



Черкез Р.Г.

## КАСКАДНА ПРОНИКНА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНА БАТАРЕЯ ОХОЛОДЖЕННЯ

Черкез Р.Г.

(Інститут термоелектрики, вул. Науки, 1,  
Чернівці, 58029, Україна)

- Подано модель каскадної проникної батареї охолодження потоків рідин та газів. Описано метод розрахунку температурних полів та визначення енергетичних характеристик батареї охолодження. Результати розрахунків для термоелектричних матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$  засвідчують наявність оптимальних значень швидкості теплоносія в каналах, густин електричного струму, за яких холодильний коефіцієнт набуває максимальних значень. Використання 2–3 каскадів проникних термоелементів дає можливість підвищити холодильний коефіцієнт у 1.2–1.7 раза за граничних перепадів температур та збільшити глибину охолодження на 30–40 К.

### Вступ

Можливості розширення практичного застосування термоелектричних охолоджуючих пристроїв у першу чергу залежать від ефективності перетворення енергії за умови забезпечення необхідних температурних режимів. Основні методи підвищення ефективності перетворення енергії були сформульовані ще А.Ф. Йоффе [1]. Вони ґрунтуються на підвищенні параметра добротності термоелектричних матеріалів шляхом легування активними домішками матеріалу основи для досягнення максимальних значень  $\alpha^2\sigma$  ( $\sigma$  – термоЕРС,  $\alpha$  – електропровідність) та ізовалентними домішками заміщення для зниження теплопровідності. Ці методи застосовувалися до деяких матеріалів, що дало збільшення добротності і відповідно сприяло широкому практичному використанню термоелектрики.

В останні десятиліття, незважаючи на численні дослідження, подальше зростання параметра добротності термоелектричних матеріалів незначне. Виникає необхідність пошуку нових шляхів підвищення ефективності. Тому все більше уваги приділяється дослідженням інших напрямків, у яких використовується не тільки приконтактні термоелектричні ефекти а й весь обсяг термоелектричного матеріалу. До таких варіантів належить використання проникних термоелементів [2].

У проникних термоелементах тепло підводиться або відводиться не тільки через поверхні гарячих і холодних спаїв, а й через внутрішні поверхні гілок за рахунок прокачування теплоносія через канали (пори) віток. Одним з перших на можливість підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії шляхом застосування проникних термоелементів вказав у своїх авторських свідоцтвах І.В. Зорін [3, 4]. Послідовне дослідження можливостей термоелементів з проникними вітками проведено в Україні [5–7]. У таких термоелементах з прокачуванням теплоносія через канали (пори) матеріалу можливе додаткове його охолодження внаслідок дії ефекту Джоуля-Томсона, що виникає з дроселюванням потоків газу [8]. Завдяки цьому можна реалізувати такі ситуації, за яких спільна дія термоелектричних ефектів і ефекту Джоуля-Томсона дасть можливість підвищити холодильний коефіцієнт.

Наведені у працях [9] дослідження проникних термоелементів охолодження для матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$  показало на можливість підвищити холодильний коефіцієнт на 40–60% у порівняно з традиційними термопарними елементами. Це відкриває широкі можливості використання проникних термоелементів для охолодження потоків рідин та газів.

Однак мінімально досягнута температура охолодження теплоносія залишається на тому ж

рівні, що у традиційних термоелементів. Отримання більш низьких температур охолодження розширило би можливості практичного застосування прямого безмашинного термоелектричного способу охолодження, який характеризується простотою конструкції, високою надійністю в роботі, екологічною чистотою, високою точністю регулювання температурного режиму тощо.

Більшу глибину охолодження теплоносія можна досягти використанням каскадних систем. Хоч ідея використання каскадних систем znana давно [10], але питання дослідження проникних каскадних систем у відомих автору літературних джерелах не вивчалось.

Тому мета роботи – визначення енергетичних характеристик каскадної проникної батареї охолодження, дослідження їх залежностей від конструкційних і теплофізичних параметрів.

### Фізична модель, математичний опис та метод розв'язку задачі

Схему каскадної системи охолодження на основі проникних термоелементів показано на рис. 1. Вона складається з батареї проникних термоелементів 1, що містять вітки  $n$ - і  $p$ - типів провідності з напівпровідникових термоелектричних матеріалів, у яких наявні канали 2 для прокачування теплоносія 3, термоелементи 1 електрично з'єднані послідовно-паралельно комутаційними пластинами 4 таким чином, щоб вони утворювали групу (каскад). Кожен каскад забезпечується системою відводу тепла 5 від теплих спаїв проникних термоелементів та системою циркуляції теплоносія 6, що охолоджується. Сукупність таких каскадів утворює термоелектричну батарею. Для суміжних каскадів система циркуляції теплоносія та система відводу тепла з'єднані між собою послідовно таким чином, щоб охолоджений теплоносій на одному каскаді прокачувався насосом 7 через систему відводу тепла іншого каскаду, утворюючи замкнутий контур для циркуляції теплоносія 8. Систему відведення тепла від найбільш теплового каскаду спряжено із зовнішньою теплообмінною системою 9 для відводу тепла в навколишнє середовище. Система циркуляції теплоносія найбільш холодного каскаду спряжено із зовнішньою системою теплообміну 10 для охолодження об'єкту (на рис. 1 не показаний).

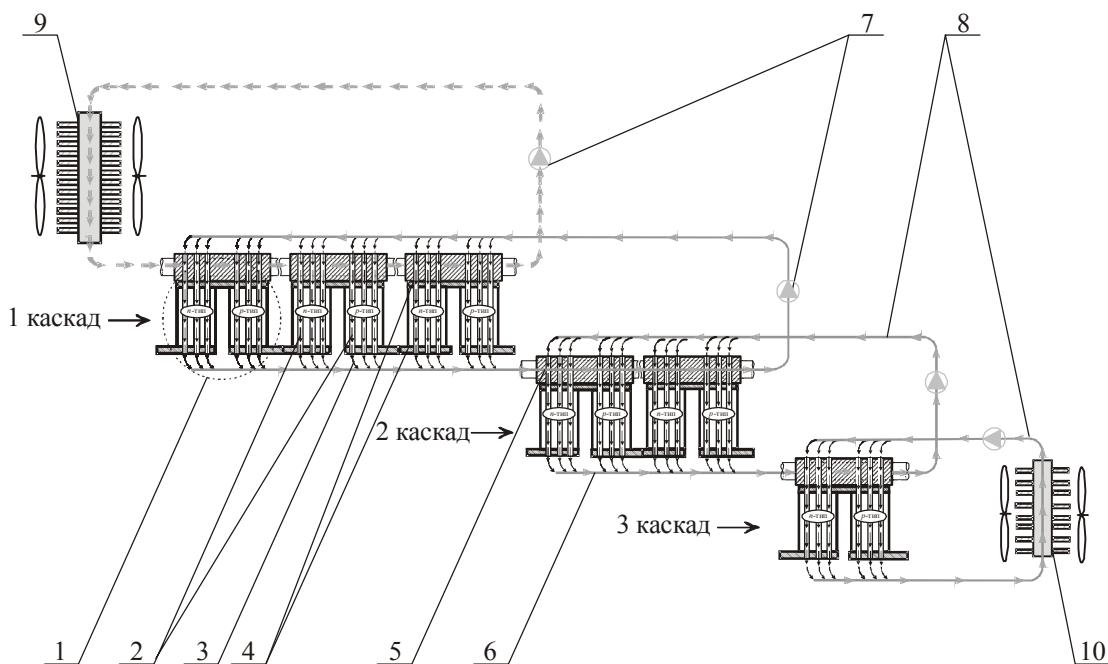


Рис. 1. Схема проникної каскадної батареї охолодження.

Проходження електричного струму через кожен каскад термоелектричної батареї відповідного напрямку внаслідок дії ефекту Пельтьє призводить до охолодження нижніх частин проникних термоелементів. Теплоносій прокачується по каналах крізь вітки проникних термоелементів у напрямку до холодних частин і внаслідок теплообміну з матеріалом вітки охолоджується. Охолоджений теплоносій подається в систему відводу тепла другого каскаду охолоджуючі теплі спаї його термоелементів. Це дає можливість другому каскаду працювати за нижчої температури теплих спаїв та відповідно охолодити теплоносій на нижчий рівень температур. Нарощуванням кількості каскадів (на рис. 1 показано варіант трикаскадної батареї) можна охолодити теплоносій на все більший рівень температури.

Кількість тепла, що відводиться від гарячих спаїв  $k$ -го каскаду знайдемо за зміною ентальпії теплоносія

$$Q_h^{(k)} = G_h^{(k)} \cdot c_p \cdot (t_h^{(k)out} - t_h^{(k)in}), \quad (1)$$

де  $G_h^{(k)}$  – витрата теплоносія через теплообмінник на гарячій поверхні  $k$ -го каскаду;  $c_p$  – теплоємність теплоносія;  $t_h^{(k)in}$ ,  $t_h^{(k)out}$  – температури теплоносія на вході і виході  $k$ -го каскаду відповідно;

кількість тепла що відбирається від теплоносія в каналах  $k$ -го каскаду батареї

$$Q_C^{(k)} = G_k \cdot c_p \cdot (t_k^h - t_k^c), \quad (2)$$

де  $G_k$  – витрата теплоносія через каскад;  $c_p$  – теплоємність теплоносія;  $t_k^h$ ,  $t_k^c$  – температури теплоносія на вході і виході першого каскаду батареї.

Холодильний коефіцієнт визначимо співвідношенням,

$$\varepsilon = \frac{Q_C^{(N)}}{W} = \frac{Q_C^{(N)}}{\sum_{k=1}^N W^{(k)}}, \quad (3)$$

де  $W^{(k)} = Q_h^{(k)} - Q_C^{(k)}$  – потужність, що споживається  $k$ -им каскадом.

Для визначення теплофізичних характеристик каскадної батареї розглянемо її фізичну модель (рис. 2). Вона складається з послідовно-паралельно з'єднаних проникних термоелементів 1, що утворюються з проникних віток  $n$ - та  $p$ - типів провідності 2, з'єднаних комутаційними пластинами 4. Крізь термоелементи по каналах віток 2 прокачується теплоносій 3 для його охолодження. Теплоносій охолоджується внаслідок теплообміну з матеріалом віток, в якому встановлюється градієнт температури завдяки дії термоелектричних ефектів Пельтьє, Томсона за наявності електричного струму. Тепло від теплих спаїв термоелементів відводиться теплообмінником 6 внаслідок прокачки теплоносія, решта поверхні адіабатично ізолювана 5.

Для розрахунку енергетичних характеристик пристрою запишемо систему балансових рівнянь у стаціонарному випадку в наближенні, коли властивості параметрів віток  $n$ - та  $p$ - типів провідності термоелементів однакові.

Теплоносій, що прокачується крізь гарячий теплообмінник, змінює свою температуру

$$\frac{dt_g}{dy} = \frac{1}{G_g \cdot c_p} q_h(T_h, T_c, j, \dots), \quad (4)$$

де  $t_g$  – температура теплоносія в точці  $y$ ;  $G_g$  – масова витрата теплоносія;  $c_p$  – теплоємність теплоносія;  $q_h(T_h, T_c, j, \dots)$  – питомий тепловий потік на теплій поверхні термоелементів який є



На основі співвідношень (4) – (6) можна зробити тепловий розрахунок кожного каскаду проникної каскадної батареї. Для розрахунку всієї каскадної батареї необхідно врахувати взаємозв'язок між каскадами, що подається співвідношеннями

$$(Vc_p S_K)_k = (G_g c_p)_{k+1}, \quad (7)$$

$$(t_K|_{x=l})_k = (t_g^{in})_{k+1}, \quad (8)$$

де індекс  $k = 1, \dots, N$ ;  $N$  – кількість каскадів у батареї.

На основі отриманих співвідношень із використанням методу послідовних наближень, чисельних методів розв'язку систем диференціальних рівнянь (4), (5) із граничними умовами (6) (7), (8) було розроблено комп'ютерну програму для дослідження енергетичних характеристик каскадної проникної батареї.

### Результати комп'ютерних досліджень енергетичних характеристик каскадної проникної батареї

Результати комп'ютерного моделювання каскадів проникних термоелементів проведено для матеріалу на основі  $Bi_2Te_3$  [11]. Дані температурних залежностей параметрів  $\alpha$ ,  $\kappa$ ,  $\sigma$  цих матеріалів апроксимовані методом найменших квадратів з відносною похибкою, не більшою 1%, і використані у розрахунках. Температурні залежності параметрів  $\alpha$ ,  $\kappa$ ,  $\sigma$  матеріалу наведено на рис. 3.

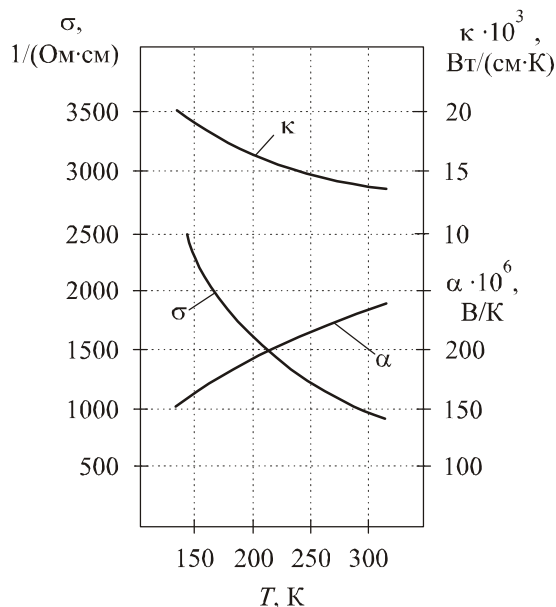


Рис. 3. Температурні залежності параметрів матеріалу віток.

Енергетичні характеристики каскадної батареї визначаються через параметри характеристик роботи кожного каскаду. Результати досліджень енергетичних характеристик одного каскаду наведено на рис. 4. Тут показано значення холодильного коефіцієнта  $\epsilon$  та питомої холодопродуктивності  $Q_c$  залежно від масової швидкості теплоносія  $V$  в каналах за оптимально густини електричного струму.

Дані наведені для випадку, коли як теплоносії використовується вода, температура теплоносія на вході в канали термоелементів становить 310 К, висота віток 1 см, діаметр каналів 0.12 см, площа поперечного перерізу віток разом з каналами становить  $0.36 \text{ см}^2$ , величина

контактного опору в місцях з'єднання віток термоелементів становить  $5 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>, температура теплоносія на вході в теплообмінник теплих спаїв 310 К. Залежності енергетичних характеристик наведено для різних температур холодних спаїв термоелементів, індекс 1 відповідає  $T_c = 285$  К, 2 –  $T_c = 280$  К, 3 –  $T_c = 275$  К при цьому отримана температура охолодження води відповідає значенням 286 К, 280.7 та 285.5 К відповідно.

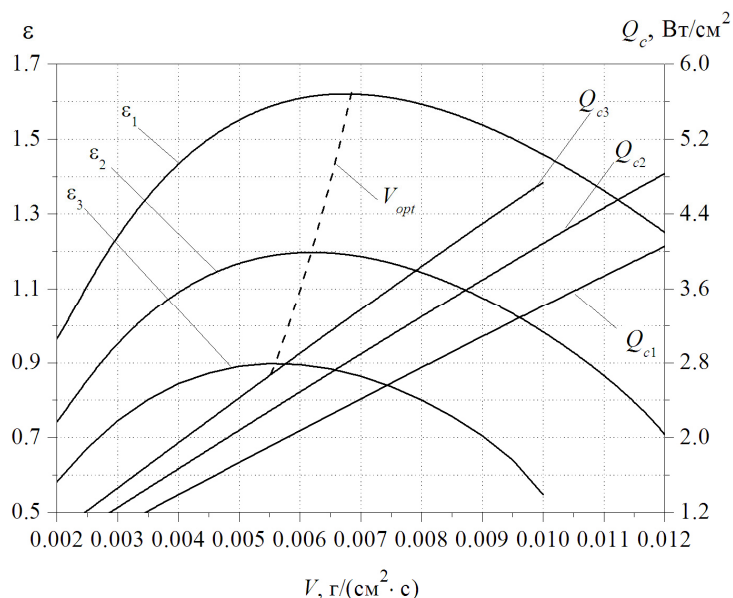


Рис. 4. Залежності енергетичних характеристик проникного каскаду від масової швидкості теплоносія в каналі при оптимальній густині електричного струму. (індекс 1 відповідає  $T_c = 285$  К, 2 –  $T_c = 280$  К, 3 –  $T_c = 275$  К)

З рис. 4 видно, що питома холодопродуктивність монотонно зростає з підвищенням швидкості теплоносія. Холодильний коефіцієнт проникного каскаду має максимум по масовій швидкості теплоносія (оптимальне значення позначено через  $V_{opt}$ ), який залежить від температурних умов роботи. Тому чисельним методом Ньютона розв'язку екстремальних задач було узагальнено комп'ютерну програму розрахунку проникної каскадної батареї охолодження на випадок пошуку оптимальних значень швидкості теплоносія в каналі.

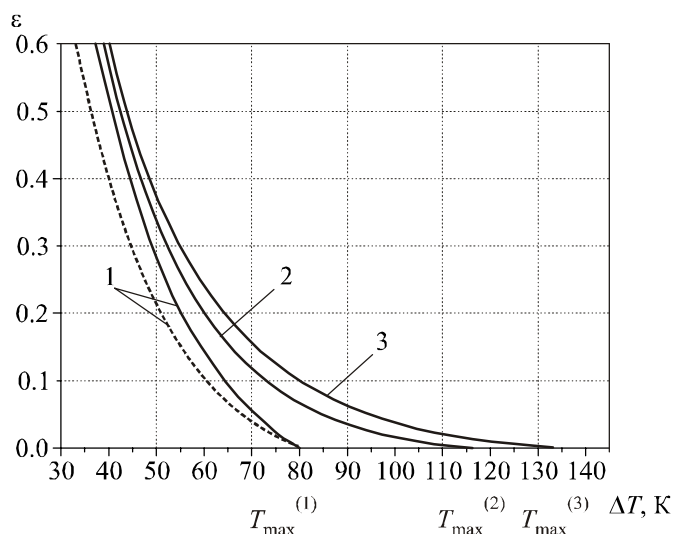


Рис. 5. Залежність холодильного коефіцієнта від перепаду температур та числа каскадів.

На рис. 5 подано розраховані значення залежності холодильного коефіцієнта одно- (залежність 1), дво- (залежність 2) та трьо- (залежність 3) – каскадних проникних охолоджувачів від перепаду температур та числа каскадів. Штрихова лінія відповідає значенню холодильного коефіцієнта однокаскадної не проникної батареї, а суцільні – оптимізованій проникній каскадній батареї охолодження. Видно, що використання каскадування в проникних системах охолодження дає можливість підвищити холодильний коефіцієнт у 1.2 – 1.7 раза за граничних перепадів температур та покращити глибину охолодження рідини на 30 – 40 К.

## Висновки

1. Показано модель каскадної проникної батареї охолодження потоків рідин та газів. На основі системи диференціальних рівнянь описано метод розрахунку температурних полів та визначення енергетичних характеристик батареї охолодження.
2. Досліджено модель проникної каскадної батареї для охолодження для матеріалів  $Bi_2Te_3$ . Результати розрахунків вказують на наявність оптимальних значень швидкості теплоносія в каналах та густини електричного струму, за яких холодильний коефіцієнт набуває максимальних значень.
3. Результати розрахунків 2–3 каскадних проникних батарей свідчать про можливість підвищення холодильного коефіцієнта в 1.2 – 1.7 раза за граничних перепадів температур та збільшення глибини охолодження на 30 – 40 К.

Автор висловлює подяку Л.І. Анатичуку за сприяння виконанню цієї роботи; І.В. Гуцулу за корисні обговорення фізичної моделі та Л.М. Вихор за консультації щодо особливостей використаних в роботі чисельних методів.

## Література

1. Иоффе А.Ф. Полупроводники в современной физике / А.Ф. Иоффе. – М.: Из-во АН СССР. – 1954.
2. Котырло Г.К. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов / Г.К. Котырло, Ю.Н. Лобунец // К.: Наук. думка, 1980. – 327 с.
3. А.с. 144883 СССР. Способ повышения КПД термоэлектрического генератора (холодильника) / И.В. Зорин (СССР). – Заявлено 24.06.1961.
4. А.с. 162578 СССР. Способ повышения КПД термоэлектрического генератора. / Зорин И.В. (СССР). – Заявлено 02.06.1962.
5. Anatyshuk L.I. Computer design of thermoelectric functionally graded materials / L.I. Anatyshuk, L.N. Vikhor // Proceedings of the Fourth International Symposium on FGM. – Tsukuba. – Japan. – Oct. 21 – 24, 1996.
6. Anatyshuk L.I. Computer Simulation of Functionally Graded Materials for Thermoelectricity / L.I. Anatyshuk, L.N. Vikhor, R.G. Cherkez // J. of Thermoelectricity. – 1997. – N3. – P. 43 – 61.
7. Котырло Г.К. Тепловые схемы термоэлектрических устройств / Г.К. Котырло, Г.М. Щеголев // К.: Наук. Думка. – 1973. – 215 с.
8. Анатичук Л.І. Проникний термоелемент охолодження з використанням ефекту Джоуля-Томсона / Л.І. Анатичук, Р.Г. Черкез // Термоелектрика. – 2007. – №3. – С. 93 – 102.
9. Anatyshuk L.I., Cherkez R.G. Permeable planar cooling thermoelement / L.I. Anatyshuk, R.G. Cherkez // Journal of Thermoelectricity. – 2008. – № 3. – С. 5 – 12.
10. Вайнер А.Л. Термоэлектрические охладители / А.Л. Вайнер // М.: Радио и связь. – 1983. – 176 с.
11. Вайнер А.Л. Каскадные термоэлектрические источники холода / А.Л. Вайнер // М.: Сов. Радио. – 1976. – 136 с.

Надійшла до редакції 12.09.2011.