

УДК 537.32



Черкез Р.Г.

Черкез Р.Г. док. фіз.-мат. наук, в.о. професора^{1,2}
Константинович І.А., кандидат фіз.-мат. наук,
 доцент^{1,2}

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

²Чернівецький національний університет
 ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
 Чернівці, 58012, Україна



Константинович І.А.

УЗАГАЛЬНЕНА ТЕОРІЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПРОНИКНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Представлено узагальнену теорію розрахунку проникних термоелементів з врахуванням залежностей параметрів матеріалу віток від температури і концентрації носіїв струму та зміни умов теплообміну вздовж висоти вітки. Описано методи моделювання розподілів температур та теплових потоків у 1-D та 3-D вимірній моделі проникного термоелемента. Вдосконалено теорію розрахунку проникних термоелементів на випадок розв'язку багатofакторної оптимізаційної задачі з метою досягнення максимальної енергетичної ефективності термоелектричного перетворення енергії.

Ключові слова: узагальнена теорія проникних термоелементів, методи проектування проникного термоелемента.

Вступ

Проникні термоелементи представляють собою термопарні елементи в яких теплообмін з джерелом (стоком) тепла відбувається не тільки на поверхнях спаїв а і всередині віток термоелемента (рис. 1). В цьому випадку матеріал віток робиться проникним (має канали або пори) для прокачування крізь нього теплоносія (рідини або газу).

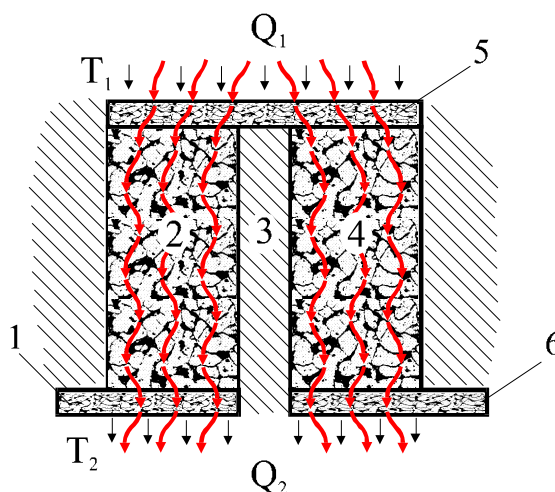


Рис. 1. Модель проникного термоелемента, в якому теплоносії пропускається від гарячих до холодних спаїв ($T_1 > T_2$). 1, 5, 6 – комутаційні пластини, 3 – адіабатична ізоляція, 2, 4 – вітки, що мають канали (пори),

↓ – потоки тепла; ↯ – потоки теплоносія.

Оскільки, завдяки використанню матеріалів великої проникності, внутрішня поверхня теплообміну може бути досить розвинута, то інтенсивність теплообміну зростає, а перепад температури між середовищами, що обмінюються теплом, зменшується. Це приводить до збільшення корисного перепаду температури на термоелементі, що дає можливість підвищити ефективності перетворення енергії [1 – 3].

Змінюючи умови теплообміну вздовж висоти вітки можна впливати і на об'ємний розподіл джерел (стоків) тепла в вітках проникного термоелемента. Отже відкривається можливість впливати на енергетичні характеристики термоелемента – ККД чи потужність генератора або холодильний коефіцієнт охолоджувачів чи кондиціонерів.

Параметри пористих структур також досліджувались в роботах [4 – 6]. Оцінка вихідної потужності пористого кільцевого термоелектричного генератора для збору відпрацьованого тепла проведена в роботі [4]. Ця стаття вказує на той факт, що пористі ТЕГ мають кращі характеристики, ніж об'ємні ТЕГ. Однак, в даних роботах не проводилась багато параметрична оптимізація проникних термоелементів з урахуванням зміни умов теплообміну вздовж висоти вітки, впливу контактних опорів та комутаційних теплопереходів.

Для цього необхідним є узагальнення теорії розрахунку проникних термоелементів з врахуванням зміни умов теплообміну для 1D та 3D моделі проникного термоелемента, що є метою даної роботи.

Фізична модель та її математичний опис

Наявність теплообміну термоелектричного матеріалу з теплоносієм (рис. 2) обумовлює необхідність розв'язувати задачу по знаходженню розподілів температур, електричного потенціалу та теплових потоків в матеріалі спряжено з рівняннями руху та теплопередачі для теплоносія.

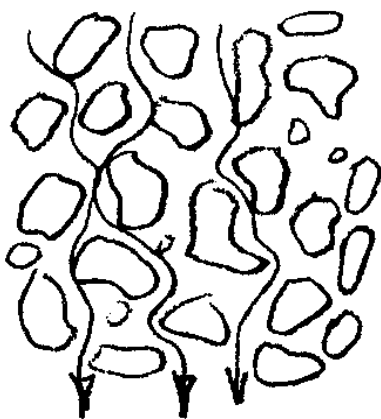


Рис. 2. Характер потоку теплоносія в проникному матеріалі.

Для опису руху теплоносія в каналі використовується система рівнянь Нев'є-Стокса та рівняння неперервності, а для розподілу температури в теплоносії – рівняння теплопровідності.

Рівняння Нев'є-Стокса та рівняння неперервності можна записати у вигляді [7]

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{d\vec{q}}{dt} &= \rho \vec{F} - \vec{\nabla} P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{q} + \frac{1}{3} \mu \vec{\nabla} (\text{div} \vec{q}), \\ \text{div} \rho \vec{q} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Ліва частина першого рівняння (1) являє собою силу інерції. Перший доданок у правій частині даного рівняння – масову силу, другий – дію поверхневих сил тиску (нормальних напружень), а останні два доданки – дію дотичних складових поверхневих сил (сил внутрішнього тертя).

Теплообмін в рідині описується рівнянням теплопровідності

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{g} \vec{\nabla}) T \right) = -(\vec{\nabla} \vec{q}) + \sum_{i,j} \tau_{ij} S_{ij} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{g} \vec{\nabla}) P \right) + Q \quad (2)$$

де ρ – густина, C_p – теплоємність, T – температура, $\vec{g}$ – вектор швидкості рідини, q – густина потоку тепла, P – тиск, τ_{ij} – тензор в'язкого напруження, $\vec{S}_{ij}$ – тензор швидкості деформації, Q – внутрішні джерела тепла.

Узагальнена математична модель для термоелектричного середовища будується на рівняннях балансу тепла в твердій фазі, переносу маси газових компонентів, рівняннях неперервності, фільтраційної гідродинаміки та рівняннях стану. Крім того необхідно сформулювати відповідні граничні умови. Розв'язок такої задачі доцільно проводити комп'ютерними засобами з використанням спеціально розроблених прикладних програм типу COMSOL Multiphysics.

Результати таких досліджень, проведені для проникного термоелемента в 3D моделі, отримано вперше в роботі [8] для охолодження потоків рідини та повітря. Досліджено вплив швидкості прокачки теплоносія та напруги живлення термоелемента на перепад температур й характеристики перетворення енергії. В роботі визначені оптимальні значення швидкості подачі води (повітря) на вході в канали та різницю потенціалів на термоелементі, за яких реалізується максимальна холодопродуктивність під час охолодження. Проведення оптимізації по іншим параметрам в 3D моделі склало суттєві труднощі.

Тому, для проведення багатопараметричної оптимізації проникного термоелемента використовують 1D вимірну модель та математичну теорію оптимального керування [9,10]. В цьому випадку, стаціонарне одновимірне рівняння теплопровідності для матеріалу вітки термоелемента має вид

$$\frac{d}{dx} \left(\kappa(T, \xi(x)) \frac{dT}{dx} \right) + i^2 \rho(T, \xi(x)) - T i \frac{d\alpha(T, \xi(x))}{dx} - \frac{\alpha_T P_K^1 N_K}{(S - S_K)} (T - t) = 0 \quad (3)$$

де P_K^1 – периметр каналу; N_K – число каналів; S_K – площа перерізу всіх каналів; S – переріз вітки разом з каналами; t – температура теплоносія в точці x ; T – температура вітки в точці x ; α_T – коефіцієнт тепловіддачі; i – густина струму ($i = \frac{I}{S - S_K}$); $\alpha(T, \xi(x))$, $\kappa(T, \xi(x))$, $\rho(T, \xi(x))$ –

коефіцієнти термоЕРС, теплопровідності та електричного опору матеріалу вітки є функціями температури T та параметру неоднорідності матеріалу $\xi(x)$. В якості $\xi(x)$, може виступати концентрація носіїв струму в напівпровіднику, легуючих домішок, або інша величина, що характеризує неоднорідність термоелектричної структури вздовж висоти віток термоелемента. Слід зазначити, що параметри термоелектричного середовища α , κ , ρ взаємозалежні. Система цих

зв'язків задає певну множину G_ξ для можливих значень параметру неоднорідності ξ . Конкретизуючи фізичну модель, необхідно задати такі зв'язки, наприклад у виді теоретичних або експериментальних залежностей α , κ , ρ від ξ та T , тим самим визначити множину G_ξ .

В одновимірному стаціонарному випадку на ділянці вітки dx зміна температури теплоносія dt визначається за законом збереження енергії, що дається виразом

$$Gc_p dt = \alpha_T P_K^1 N_K (t - T) dx, \quad (4)$$

де G – масова витрата теплоносія через вітку термоелемента; c_p – теплоємність теплоносія.

Враховуючи співвідношення (4), рівняння для розподілу температури теплоносія t можна представити у виді

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\alpha_T P_K^1 N_K}{Gc_p} (t - T). \quad (5)$$

Розв'язком системи диференціальних рівнянь (3) та (5) є розподіл температур у матеріалах віток і теплоносії.

Перетворимо цю систему рівнянь до вигляду, зручного для розв'язку задачі. Для цього введемо нові позначення

$$j = il, \quad q = \frac{1}{j} \left(\alpha j T - \kappa \frac{dT}{dx} \right), \quad x = \frac{x}{l}, \quad \alpha_e = \alpha_T P_K^1 N_K l, \quad (6)$$

де α_e – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, l – висота віток термоелемента, q – питомий тепловий потік.

Спрямуємо вісь x від холодних спаїв до гарячих. Зміна типу провідності здійснюється одночасно зі зміною напрямку струму, так що умова $\alpha j < 0$ виконується в n - і p - вітках термоелемента. Тоді можливо здійснити заміну $\alpha j = -|\alpha j|$ і далі користуватися абсолютними значеннями параметрів α і j для віток обох типів провідності.

Із врахуванням (6) система диференціальних рівнянь прийме вид :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha j}{\kappa} T - \frac{j}{\kappa} q, \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha^2 j}{\kappa} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + j\rho + \frac{\alpha_e l}{(S - S_K)j} (t - T), \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{\alpha_e}{Gc_p} (t - T). \end{aligned} \right\}_{n,p} \quad (7)$$

Система диференціальних рівнянь (7) записана для віток n - та p -типів провідності (позначено індексами n та p відповідно) дає можливість знайти розподіли температур в матеріалі віток і теплоносії, визначити теплові потоки. На основі даної системи диференціальних рівнянь можна знайти оптимальні параметри та режими роботи проникних термоелементів, дослідити їх

енергетичні характеристики

Величини питомих потоків тепла на холодних та гарячих спаях термоелемента $q(1)$ і $q(0)$ визначимо з урахуванням виділення тепла Джоуля на контактних r_c і комутаційних опорах у такий спосіб [10]:

$$\begin{aligned} q(1) &= \sum_{n,p} \left[q^{n,p}(1) + \frac{j^{n,p}}{l} r_c^{n,p} \right] + \frac{2r_{com}I}{h_{com}} \left(K_{com} - \frac{2}{3} \right) \Bigg\} \\ q(0) &= \sum_{n,p} \left[q^{n,p}(0) - \frac{j^{n,p}}{l} r_c^{n,p} \right] - \frac{2r_{com}I}{h_{com}} \left(K_{com} - \frac{2}{3} \right) \Bigg\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Розглянемо задачу про максимальну енергетичну ефективність термоелектричного охолодження за фіксованих температур джерел тепла T_h і T_c .

Задача зводиться до пошуку максимуму холодильного коефіцієнта ε та ККД η

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} \quad (9)$$

ККД визначимо через відношення потужності термоелемента до зміни ентальпії теплоносія таким чином:

$$\eta = \frac{W}{\sum_{n,p} G_{c_p} (T_m - T_c)}. \quad (9^*)$$

у випадку диференціальних зв'язків (7) і граничних умов

$$T_{n,p}(0) = T_h, \quad T_{n,p}(1) = T_c, \quad t_{n,p}(0) = T_s, \quad (10)$$

де T_h – температура гарячої поверхні спаїв, T_c – температура холодної поверхні спаїв, T_s – початкова температура теплоносія, Q_h , Q_c – теплові потоки, якими термоелемент обмінюється з зовнішніми джерелами тепла

$$Q_h = Q_n(0) + Q_p(0),$$

$$Q_c = Q_n(1) + Q_p(1) + Q_L;$$

тут Q_L – тепло, що підводиться за рахунок внутрішньої тепловіддачі від охолоджуваного теплоносія $Q_L = \sum_{n,p} V_{c_p} S_R (t(0) - t(1))$.

Надалі замість максимуму ε зручно розглядати мінімум функціонала $\mathfrak{Z}$:

$$\mathfrak{Z} = \ln q(0) - \ln q(1), \quad (11)$$

де

$$q(0) = \frac{Q_h}{I} = q_n(0) + q_p(0),$$

$$q(1) = \frac{Q_c}{I} = q_n(1) + q_p(1) + \frac{Q_L}{j(S - S_K)} I,$$

тут $q_n(1)$, $q_p(1)$, $q_n(0)$, $q_p(0)$ – величини питомих потоків тепла на холодних та гарячих спаях термоелемента для віток n - і p -типів, що визначаються із розв'язку системи диференціальних рівнянь (7) з врахуванням (8).

Оптимізаційна задача полягає в тому, що з безлічі допустимих керувань $\xi \in G_\xi$ треба вибрати такі функції концентрації $\xi^{n,p}(x)$ і одночасно призначити таку питому масову швидкість теплоносія в каналах $V=V_0$, які у випадку обмежень (7) – (11) та за умови

$$q_n(1) + q_p(1) = 0 \quad (12)$$

функціонал $\mathfrak{Z}$ прийматиме найменше значення, при цьому холодильний коефіцієнт ε буде максимальним [10, 11].

Знаходження максимуму ККД зводиться до пошуку мінімуму функціонала

$$\mathfrak{Z} = \ln \left[\sum_{n,p} \{ G_{C_P} (T_m - T_C) \} \right] - \ln \left[\sum_{n,p} \left\{ G_{C_P} (T_m - t(0)) + q(0) \frac{j(S - S_K)}{I} - I \left(\frac{r_0}{S_n} + \frac{r_0}{S_p} \right) \right\} \right]. \quad (13)$$

Для подальшого розв'язку зазвичай використовують математичну теорію оптимального керування, розроблену під керівництвом Л.С. Понтрягіна [12].

Метод розв'язку поставленої задачі

Далі задача зводиться до знаходження керування $\xi(x)$, векторів-параметрів ω і відповідного їм розв'язку $X(x)$ системи (7), (10) таких, щоб функціонал $\mathfrak{Z}$ набував мінімального значення. Поставлену таким чином задачу називають оптимізаційною. Її розв'язок у найзагальнішій формі вперше було сформульовано Понтрягіним у вигляді принципу максимуму, що дає необхідну умову оптимальності в задачах оптимального керування.

Принцип максимуму формулюється наступною теоремою.

Нехай $\xi^*(x)$ – оптимальне керування, ω^* – оптимальний вектор-параметр, $X^*(x)$ оптимальна траєкторія. Тоді наявний такий вектор імпульсів $\psi^*(x)$, що для кожного x виконуються такі умови:

1. Функція Гамільтона, що записується у вигляді рівняння

$$H(X_*(x), \xi_*(x), \psi_*(x), \omega_*, x) = (\psi, f) \quad (14)$$

(у нашому випадку f_1, f_2, f_3 – праві частини системи рівнянь (7)), по змінній ξ досягає максимуму:

$$H(X^*(x), \xi^*(x), \psi^*(x), \omega^*, x) = \max_{\xi \in G_\xi} H(X^*(x), \xi, \psi^*(x), \omega^*, x). \quad (14^*)$$

2. Вектор-параметр ω має задовольняти системі інтегрально-диференціальних рівнянь

$$-\frac{\partial \mathfrak{Z}(x(x), \omega)}{\partial \omega_i} + \int \sum_{j=1}^n \psi_j \cdot \frac{\partial f_j^k(x, \xi, \omega)}{\partial \omega_i} dt = 0, \quad i = 1, \dots, r. \quad (15)$$

Вектор імпульсів $\psi(x)$ задовольняє системі диференціальних рівнянь виду

$$\frac{d\psi}{dx} = -\frac{\partial H}{\partial X}, \quad (16)$$

канонічно спряженій системі (7), де $X(X_1, X_2, X_3)$ – вектор-функція фазових змінних (у нашому випадку з компонентами $X_1 = T, X_2 = q, X_3 = t$), з умовами на границі

$$\psi(x) = -\frac{\partial J}{\partial X}. \quad (17)$$

Розв'язок оптимальних задач, що заснований на використанні принципу максимуму, можна реалізувати числовими методами з розробкою відповідних комп'ютерних програм.

Сформульований вище принцип максимуму є основним результатом теорії оптимальних процесів. З її допомогою можна дослідити різноманітні задачі оптимального керування, що відрізняються способом задання функціонала (задачі Лагранжа, Майєра, Больца), обмежень і т.д.

Конкретизуємо викладений раніше формалізм математичної теорії оптимального керування стосовно нашої задачі.

Введемо функцію Гамільтона

$$H = \psi_1 f_1 + \psi_2 f_2 + \psi_3 f_3, \quad (18)$$

тут f_1, f_2, f_3 – праві частини системи рівнянь (7):

$$f_1 = -\frac{\alpha j T}{\kappa} - \frac{q}{\kappa}, \quad f_2 = \frac{\alpha^2 j}{dx} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + i^2 \rho - \frac{\alpha_T P_K^1 N_K l^2}{(S - S_K) j} (T - t),$$

$$f_3 = \frac{\alpha_T P_K^1 N_K l}{V C_P S_R} (T - t).$$

Функції $\psi(x)$ (імпульси) мають задовольняти системі рівнянь (з урахуванням (7) і (17)):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_1}{dx} = \frac{\alpha}{\kappa} j R_1 \psi_1 - \left(\frac{\alpha}{\kappa} j R_2 - \frac{\alpha_T P_K^1 N_K l^2}{(S - S_K) j} \right) \psi_2 - \frac{\alpha_T P_K^1 N_K l}{V_{C_p} S_R} \psi_3, \\ \frac{d\psi_2}{dx} = \frac{j}{\kappa} \psi_1 - \frac{\alpha}{\kappa} j \psi_2, \\ \frac{d\psi_3}{dx} = - \frac{\alpha_T P_K^1 N_K l^2}{(S - S_K) j} \psi_2 + \frac{\alpha_T P_K^1 N_K l}{V_{C_p} S_R} \psi_3, \end{array} \right. \quad (19)$$

де

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = 1 + \frac{d \ln \alpha}{dT} T - \frac{d \ln \kappa}{dT} \left(T + \frac{q}{\alpha} \right) \\ R_2 = R_1 + \frac{1}{Z_K} \frac{d \ln \sigma}{dT} + \frac{d \ln \kappa}{dT} \left(T + \frac{q}{\alpha} \right) \end{array} \right. \quad n, p$$

канонічно спряжені системі (7).

З наступними граничними умовами (умови трансверсальності)

$$\psi(0) = \frac{\partial \bar{J}}{\partial y} \Big|_{x=0}, \quad \psi(1) = - \frac{\partial \bar{J}}{\partial y} \Big|_{x=1}, \quad (20)$$

де $\bar{J} = J + \sum (v, g)$ – розширений функціонал; v, g – вектори невизначених постійних множників

Лагранжа і граничні умови (10).

Тоді граничні умови для спряженої системи набудуть вигляду

$$\begin{aligned} \psi_2^{n,p}(0) &= \frac{1}{q_n(0) + q_p(0)}, \\ \psi_2^{n,p}(1) &= - \frac{(S - S_K) j}{IV_{C_p} S_R (2t(0) - t_n(1) - t_p(1))}, \\ \psi_3^{n,p}(1) &= - \frac{1}{2t(0) - t_n(1) - t_p(1)}. \end{aligned}$$

Використовуючи системи диференціальних рівнянь (7), (19) з урахуванням зв'язків (10), (20) та методів числового розв'язку, можна створити програму комп'ютерного проектування оптимальних функцій неоднорідності термоелектричного матеріалу $\xi(x)$ (або оптимально однорідний матеріал для віток термоелементів із (15)), оптимальної швидкості теплоносія V_0 , параметру густини електричного стуму j та інші, з метою досягнення максимальної енергетичної ефективності проникних термоелементів охолодження та генерування електричної енергії.

Висновки

1. Узагальнено теорію термоелектричного перетворення енергії на випадок джерел та витоків тепла в проникному термоелектричному середовищі. Описано методи моделювання таких термоелементів у 3-D та 1-D просторі. Враховано вплив комутаційних пластин та контактних опорів в місцях з'єднання віток.
2. Вдосконалено теорію розрахунку проникних термоелементів на випадок розв'язку багатofакторної оптимізаційної задачі (оптимальних функцій неоднорідності термоелектричного матеріалу $\xi(x)$, оптимальної витрати теплоносія G , оптимальної швидкості теплоносія V_0 , параметру густини електричного струму j та інші) з метою досягнення максимальної енергетичної ефективності термоелектричного перетворення енергії.

Література

1. Козлюк В.Н., Щеголев Г.М. Термодинамический анализ проницаемых термоэлектрических холодильников // Теплофизика и теплотехника.– 1973. - Вып. 25. – С. 96-100.
2. Котырло Г.К., Козлюк В.Н., Лобунец Ю.Н. Термоэлектрический генератор с развитой поверхностью теплообмена // Теплот. проблемы прямого преобр. энергии.– 1975. -Вып.7. – С.85-95.
3. Лобунец Ю.Н. Методы расчета и проектирования термоэлектрических преобразователей энергии. – К.: Наукова думка, 1989. - 176с.
4. Y.J. Cui, B.L. Wang, K.F. Wang, L. Zheng Power output evaluation of a porous annular thermoelectric generator for waste heat harvesting International Journal of Heat and Mass Transfer 137 (2019) 979–989.
5. E.S. Reddy, J.G. Noudem, C. Goupil, Open porous foam oxide thermoelectric elements for hot gases and liquid environments, Energy Convers. Manage. 48 (2007) 1251–1254.
6. Y.J. Cui, B.L. Wang, K.F. Wang, et al., Fracture mechanics analysis of delamination buckling of a porous ceramic foam coating from elastic substrates, Ceram. Int. 44 (2018) 17986–17991.
7. Каденко І.М. Основи тепло гідравліки ядерних енергетичних установок. / І.М. Каденко, О.М Харитонов, Р.В. Єрмоленко // – К.: ВПЦ «Київський університет», 2010. – 320 с.
8. Черкез Р.Г., Феняк П.П., Дем'янюк Д.Д. Комп'ютерне моделювання проникного термоелемента охолодження // Термоелектрика. –2013.– №5. – С.64-74.
9. Anatyshuk L.I., Cherkez R.G. On the Properties of Permeable Thermoelements // Proc. of XXII Intern. Conf. on thermoelectrics(France).–2003.–С.480-483.
10. Анатычук Л.И., Вихор Л.Н. Компьютерное проектирование каскадных модулей для генераторов // Термоэлектричество. – 2002. – N4. – С.19-27.
11. Cherkez R.G. Energy Characteristics of Permeable Thermoelements // Journal of Electronic Materials, Volume 42, Number 7, 2013, Pages 1558-1563.
12. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.:Наука, 1976. –392 с.

Надійшла до редакції 03.03.2020

Черкез Р.Г. док. фіз.– мат. наук, в.о. професора^{1,2}
Константинович І.А., канд. фіз.– мат. наук, доцент^{1, 2}

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

²Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна

ОБОБЩЕННАЯ ТЕОРИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРОНИЦАЕМЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Представлена обобщенная теория расчета проникаемых термоэлементов с учетом зависимостей параметров материала ветвей от температуры и концентрации носителей тока и изменения условий теплообмена вдоль высоты ветви. Описаны методы моделирования распределений температур и тепловых потоков в 1-D и 3-D мерной модели проникаемого термоэлемента. Усовершенствована теория расчета проникаемых термоэлементов в случае решения многофакторной оптимизационной задачи с целью достижения максимальной энергетической эффективности термоэлектрического преобразования энергии. Бібл. 12, рис. 2.

Ключевые слова: обобщенная теория проникаемых термоэлементов, методы проектирования пропнищаемого термоэлемента.

R.G. Cherkez, dok. phys.– mat. sciences, acting professor^{1,2}
I.A.Konstantynovych, cand. phys.– mat. sciences, assistant professor^{1, 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

GENERALIZED THEORY OF THERMOELECTRIC ENERGY CONVERSION FOR PERMEABLE THERMOELEMENTS

A generalized theory of calculation of permeable thermoelements is presented, taking into account the dependences of the parameters of legs material on the temperature and current carrier concentration and changes in the conditions of heat transfer along the height of the leg. Methods for simulating the distributions of temperatures and heat flows in 1-D and 3-D dimensional models of a permeable thermoelement are described. The theory of calculating permeable thermoelements has been improved for the case of solving a multifactor optimization problem in order to achieve the maximum energy efficiency of thermoelectric energy conversion. Bibl. 12, Fig. 2.

Key words: generalized theory of permeable thermoelements, methods of designing a permeable thermoelement.

References

1. V.N. Kozliuk, G.M. Shchegolev (1973). Termodinamicheskii analiz pronitsayemykh termoelektricheskikh kholodilnikov [Thermodynamic analysis of permeable thermoelectric coolers]. *Teplofizika i teplotekhnika*, 25, 96-100 [in Russian].
2. G.K. Kotyrlo, V.N. Kozliuk, Lobunets Yu.N. (1975). Termoelektricheskii generator s razvitoi poverkhnosti teploobmena [Thermoelectric generator with a developed surface of heat exchange]. *Teplotekhnicheskie problemy priamogo preobrazovaniia energii*, 7, 85-95 [in Russian].
3. Yu.N. Lobunets (1989). *Metody rascheta i proektirovaniia termoelektricheskikh preobrazovatelei energii* [Methods for calculation and design of thermoelectric power converters]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
4. Y.J. Cui, B.L. Wang, K.F. Wang, L. Zheng (2019). Power output evaluation of a porous annular thermoelectric generator for waste heat harvesting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 979–989.
5. E.S. Reddy, J.G. Noudem, C. Goupil (2007). Open porous foam oxide thermoelectric elements for hot gases and liquid environments. *Energy Convers. Manage.*, 48, 1251–1254.
6. Y.J. Cui, B.L. Wang, K.F. Wang., et al. (2018). Fracture mechanics analysis of delamination buckling of a porous ceramic foam coating from elastic substrates. *Ceram. Int.* 44, 17986–17991.
7. I.M. Kadenko, O.M. Kharitonov, R.V. Yermolemko (2010). *Osnovy teplohydrauliky yadernykh enerhetychnykh ustanovok* [Fundamentals of heat hydraulics of nuclear power plants]. Kyiv: “Kyiv University” Publishing Centre [in Ukrainian].
8. R.G. Cherkez, P.P. Fenyak, D.D. Demyanyuk (2013). Computer simulation of permeable cooling thermoelement. *J. Thermoelectricity*, 5, 64-74.
9. L.I. Anatychuk, R.G. Cherkez (2003). On the properties of permeable thermoelements. *Proc. of XXII Intern. Conf. on Thermoelectrics (France)*, 480-483.
10. L.I. Anatychuk, L.N. Vikhor (2002). Computer design of cascade modules for generators. *J. Thermoelectricity*, 4, 19-27.
11. R.G. Cherkez (2013). Energy characteristics of permeable thermoelements. *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 1558-1563.
12. L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskii, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishchenko (1976). *Matematicheskaya teoriia optimalnykh processov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Nauka [in Russian].

Submitted 03.03.2020