta_1=5.3\%$).

На рис. 9 представлено порівняльні залежності ефективності двокаскадного модуля на основі матеріалів Bi_2Te_3-PbTe -TAGS з однорідними, дво-та трисекційними вітками від міжкаскадної температури.

З аналізу рис. 9 слідує, що максимальне підвищення ККД двокаскадного модуля з Bi_2Te_3-PbTe -TAGS в діапазоні робочих температур 30-500 °С спостерігається при переході від односекційних віток до двосекційних і становить ~ 20%. Введення третьої секції дає можливість збільшити ефективність термоелектричного перетворення ще на 5%.

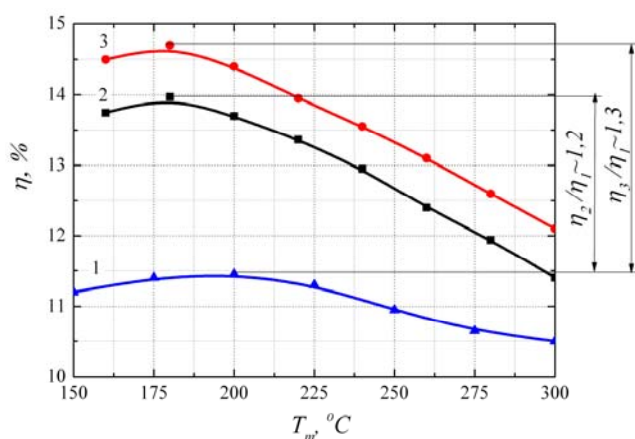


Рис. 9. Залежність ефективності двокаскадного модуля з
1 – однорідними вітками; 2 – двосекційними вітками;
3 – трисекційними вітками від міжкаскадної температури T_m .

З метою дослідження впливу кількості секцій на загальну ефективність модуля аналогічні розрахунки здійснювались для двокаскадного модуля з чотирьохсекційними вітками (рис. 10).

Розрахунки показують, що застосування чотирьох секцій у вітках кожного з каскадів є недоцільним, оскільки ККД такого модуля складатиме ~14.75%. Вклад четвертої секції в підвищенні максимального ККД не перевищує 0.5% в порівнянні з модулем, де використано трисекційні вітки. Така поведінка ККД обумовлена насамперед додатковим контактним опором у місцях з'єднання секцій, що в свою чергу призводить до збільшення кількості тепла Джоуля.

На основі результатів комп'ютерного проектування розраховано електричні параметри елементарної структурної одиниці двокаскадного модуля у випадку дво-та трисекційних віток (табл. 2).

Таблиця 2

Електричні параметри елементарної структурної одиниці
двокаскадного модуля з дво- та трисекційними вітками.
Поперечний переріз віток 1.8×4.3 мм.

| Кількість секцій | U, V | I, A | P, W | Висота віток каскадів, h мм |
|------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|
| 2 секції | 0.09 | 2.76 | 0.25 | $h_1=3, h_2=7$ |
| 3 секції | 0.09 | 3.1 | 0.28 | $h_1=3, h_2=7.5$ |

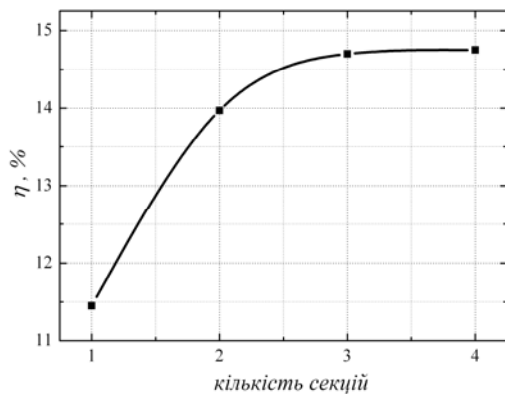


Рис. 10. Залежність максимальної ефективності двокаскадного модуля з матеріалів на основі Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS від кількості секцій у вітках термоелементів.

Використовуючи дані, наведені в табл. 2, можна спроектувати термоелектричний генераторний модуль з необхідними електричними характеристиками. Наприклад, для створення двокаскадного модуля з двосекційними вітками електричною потужністю 5 Вт, за умови послідовного з'єднання термоелементів, необхідно 20 «блоків». При цьому вихідна електрична напруга такого модуля становитиме 1.8 В.

Висновки

1. Показано метод підвищення ефективності термоелектричних генераторних двокаскадних модулів з матеріалів на основі Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS шляхом використання в термоелементах кожного каскаду секційних віток.
2. Комп'ютерними методами здійснено проектування та визначено ефективність таких модулів з двосекційними та трисекційними вітками у діапазоні робочих температур 30–500°C. Показано, що максимальна ефективність каскадних модулів з дво- та трисекційними вітками досягається за міжкаскадної температури на рівні 180 °C і становить 14% та 14.7% відповідно.
3. Використання в каскадах модуля термоелементів з двосекційними та трисекційними вітками дає можливість підвищити ефективність термоелектричного перетворення енергії на 20-25% в порівнянні з традиційним каскадним модулем на основі Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS. Дальше нарощування кількості секцій віток у каскадах є малоефективним внаслідок збільшення виділення тепла в місцях контактних опорів.

Література

1. Иоффе А. Ф. Термоелектричество 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. Vikhор. – Chernivtsi, 2012. – Vol. IV – 172 p.

6. Наноструктурирование как способ повышения эффективности / Л.П. Булат, Л.В. Бочков, И.А. Нефедова [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – №4(92). – С. 48-56.
7. Анатичук Л.І. Секційні термоелектричні генератори на органічному паливі / Л.І. Анатичук, О.Я. Лусте, В.Я. Михайловський // Термоелектрика. – 2005. – №4. – С. 20-25.
8. Михайловський В.Я. Физические модели термогенераторов на органическом топливе. Основные пути повышения их эффективности и расширения практического применения / В.Я. Михайловський // Термоелектричество. – 2005. – №2. – С. 7-42.
9. Анатичук Л.І. Двохсекційний термоелектричний генератор на газовому паливі / Л.І. Анатичук, В.Я. Михайловський // Термоелектрика. – 2008. – №1. – С. 76-86.
10. Анатичук Л.І. Компьютерное проектирование каскадных модулей для генераторов / Л.І. Анатичук, Л.Н. Вихор // Термоелектричество. – 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. Проектування й технологія генераторних модулів із секційних термоелементів на основі Bi - Te / Л.І. Анатичук, Л.М. Вихор, І.С. Термена // 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. – Т13 –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 / В.М. Шперун, Д.М. Фрейк, Р.И. Запужляк – Ивано-Франковск: Плай. 2000. – 250 с.
18. A. 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).

Надійшла до редакції 11.04.2015