

Черкез Р.Г., док. фіз.-мат. наук, в.о. професора^{1,2}
Пожар Е.В.², Жукова А.С.², Хриков В.К.²

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatysh@gmail.com

²Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна

ВПЛИВ ЧИСЛА КАНАЛІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОНИКНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ З МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ *Bi-Te-Se-Sb*

*Проведено аналіз основних властивостей термоелектричних матеріалів. Для проникного термоелементу з матеріалів на основі *Bi-Te-Se-Sb* приведено фізичну модель та дано математичний опис. Зроблено комп'ютерний розрахунок параметрів для проникних термоелементів, що виготовлені на основі *Bi-Te-Se-Sb*. Представлено графічний вигляд залежності ККД і потужності проникного, яка генерується W від числа каналів N_k . Бібл. 5, рис. 2.*

Ключові слова: термоелектричні матеріали, ККД генератору, проектування проникного сегментного термоелемента, термоЕРС.

Вступ

Проникні термоелектричні елементи характеризуються наявністю в їх структурі каналів для прокачування по ним рідинного або газоподібного теплоносія. Наявність теплообміну в обсязі гілки підвищує інтенсивність теплопередачі, призводить до перерозподілу температурних полів, потенціалів і теплових потоків, впливаючи тим самим і на енергетичні характеристики термоелемента. Керуючи теплофізичними параметрами (швидкістю прокачування теплоносія, інтенсивністю теплообміну, щільністю електричного струму) можна реалізувати такі умови роботи, при яких буде покращена енергетична ефективність перетворення енергії [1].

Перші теоретичні дослідження проникних термоелементів для потоків газів показали перспективність їх створення, передбачаючи підвищення холодильн 20 – 30 % при використанні низькопотенційної теплової енергії газів. Використання проникних структур в термоелектричних елементах з *Bi-Te* дозволяє покращити ефективність перетворення енергії на 30 % [2]. Однак такі дослідження були проведені для найпростішої моделі проникного термоелемента в одновірному наближенні без урахування температурних залежностей параметрів матеріалу, комутаційних теплопереходів.

Протягом останнього десятиліття все більша увага дослідників залучають перспективні термоелектричні матеріали на основі *Bi-Te-Se-Sb*. Вони є безпечними з екологічної точки зору і характеризуються високими значеннями коефіцієнтів термо-ЕРС і електропровідності з

максимальними значеннями безрозмірного параметра термоелектричної добротності ZT на рівні 1–1.1 в діапазоні температур 300–600 К.

Фізична модель і її математичний опис

Фізична модель проникного термоелемента з матеріалів на основі Bi-Te-Se-Sb в режимі генерації електричної енергії представлена на рис. 1.

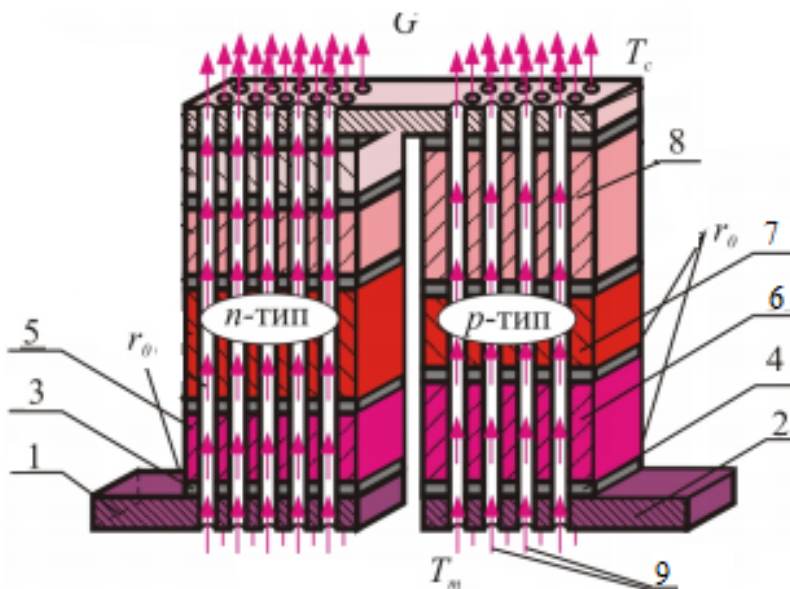


Рис. 1. Фізична модель проникного сегментного термоелементу
 1, 2 – комутаційні пластини; 3, 4 – комутаційні шари; 5 – сегменти (секції)
 гілки n-типу провідності; 6, 7, 8 – сегменти (секції) гілки
 p-типу провідності; 9 – теплоносій.

Такий термоелемент складається з гілок n – і p -типів провідності, фізичні властивості яких залежать від температури. Підведення тепла здійснюється шляхом пропускання теплоносія крізь гілки через канали (пори). Кожна гілка складається з N_n – і N_p – сегментів відповідно, контактний опір з'єднання r_0 . Бічна поверхня гілок адіабатично ізольована, температура теплоносія на вході в термоелемент T_m задана. Температура холодних спайв T_c термостатована.

Система диференціальних рівнянь, що описує розподіл температур і теплових потоків в стаціонарному одновимірному випадку, в нескінченно малій частині dx кожного k -го сегмента гілок n – і p -типів провідності, в безрозмірних координатах дається співвідношеннями [2].

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha_k j}{\kappa_k} T - \frac{j}{\kappa_k} q, \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha_k^2 j}{\kappa_k} T + \frac{\alpha_k j}{\kappa_k} q + j\rho_k + \frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K I_K^2}{(S - S_K) j} (t - T), \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K I_K}{G c_p} (t - T), \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} k = 1, \dots, N_{n,p} \\ x_{k-1} \leq x \leq x_k \end{array}$$

де Π^1_k – периметр каналу; N_k – число каналів; S_k – площа перетину всіх каналів; S – перетин гілки разом з каналами; G – витрата теплоносія в каналах; c_p – питома теплоємність теплоносія; t – температура теплоносія в точці x ; T – температура гілки в точці x ; αT – коефіцієнт тепловіддачі; α і κ – коефіцієнти термоЕРС і теплопровідності, а ρ – питомий опір матеріалу гілки.

Питомі потоки тепла q і приведена щільність електричного струму j визначаються через такий вираз:

$$q = \frac{Q}{l}, \quad j = \frac{I}{S},$$

де Q – потужність теплового потоку, що проходить через гілку термоелемента; I – сила електричного струму; S – площа поперечного перерізу гілок термоелемента.

Необхідні для вирішення в рівнянні граничні умови з урахуванням виділення тепла Джоуля-Ленца, обумовленого контактним опором r_0 в місцях з'єднання сегментів гілок, формулюються у вигляді:

$$\begin{aligned} T_{n,p}(0) &= T_C, & t_{n,p}(1) &= T_m, & q_{n,p}(1) &= 0, \\ T_{n,p}(x_k^+) &= T_{n,p}(x_k^-), & q_{n,p}(x_k^+) &= q_{n,p}(x_k^-) + \frac{r_0}{S_{n,p}} I, \end{aligned}$$

де індекси " – " і " + " позначають значення функцій безпосередньо зліва і справа від межі зіткнення сегментів x_k ; $k = 1, \dots, N$ – індекс, що визначає номер сегмента гілки.

У випадку пошуку оптимальних концентрацій легуючих домішок, що визначають концентрації носіїв струму в сегментах гілок, необхідно задати залежності параметрів матеріалів α , κ , ρ від температури і концентрації носіїв струму (або домішок).

Основне завдання проектування проникного сегментного генераторного термоелемента – визначення таких узгоджених параметрів (наведена щільність струму j в вітках, витрати теплоносія в каналах G , концентрації легуючих домішок в матеріалах кожного сегмента), при яких ККД термоелемента досягає максимального значення [3].

Визначимо ККД через відношення електричної потужності P , що генерується термоелементом, до зміни ентальпії теплоносія:

$$\eta = \frac{P}{\sum_{n,p} G c_p (T_m - T_C)},$$

а його максимум зведемо до досягнення мінімуму функціоналу:

$$J = \ln \left[\sum_{n,p} \{ G c_p (T_m - T_C) \} \right] - \ln \left[\sum_{n,p} \left\{ G c_p (T_m - t(0)) + q(0) \frac{j(S - S_k)}{l} - I \left(\frac{r_0}{S_n} + \frac{r_0}{S_p} \right) \right\} \right].$$

Для вирішення такого завдання використаний принцип максимуму Понтрягіна, на основі якого отримані співвідношення, що задають необхідні умови оптимальності. Така методика в застосуванні до термоелектричного перетворення енергії описана в багатьох

роботах, наприклад, [4]. Вона ж використана і для створення комп'ютерної програми та дослідження проникного термоелемента з термоелектричних матеріалів на основі Bi-Te-Se-Sb [5].

Результати вирішення завдання

Результати розрахунку проникного термоелектричного генератора проводилося з урахуванням втрат тепла з відхідними газами і такими вихідними даними, як оптимізація щільності струму і витраті теплоносія та оптимізація за однаковою концентрацією в секціях гілки із введенням комплексу – $G \cdot \text{branch} := G \cdot c_p \cdot S_k \cdot N_k$.

Використано такі вихідні дані. Температура теплоносія на вході – 600 К, температура холодних спаїв термоелементу – 300 К; діаметр каналу – 0.01 см; периметр каналу (окружність) – 0.031416 см; площа поперечного перерізу всіх N_k -каналів – 0.0024 см²; кількість секцій в 1 гілки – 1 шт; висота гілок – 20 см; площа поперечного перерізу матеріалу гілки – 0,9976 см².

Температурні залежності параметрів α , σ , κ , матеріалів на основі Bi-Ti-Se-Sb були використані для розрахунків. [5]

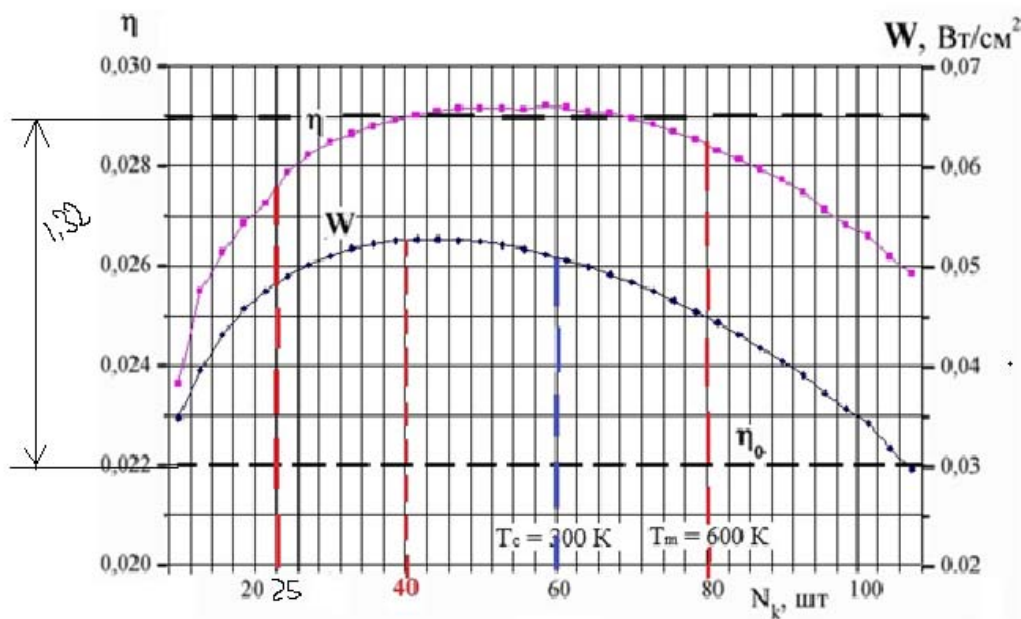


Рис. 2. Залежності ККД і потужності проникного термоелемента на основі Bi-Te-Se-Sb, яка генерується W від числа каналів N_k .

Видно, що ККД проникного термоелемента на основі Bi-Te-Se-Sb зростає при збільшенні кількості каналів. Максимум ККД знаходиться в області від 25 до 80 каналів на 1 см², а потужності від 25 до 60. Питома електрична потужність має максимум, в даному випадку при 40 каналах на 1 см² і становить $P = 1.57$ Вт. Тому, раціональне число каналів на одиницю площі буде перебувати в межах 25 – 60 шт.

Отримані дані свідчать, що ККД зростає з збільшенням числа каналів і досягає найбільшого значення, як і в двох попередніх випадках, при температурі теплоносія $T_m = 600$ К і становить $\eta = 6.8$ %. Підвищення ККД може досягати 1.32 рази в порівнянні з класичним термоелементом.

Висновок

Таким чином, для різних умов роботи проникного генераторного термоелемента з матеріалів на основі *Bi-Te-Se-Sb* необхідно визначити свої оптимальні конструкційні параметри (висота гілки, діаметр каналів і їх число), при яких буде отримана максимальна ефективність перетворення енергії та електрична потужність. ККД в оптимальних умовах роботи вище, ніж у класичного термоелемента в 1.32 рази. Порівняння з ККД класичного термоелементу η_0 , що працює в аналогічних умовах, вказує також на можливість підвищення ККД проникного термоелементу на основі *Bi-Te-Se-Sb* при перетворенні енергії приблизно на 32 %.

Література

1. Анатычук Л.И. Термоэлектрические преобразователи энергии / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. Том II. Черновцы: Букрек, 2003. 376 с.
2. Анатычук Л.И., Черкез Р.Г. Проникный сегментный термоэлемент у режимі генерації електричної енергії // Термоелектрика. – 2010. – №3. - С.5-12.
3. Cherkez R. G. (2012). Energy possibilities of permeable generator thermoelements based on segmented legs. AIP Conf. Proc. 1449, 443, pp. 439-442; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4731590>
4. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.Ф. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко // – М.:Наука, 1976. – 392 с.
5. Бублик В.Т. Объемный наноструктурированный термоэлектрический материал на основе $(Bi, Sb)_2Te_3$, полученный методом искрового плазменного спекания (SPS) / В.Т.Бублик, И.А.Драбкин, В.В.Каратаев [и др.] // Термоэлектрики и их применение: докл. XIII Межгос. семинара. СПб. 2012. С. 70–75.

Надійшла до редакції 03.07.2019

Черкез Р.Г., *док. физ.-мат. наук, и.о. професора*^{1,2}
Пожар Е.В.², **Жукова А.С.**², **Хрыков В.К.**²

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatyuch@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА КАНАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОНИЦАЕМЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ *Bi-Te-Se-Sb*

*Проведен анализ основных свойств термоэлектрических материалов. для проницаемого термоэлемента из материалов на основе *Bi-Te-Se-Sb*, приведена физическая модель и дано*

ее математическое описание. Сделан компьютерный расчет параметров проницаемых термоэлементов, изготовленных на основе Bi-Te-Se-Sb. Представлены графически зависимости КПД и мощности, проницаемого генерируемого W вид числа каналов N_k . Библ. 5, рис. 2.

Ключевые слова: термоэлектрические материалы, КПД генератора, проектирование проницаемого сегментного термоэлемента, термоЭДС.

Cherkez R.G., dok. phys.– mat. sciences, Acting professor^{1,2}
Pozhar E.V.², Zhukova A.S.², Khrykov V.K.²

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

INFLUENCE OF THE NUMBER OF CHANNELS ON THE EFFICIENCY OF PERMEABLE THERMOELEMENTS OF *Bi-Te-Se-Sb* BASED MATERIALS

The basic properties of thermoelectric materials are analyzed. For a permeable thermoelement of Bi-Te-Se-Sb based materials a physical model is presented and a mathematical description is given. Computer calculation of parameters for Bi-Te-Se-Sb based permeable thermoelements is made. The dependence of permeable thermoelement efficiency and its generated power W on the number of channels N_k is presented graphically. Bibl. 5, Fig. 2.

Key words: Thermoelectric materials, generator efficiency, design of permeable segmented thermoelement, thermoEMF

References

1. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. Tom II. Termoelektricheskiie preobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.II. Thermoelectric power converters]*. Chernivtsi: Bukrek [in Russian].
2. Anatyshuk L.I., Cherkez R.G. (2010). Permeable segmented thermoelement in electric power generation mode. *J. Thermoelectricity*, 3, 5-12.
3. Cherkez R. G. (2012). Energy possibilities of permeable generator thermoelements based on segmented legs. *AIP Conf. Proc.* 1449, 443, pp. 439-442; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4731590>
4. Pontryagin L.S., Boltianskiy V.G., Gamkrelidze R.F., Mishchenko. (1976). *Matematicheskaiia teoriia optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes]*. Moscow: Nauka [in Russian].
5. Bublik V.T., Drabkin I.A., Karataiiev V.V., et al. (2012). Obiomnyi nanostrukturirovannyi termoelektricheskii material na osnove (Bi,Sb)₂Te₃, poluchennyi metodom iskrovogo plasmennogo spekaniia (SPS) [Bulk nanostructured thermoelectric material based on (Bi,Sb)₂Te₃ obtained by spark plasma sintering method (SPS)]. *Proc. of XIII Interstate Workshop "Thermoelectrics and their Application" (Russia, Saint-Petersburg, 2012)* (pp.70–75).

Submitted 03.07.2019