

УДК 537.32

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*^{1,2},
Вихор Л.М. *докт. фіз.мат. наук*¹,
Коцур М.П. *канд. фіз.мат. наук*^{1,2},
Кузь Р.В. *канд. фіз.мат. наук*^{1,2},
Черкез Р.Г. *док. фіз.-мат. наук, в.о. професора*^{1,2}

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

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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ З ПРОНИКНИМИ ТА УЦІЛЬНИМИ ТЕРМОЕЛЕМЕНТАМИ

В роботі описані методи розрахунку оптимальних параметрів двох моделей термоелектричного перетворювача в режимі генерації електричної енергії, а саме секційного перетворювача з рухом теплоносія вздовж теплопоглинальних спайів термоелементів і перетворювача з проникними термоелементами, в якому теплоносії проходить по каналам, розташованим вздовж висоти віток термоелементів. Розраховані енергетичні та економічні показники таких моделей і проведено їх порівняльний аналіз. Бібл. 32, рис. 10, табл. 1.

Ключові слова: секційний термоелектричний перетворювач, проникний термоелемент, проникний термоелектричний перетворювач, термоелектричний генератор

Вступ

У сучасному світі дві третини теплової енергії, що отримується від спалення палива, не використовується, а віддається в оточуюче середовище [1, 2]. Тільки з вихлопними газами транспортних засобів втрачається 30 – 35 % тепла, що унеможливує економію ресурсів і збереження екології. Теплові відходи, що утворюються в технологічних процесах, при спалюванні сміття, при роботі турбін, двигунів внутрішнього згорання та інших теплових машин, можна утилізувати і перетворювати в електрику шляхом прямого термоелектричного перетворення енергії. У роботі [3] зазначено, що біля 90 % теплових відходів мають температуру до 300°C. Це зумовлює актуальність розробки і створення термоелектричних генераторів (ТЕГ), спроектованих на цей рівень температури.

У порівнянні з механічними та іншими технологіями утилізації теплової енергії термоелектричні генератори мають ряд беззаперечних переваг, таких як компактність, безшумність роботи, надійність, довговічність та екологічність. ТЕГ не мають рухомих частин, вони не потребують вартісного обслуговування через зношення чи корозію деталей. У роботах [4 – 20] описані приклади практичного застосування ТЕГ для виробництва електроенергії з відпрацьованого тепла від промислових печей [5 – 10], газових турбін [11 – 13], двигунів внутрішнього згорання на транспортних засобах [2, 14 – 20].

У генераторі теплова енергія передається термоелектричній батареї потоком теплоносія (газу або рідини). Схема термоелектричного перетворювача (ТЕП) енергії теплоносія показана на рис. 1а. В генераторах використовуються дві моделі перетворювачів, які відрізняються термоелектричними модулями, що в них застосовуються. В першій моделі теплоносій пропускається крізь теплообмінник, розташований в безпосередньому тепловому контакті з теплопоглинальною поверхнею класичних термоелектричних модулів, термоелементи яких виготовлені з суцільних матеріалів (рис. 1б). Енергію теплоносія можна використати більш ефективно, якщо застосувати додаткові теплообмінники і термоелектричні модулі, що працюють за більш низьких температур. Для такого варіанта термоелектрична батарея складається з декількох секцій з модулів, розташованих вздовж напрямку руху теплоносія. Температура основи теплообмінника, а отже і теплопоглинальних спаїв термоелементів кожної наступної секції буде нижчою ніж попередньої. У роботах [3, 21] було показано, що модель ТЕП з декількома секціями є більш ефективною ніж односекційна і уможливує підвищення генерованої електричної потужності.

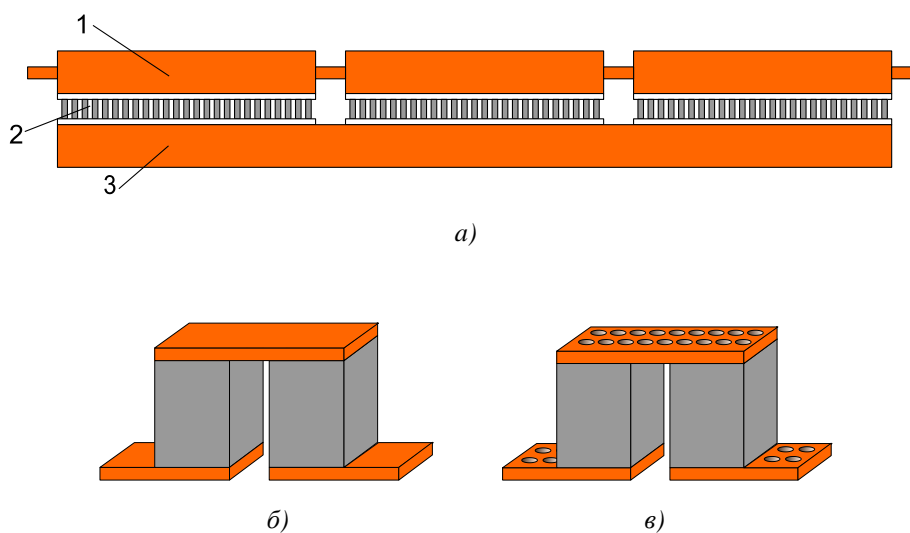


Рис. 1. а) Схема термоелектричного перетворювача енергії.
1 – теплообмінник, 2 – термоелектричний модуль, 3 – термостат;
б) термоелемент з суцільних матеріалів; в) проникний термоелемент.

У другій моделі ТЕП використовуються модулі з проникних термоелементів (рис. 1в), що мають розташовані вздовж висоти вітки пори або канали, по яким рухається теплоносій. Теплообмін відбувається не тільки в області спаїв, а і в об'ємі термоелектричних віток. Вперше спосіб підвищення ККД термоелектричного перетворення енергії за допомогою проникних термоелементів був описаний в патенті [22]. У роботах [1, 23 – 27] для таких термоелементів пропонується використовувати пористі структури. Теоретичний аналіз, проведений в [1] показав, що пористі термоелементи порівняно з суцільними суттєво покращують параметри генератора. З висновків теоретичних досліджень показників каналних проникних ТЕП, виконаних в роботах [28 – 30] методами теорії оптимального керування, випливає, що їх ККД підвищується в 1.2 – 1.4 рази в порівнянні з класичними модулями з суцільних матеріалів.

Отже виникає питання, яка з моделей ТЕП – секційна чи проникна є більш раціональною. Тому метою даної роботи було провести порівняльний аналіз енергетичний та економічних показників

секційного і проникного ТЕП та встановити, яка з моделей є більш ефективною для практичного застосування, зокрема в системах утилізації теплових відходів.

Метод розрахунку параметрів секційного ТЕП

Схема секційного ТЕП показана на рис. 2. У загальному випадку ТЕП містить N секцій, які розміщуються вздовж напрямку потоку теплоносія. Кожна секція складається з теплообмінника, по якому рухається теплоносій, та класичних термоелектричних модулів з термоелементів із суцільних матеріалів. Припускаємо, що температура T_0 тепловиділяючих поверхонь термоелектричних модулів підтримується постійною.

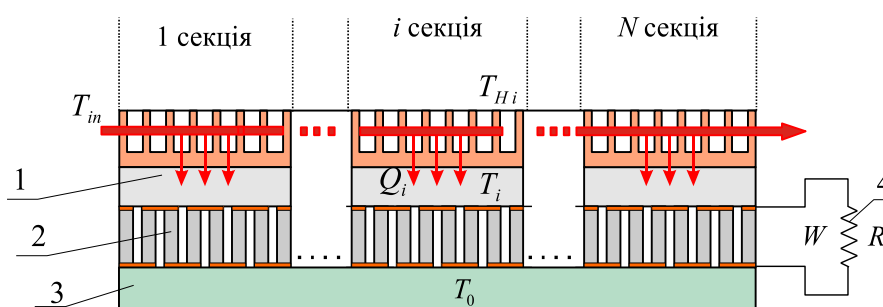


Рис. 2. Схема N -секційного ТЕП. 1 – теплообмінник, 2 – термоелектричні модулі, 3 – термостат, 4 – узгоджене електричне навантаження.

Задача полягає в тому, щоб оцінити оптимальні параметри кожної секції, які забезпечують максимальний ККД ТЕП в генераторному режимі за умов заданої температури T_{in} теплоносія на вході в теплообмінник і масової витрати m теплоносія.

ККД ТЕП визначається наступним чином:

$$\eta = \frac{W}{G(T_{in} - T_0)}, \quad (1)$$

де $G = c_p m$ – повна теплоємність теплоносія, c_p – його питома теплоємність, W – повна потужність, яка генерується ТЕП. Враховуючи, що за умовами задачі температури T_0 і T_{in} є заданими, максимальному значенню η відповідає максимум потужності W :

$$W = \sum_{i=1}^N W_i, \quad (2)$$

де W_i – потужність i -ої секції ТЕП.

Для розв'язування задачі використано наступні наближення.

1. В стаціонарному стані температура основи теплообмінника i -ої секції не залежить від координат і дорівнює температурі T_i теплопоглинальної поверхні модулів i -ої секції.
2. Перемішування в потоці теплоносія достатньо інтенсивне і усереднена температура T_{Hi} теплоносія на виході з i -ого теплообмінника дорівнює температурі теплоносія на вході в $(i+1)$ -ий теплообмінник, тобто

$$T_{in i+1} = T_{Hi}. \quad (3)$$

3. Коефіцієнти термоЕРС α , питомого опору ρ і теплопровідності κ є незалежними від температури і однаковими за величиною для віток n - і p - типів провідності.

4. Коефіцієнт теплопередачі α_T теплоносія і його теплоємність c_p є незалежними від температури.

5. Втрати тепла в оточуюче середовище нехтуються.

За цих припущень потужність тепла, що переносить теплоносієм i -ої секції, визначається наступним чином

$$Q_i = G(T_{in_i} - T_{Hi}) \quad (4)$$

і дорівнює тепловій потужності конвективного теплообміну з теплоносієм в i -ому теплообміннику, тобто

$$Q_i = \alpha_T K S_{TEi} (T_{Hi} - T_i), \quad (5)$$

де $K = S_{Hi} / S_{TEi}$ – коефіцієнт співвідношення між площею S_{Hi} основи теплообмінника і сумарною площею S_{TEi} поперечного перерізу віток термоелементів в i -ій секції.

Електрична потужність, що генерується термоелектричною батареєю i -ої секції, визначається з співвідношення

$$W_i = \eta_i(T_i, T_0) Q_i = \eta_i(T_i, T_0) G(T_{Hi-1} - T_{Hi}), \quad (6)$$

яким враховується умова (3) і позначення $T_{Hi0} = T_{in}$. У цьому виразі $\eta_i(T_i, T_0)$ – максимальне значення ККД термоелектричної батареї i -ої секції, що визначається за формулою [31]

$$\eta_i(T_i, T_0) = \frac{T_i - T_0}{T_i} \frac{M - 1}{M + T_0/T_i}, \quad (7)$$

де $M = \sqrt{1 + 0.5Z(T_i + T_0)}$, $Z = \frac{\alpha^2}{\rho\kappa}$. На теплопоглинаючій поверхні i -ої термоелектричної батареї виконується умова теплового балансу, а саме

$$Q_i = Q_{hi}, \quad (8)$$

де Q_{hi} – теплопродуктивність i -ої термоелектричної батареї, яка в режимі максимального ККД задовольняє співвідношенню [31]

$$Q_{hi}(T_i, T_0) = \frac{\kappa S_{TEi}}{L} \frac{ZM(T_i M + T_0)(T_i - T_0)}{(M + 1)^2 (M - 1)}, \quad (9)$$

де L – висота віток термоелементів. Тоді з умови теплового балансу (8) отримується вираз для температури теплоносія T_{Hi} :

$$T_{Hi} = T_i + \frac{\kappa}{\alpha_T K L} \frac{ZM(T_i M + T_0)(T_i - T_0)}{(M + 1)^2 (M - 1)}. \quad (10)$$

Користуючись виразами (6), (7), (10), за формулою (2) визначається повна потужність ТЕП як функція температур теплопоглинаючих спаїв термоелементів всіх секцій: $W = W(T_1, \dots, T_N)$. Комп'ютерними методами знаходиться оптимальна послідовність температур спаїв T_i і відповідно

температур теплоносія T_{Hi} в теплообмінниках, за яких потужність W , а отже і ККД ТЕП набувають максимальних значень.

Надалі для оптимальних розподілів температур T_i і T_{Hi} знаходяться значення потужності кожної секції W_i (6) та із співвідношення

$$\rho \frac{L}{S_{TEi}} = \frac{\alpha^2 (T_i - T_0)^2}{4W_i} \quad (11)$$

розраховується сумарна площа S_{TEi} поперечного перерізу віток термоелементів кожної секції за умов заданої висоти віток L . Об'єм термоелектричного матеріалу визначається за формулою $V = L \sum_{i=1}^N S_{TEi}$.

Метод розрахунку параметрів проникного ТЕП

Проникний ТЕП утворюють послідовно з'єднані проникні модулі із термоелементів з каналами у комутаційних пластинах та вітках, які спрямовані вздовж висоти віток. Модель проникного термоелемента показана на рис. 3.

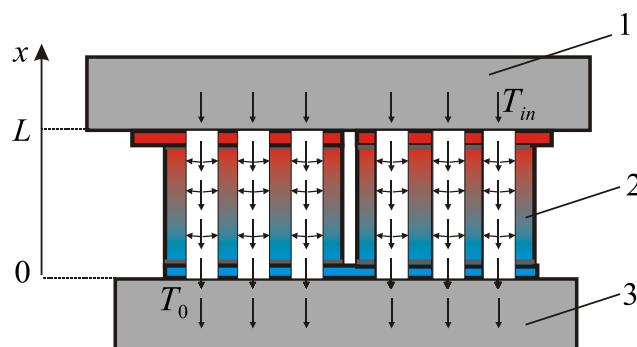


Рис. 3. Модель проникного термоелемента. 1 – резервуар теплоносія, 2 – термоелемент з каналами для теплоносія, 3 – термостат.

Як і в попередній моделі секційного ТЕП вважаємо, що параметри термоелектричних матеріалів не залежать від температури та їх величина однакова для n - і r -віток. Бічні поверхні віток адіабатично ізольовані. Температура T_0 тепловідляючих спаїв проникних термоелементів підтримується постійною. Теплоносій рухається вздовж каналів, віддає тепло в об'єм віток термоелементів і охолоджується.

Аналогічно до секційного ТЕП задача полягає в знаходженні оптимальних параметрів проникного ТЕП, які забезпечують максимальний ККД за умов заданої температури T_{in} теплоносія на вході в канали та витрати теплоносія m . Ефективність ТЕП характеризується ККД його окремого проникного термоелемента, який визначається за формулою

$$\eta = \frac{W_{TE}}{c_p m_{TE} (T_{in} - T_0)}, \quad (12)$$

де m_{TE} – витрати теплоносія для термоелемента, W_{TE} – потужність, що генерується термоелементом.

Для розрахунку ККД необхідно розв'язати стаціонарну крайову задачу, яка описує розподіли температури і теплового потоку в вітках термоелемента та в потоці теплоносія. В одновимірному наближенні система диференціальних рівнянь цієї задачі має вигляд [30]

$$\begin{aligned}\frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha_j}{\kappa} T - \frac{j}{\kappa} q, \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha^2 j}{\kappa} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + j\rho + \frac{\alpha_e}{jS}(t-T), \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{\alpha_e}{c_p m_{TE}}(t-T),\end{aligned}\quad (13)$$

де використані наступні позначення: T – температура термоелемента, t – температура теплоносія в каналах, $q = \frac{1}{j} \left(\alpha_j T - \kappa \frac{dT}{dx} \right)$ – питомий тепловий потік у вітках термоелемента, S – площа поперечного перерізу матеріалу віток термоелемента, $j = I/S$ – густина струму у вітках термоелемента, $\alpha_e = \alpha_T P_c N_c$, α_T – коефіцієнт теплопередачі в каналах, N_c – кількість каналів у вітках термоелемента, P_c – периметр каналу.

Крайові умови задачі для системи рівнянь (13) наступні:

$$T(0) = T_0, \quad t(L) = T_m, \quad q(L) = 0. \quad (14)$$

Електрична потужність, що генерується проникним термоелементом, обчислюється за формулою

$$W_{TE} = Q_h - Q_0, \quad (15)$$

де $Q_h = c_p m_{TE} (T_m - t(0))$ – потужність тепла, що поглинається в каналах проникного термоелемента, $Q_0 = q(0)jS$ – тепло, що віддається тепловиділяючою поверхнею термоелемента в оточуюче середовище.

Отже згідно виразів (12) і (15) максимальний ККД проникного ТЕП за умов визначеної геометрії і розмірів термоелементів досягається, якщо витрати теплоносія m_{TE} в каналах і густини струму j у вітках термоелемента приймають оптимальні значення. Оптимізаційна задача полягає в знаходженні максимуму ККД (12) проникного термоелемента, за умов обмежень, які накладаються на термоелемент крайовою задачею (13) – (14). Така задача розв'язується методами теорії оптимального керування із застосуванням принципу максимуму Понтрягіна [32]. Умови оптимальності та приклади розв'язання такої задачі наведені в роботах [29, 30]. Задача розв'язується за допомогою комп'ютерних засобів.

Результатами вирішення задачі є зокрема оптимальні значення електричної потужності W_{TE} і витрати теплоносія m_{TE} для термоелемента, які забезпечують максимальний ККД. Кількість послідовно з'єднаних термоелементів N_{TE} в генераторній батареї для забезпечення заданої витрати теплоносія m , повна потужність W і об'єм термоелектричного матеріалу V обчислюються за формулами

$$N_{TE} = m/m_{TE}, \quad W = W_{TE} N_{TE}, \quad V = N_{TE} L S. \quad (16)$$

Таким чином методи розрахунку і оптимізації параметрів секційного та проникного ТЕП докорінним чином відрізняються. Секційна модель вимагає оптимізації генераторної батареї в цілому, а в проникній моделі достатньо оптимізувати параметри окремого термоелемента. Така особливість пояснюється тим, що внаслідок відмінності схем руху теплоносія в цих моделях ТЕП, суцільні термоелементи в різних секціях працюють в різних температурних умовах, а проникні термоелементи – в однакових. Відповідно виникає необхідність у коректному порівнянні теоретичних результатів оптимізації секційного і проникного ТЕП, щоб виявити більш раціональну модель перетворювача для її подальшої практичної реалізації.

Результати розрахунку параметрів секційного і проникного ТЕП та їх порівняння

Для порівняння двох моделей ТЕП з матеріалів на основі Bi_2Te_3 розраховувалися максимальний ККД, генерована потужність та відповідні їм значення витрат термоелектричного матеріалу та його питома вартість. Розрахунки виконувалися за умов однакових для обох моделей заданих значень витрати теплоносія і його температури на вході в теплообмінник ТЕП. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 1.

Показники ТЕП залежать від інтенсивності теплообміну, який характеризується коефіцієнтом теплообміну α_T і площею теплообміну. Коефіцієнт α_T вибирався однаковим для обох моделей ТЕП. Щодо площі теплообміну, то для секційної моделі вона залежить від співвідношення між площею основи теплообмінника і сумарною площею поперечного перерізу термоелектричних віток в секціях, яке характеризується коефіцієнтом K . Для проникного ТЕП площа теплообміну залежить від кількості каналів заданого діаметру, які розташовані на площі $S=1 \text{ см}^2$ термоелектричного матеріалу. Отже для розрахунку оптимальних показників ТЕП площа теплообміну не може бути заздалегідь заданою величиною. Тому параметри секційного ТЕП розраховувалися для двох варіантів, а саме для раціонального випадку теплообміну з коефіцієнтом $K=3.5$ і для “ідеального” випадку, коли температура теплопоглинальних спаїв термоелементів вважається рівною температурі теплоносія в теплообміннику, тобто теплообмін не впливає на параметри ТЕП. Для проникної моделі перетворювача розрахунки виконувалися для ТЕП з різною кількістю каналів.

Таблиця

Значення величин, використані для розрахунку параметрів ТЕП

Величина	Значення
Коефіцієнт термоЕРС α , мкВ/К	230
Питомий опір ρ , Ом·см	$1.25 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт теплопровідності κ , Вт/см·К	0.015
Коефіцієнт теплообміну α_T , Вт/см ² ·К	0.015
Питома теплоємність теплоносія (газ CO_2) c_p , Дж/(г·К)	1000

Продовження таблиці

Витрата теплоносія m , г/с	$1.15 \cdot 10^{-3}$
Температура теплоносія на вході в теплообмінник T_{in} , °С	100 – 300
Температура тепловиділяючої поверхні ТЕП T_0 , °С	50

Результати розрахунку параметрів двох моделей ТЕП наведені на рис. 4– 10. Перш за все необхідно було визначити, якою може бути раціональна кількість секцій для секційного ТЕП та раціональна висота віток для проникного ТЕП.

На рис. 4 показані залежності максимального ККД від кількості секцій N перетворювача та від висоти віток L проникних термоелементів. Розрахунки проведені за умов температури теплоносія на вході $T_{in}=300^\circ\text{C}$, для секційного ТЕП з висотою віток 1 см, $K=3.5$ і для проникного ТЕП з 25-ма каналами на 1 см^2 площі матеріалу. Із збільшенням кількості секцій або висоти проникних віток ККД для обох моделей ТЕП зростає та прямує до одного й того ж значення, в даному випадку до $\eta_{\max}=4\%$. Це пояснюється збільшенням площі теплообміну, що уможливило більш повне використання теплової потужності теплоносія, яка для обох моделей в даному випадку становить $Q_{\text{heat}} = c_p m (T_{in} - T_0) = 287.5\text{ Вт}$. Для секційного ТЕП доцільно використовувати 3 – 4 секції, а для проникного ТЕП раціонально є висота віток до 2 см. Зрозуміло, що подальше підвищення кількості секцій або висоти не суттєво збільшує ККД, але різко збільшує витрати термоелектричного матеріалу.

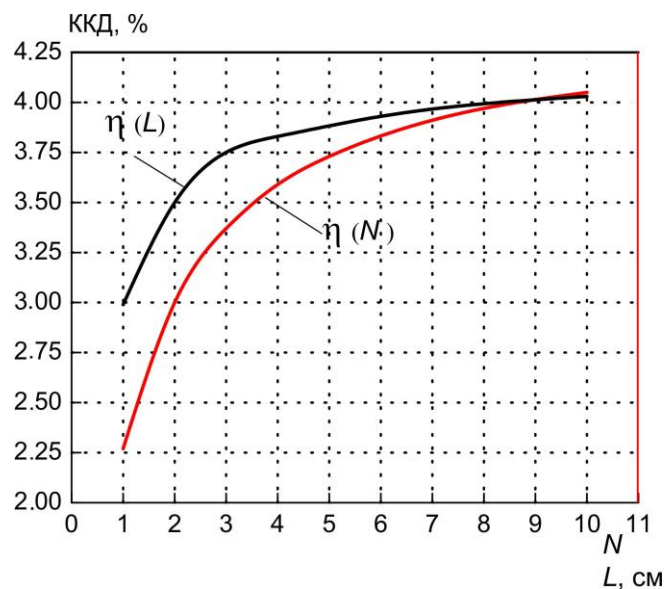


Рис. 4. $\eta(N)$ – залежність ККД секційного ТЕП від кількості секцій N .
 $\eta(L)$ – залежність ККД проникного ТЕП від висоти L віток термоелементів.

На рис. 5 показана залежність ККД секційного ТЕП з різною кількістю секцій від температури T_{in} теплоносія на вході в теплообмінник. Розрахунки проведені з врахуванням теплообміну між теплоносієм і теплопоглинальною поверхнею ТЕП (суцільні лінії) і для “ідеального” випадку, у наближенні, коли теплообмін не враховується (пунктирні лінії), тобто коефіцієнт теплообміну $\alpha_T \rightarrow \infty$.

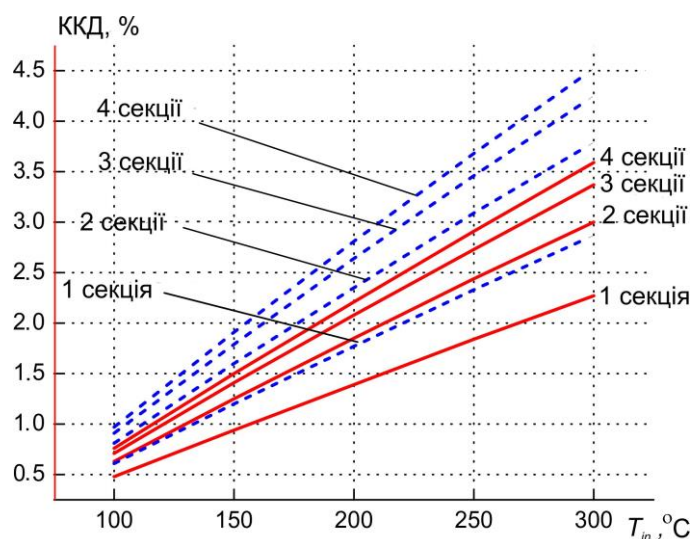


Рис. 5. ККД секційного ТЕП з врахуванням теплообміну (суцільні лінії) та без теплообміну (штрихові лінії). Висота віток термоелементів 1 см.

ККД залежить від кількості секцій. Ці результати підкреслюють висновок, що найбільш раціональною моделлю є трисекційний ТЕП. Подальше збільшення кількості секцій не призводить до суттєвого підвищення ефективності перетворення теплової енергії.

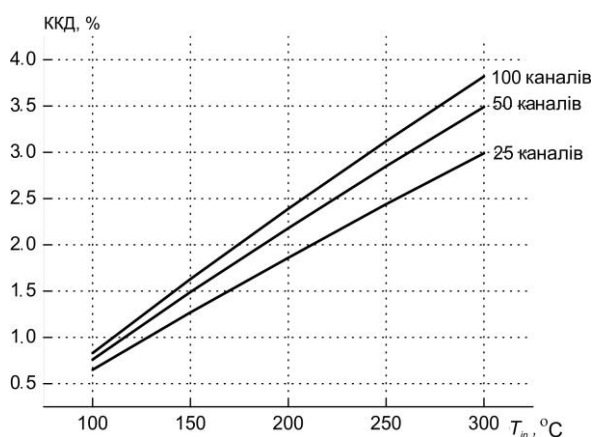


Рис. 6. ККД проникного ТЕП з різною кількістю каналів на 1 см² площі термоелектричного матеріалу.

На рис. 6 показана залежність ККД від температури T_{in} теплоносія на вході проникного ТЕП з висотою віток 1 см і різною кількістю каналів на 1 см² площі термоелектричного матеріалу (діаметр каналу 1 мм). Із порівняння цих результатів з даними для проникного ТЕП на рис. 6 слідує, що для $T_{in}=300^{\circ}\text{C}$ ККД проникних термоелементів висотою 1 см з 50-ю каналами і висотою 2 см з 25-ма каналами фактично однакові. Отже в проникному ТЕП доцільно збільшувати площу теплообміну з теплоносієм за рахунок збільшення кількості каналів, а не підвищення висоти віток, адже це не призведе до збільшення об'єму термоелектричного матеріалу.

На рис. 7 для порівняння показана залежність ККД від температури теплоносія на вході в теплообмінник для секційного (суцільні лінії) і проникного (пунктирні лінії) ТЕП. Значення ККД найбільш раціональних схем ТЕП, а саме трохсекційного ТЕП і проникного ТЕП з 50-ю каналами на 1 см², відрізняються не суттєво. За температури теплоносія $T_{in}=300^{\circ}\text{C}$ ККД цих варіантів ТЕП досягає 3.5 %.

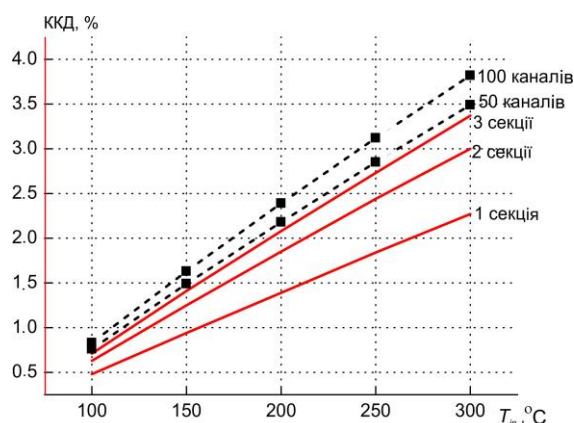


Рис. 7. Порівняння ККД секційного і проникного ТЕП.

ККД проникного ТЕП підвищується, якщо збільшувати число каналів для теплоносія. За цих умов збільшується площа теплообміну між теплоносієм і термоелектричним матеріалом, що сприяє підвищенню ККД. Рациональним є від 50 до 100 каналів. Подальше підвищення числа каналів не суттєво підвищує ККД.

Для підвищення ККД секційного ТЕП доцільно вдосконалювати систему теплообміну між теплоносієм і гарячою поверхнею термоелектричної батареї, щоб покращити конвективний теплообмін між теплоносієм і теплообмінником. За цих умов ККД підвищується і наближається до значення ККД в ідеальному випадку, коли теплообмін не впливає на ККД (рис. 5).

На рис. 8 показані результати розрахунку максимальної електричної потужності для різних схем ТЕП. За умов температури теплоносія 300°C потужність 3-секційного ТЕП і проникного ТЕП з 50-ю каналами на 1 см² становить біля 10 Вт.

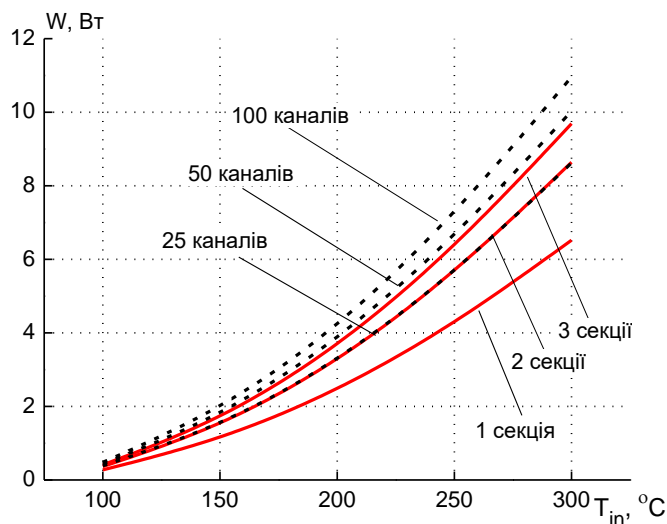


Рис. 8. Максимальна електрична потужність секційного і проникного ТЕП.

Для порівняння економічних показників двох моделей ТЕП розраховувався об'єм термоелектричного матеріалу, його витрати і питома вартість одержання 1 Вт електричної енергії. Результати показані на рис. 9, 10.

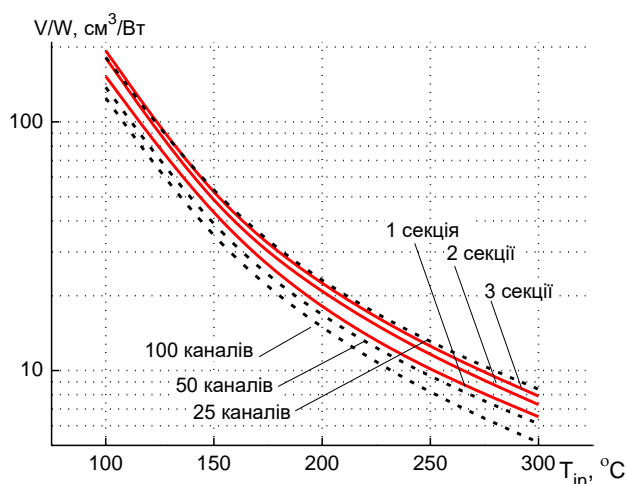


Рис. 9. Витрати термоелектричного матеріалу для секційного і проникного ТЕП у розрахунку на 1 Вт генерованої електроенергії

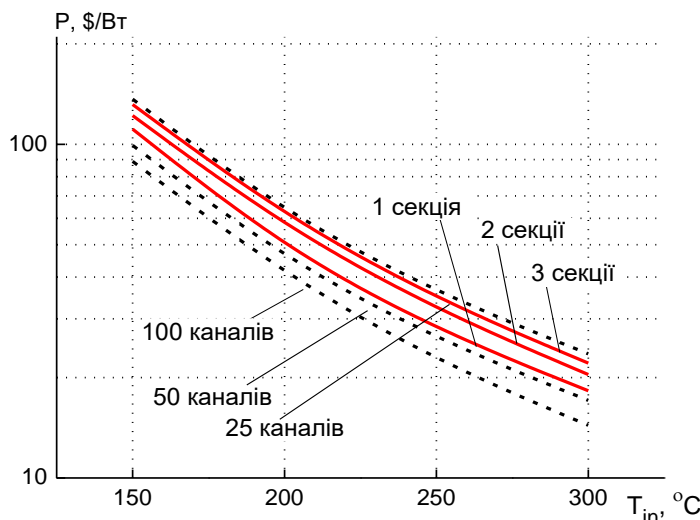


Рис. 10. Питома вартість матеріалу для секційного і проникного ТЕП.

За цими показниками більш ефективним є проникний ТЕП, який має у вітках термоелементів від 50 до 100 каналів на 1 cm^2 . Витрати матеріалу і питома вартість для такого ТЕП на 25 – 35 % менші порівняно з трисекційним перетворювачем.

Зауважимо, що економічні показники ТЕП суттєво залежать від температури теплоносія на вході в теплообмінник. За умов підвищення температури від $100 \text{ }^\circ\text{C}$ до $300 \text{ }^\circ\text{C}$ витрати матеріалу і питома вартість як секційного так і проникного ТЕП зменшуються в 25 разів.

Висновки

Розрахунок і порівняння параметрів секційного і проникного ТЕП уможливають наступні висновки:

1. В ідеальному випадку, коли площа теплообміну між теплоносієм і термоелектричним матеріалом безмежно зростає, ККД секційного ТЕП з класичних термоелементів із суцільних матеріалів і перетворювача з проникних термоелементів будуть однаковими.

2. Найбільш раціональними реальними моделями є 3-секційний ТЕП з класичних термоелементів і проникний ТЕП, у якого 50 каналів на 1 см² площі термоелектричного матеріалу. ККД цих ТЕП суттєво не відрізняються.
3. За економічними показниками кращою є модель ТЕП з проникних термоелементів, для якого витрати термоелектричного матеріалу і питома вартість 1 Вт електроенергії можуть бути на 25 – 35 % меншими ніж у секційного ТЕП.
4. Потребує подальшого дослідження вплив на енергетичні та економічні показники ТЕП збільшення площі теплообміну в проникних модулях і зменшення висоти віток термоелементів з суцільних матеріалів у класичних модулях для кожної секції.

Література

1. 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*. – 2019. – 137. – P. 979–989.
2. Кузь Р.В. Термоелектричні генератори для транспортних засобів. аналіз практичних досягнень. // *Термоелектрика*. – 2019. – №6. – с. 1–10.
3. Анатичук Л.І., Кузь Р.В. Ефективність термоелектричних рекуператорів для раціональних температур джерел тепла. *Термоелектрика*, 2020, №4, с. 1–13.
4. Basel I. Ismail, Wael H. Ahmed. Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology. // *Recent Patents on Electrical Engineering*. – 2009. – 2. – P. 27-39.
5. T. Kuroki, K. Kabeya, K. Makino, T. Kajihara, H. Kaibe, H. Nachiama, H. Matsuno. Thermoelectric generation using heat in steel works. *Journal of electronic materials*.- 2014.
6. Л.І. Анатичук, Хен-Дон Хванг, В.В. Лисько Термоелектричні рекуператори тепла для цементних печей. *Термоелектрика*. – 2013.– №5. – С. 39-45.
7. Kajikawa T. Advances In Thermoelectric Power Generation Technology In Japan. // *J. of Thermoelectricity*. – 2011/ – №3. – P. 5 – 19.
8. A. Montecucco, J. Siviter, A. R. Knox. A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generator. *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015. Energy Procedia*. – 2015. – 75. – P. 597 – 602.
9. X. Gou, H. Xiao, S. Yang, Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. // *Appl. Energy*. – 2010. – 87. – P. 3131–3136.
10. Villar A., Arribas J. Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Techn Environ Policy*. – 2012. – 14. – P.29-39.
11. Yodovard P, Khedari J, Hirunlabh J. The potential of waste heat thermoelectric power generation from diesel cycle and gas turbine cogeneration plants. *Energy Sources*. –2001. – 23. – P. 213-224.
12. M.A. Karri, E.F. Thacher, B.T. Helenbrook, Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: two case studies, *Energy Convers. Manag.*, 2011. – 52. – P. 1596–1611.
13. Anatychuk L.I., Morozov V.I., Mitin V.P., Prybyla A.V. Thermoelectric recuperator for gas turbines / 31-th International and 10-th European Conference on Thermoelectrics. – 2012. – Aalborg, Denmark.
14. B.D. In, H.L. Kim, J.W. Son, The study of a thermoelectric generator with various thermal conditions of exhaust gas from a diesel engine. *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2015. – 86. – P. 667–680.
15. B. Orr, A. Akbarzadeh, M. Mochizuki, R. Singh. A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes. // *Appl. Therm. Eng.* – 2016. – 101. – P. 490–495.
16. X. LiuY. D. DengW. S. WangC. Q. Su. Experimental investigation of exhaust thermoelectric system and application for vehicle. // *J. of Electronic Materials*. – 2015. – 44. – 6. – P. 2203–2210.
17. Jing-Hui Meng, Xiao-Dong Wang, Wei-Hsin Chen. Performance investigation and design optimization

- of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery. // *Energy Convers. Manag.* – 2016. – 120. – P. 71–80.
18. Yanliang Zhanga, Martin Clearyb, Xiaowei Wangb, Nicholas Kempfa, Luke Schoenseea, Jian Yangb, Giri Joshib, Lakshmikanth Medac. High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery. // *Energy Convers. Manag.* – 2015. – 105. – P. 946–950.
19. Kim S., Won B., Rhi S., Kim S.H., Yoo J. Thermoelectric power generation system for future hybrid vehicles using hot exhaust gas. // *J. of Electronic Materials.* – 2011. – 40. – N 5.
20. Henry Bosch. From Modules to a Generator: An Integrated Heat Exchanger Concept for Car Applications of a Thermoelectric Generator. // *J. of Electronic Materials.* – 2016. – 45. – N 3.
21. Анатичук Л.І., Кузь Р.В., Прибила А.В. Підвищення ефективності секційних термоелектричних рекуператорів тепла. // *Термоелектрика.* – 2014. – №6. – с. 77–88.
22. А. с. 162578 СССР. Способ повышения КПД термоэлектрического генератора / И. В. Зорин (СССР). – № 772007/24 – 7; заявл. 02.04.1962; опубл. 08.05.64, Бюл. № 10.
23. Eura T., Komine T., Hasegava Y., Takata A., Katsuki F., Katoh M., Nakao K., Utsumi K. Research and Development on a thermoelectric power generating system using Low-Calorie Exhaust Gas, 20th ICT. –2001. – p. 409-412.
24. 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.
25. 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.
26. K. Nithyanandam, R.L. Mahajan, Evaluation of metal foam based thermoelectric generators for automobile waste heat recovery, In. *J. Heat Mass Transfer* 122 (2018) 877–883.
27. K. Koumoto, R. Funahashi, E. Guilmeau, et al., Thermoelectric ceramics for energy harvesting, *J. Am. Ceram. Soc.* 96 (2013) 1–23.
28. Cherkez R. G. Energy possibilities of permeable generator thermoelements based on segmented legs // *AIP Conf. Proc.* 1449, 443 (2012), pp. 439-442.
29. Черкез Р.Г., Пожар Е.В., Жукова А.С., Хриков В.К. Вплив числа каналів на ефективність проникних термоелементів з матеріалів на основі *Bi-Te-Se-Sb*. // *Термоелектрика.* – 2019. – №3. – с. 58–63.
30. Анатичук Л.І., Черкез Р.Г. Проникний термоелементу режимі генерації електричної енергії. // *Термоелектрика.* – 2003. – №2. – с. 35–45.
31. Burshtein A.I. *Semiconductor thermoelectric devices.* // London: Temple Press. – 1964. – 131 p.
32. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. // Москва: Наука. – 1976. – 392 с.

Надійшли до редакції: 19.05.2021

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*^{1,2},
Вихор Л.М. *докт. физ.мат. наук*¹,
Коцур М.П. ^{1,2},
Кузь Р.В. *канд. физ.мат. наук*^{1,2},
Черкез Р.Г. *док. физ.-мат. наук, и.о. профессора*^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,

Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatykh@gmail.com;
²Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ С ПРОНИЦАЕМЫМИ И СПЛОШНЫМИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАМИ

В работе описаны методы расчета оптимальных параметров двух моделей термоэлектрического преобразователя в режиме генерации электрической энергии, а именно секционного преобразователя с движением теплоносителя вдоль теплопоглощающих спаев термоэлементов и преобразователя из пронцаемых термоэлементов, в котором теплоноситель проходит по каналам, расположенным вдоль высоты. Рассчитаны энергетические и экономические показатели таких моделей и проведен их сравнительный анализ. Библ. 32, рис. 10, табл. 1.

Ключевые слова: секционный термоэлектрический преобразователь, пронцаемый термоэлемент, пронцаемый термоэлектрический преобразователь, термоэлектрический генератор

Anatykhuk L.I., acad. National Academy
of Sciences of Ukraine^{1,2}
Vikhor L.M. dok. phys.-mat. Sciences¹
Kuz R.V. cand. phys.-mat. Sciences^{1,2}
Cherkez R.G., dok. phys.-mat. Sciences,
Acting professor^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatykh@gmail.com;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

COMPARATIVE ANALYSIS OD THERMOELECTRIC ENERGY CONVERTERS WITH PERMEABLE AND SOLID THERMOELEMENTS

The paper describes methods for calculating the optimal parameters of two models of a thermoelectric converter in the mode of electrical energy generation, namely, a sectional converter with the heat carrier movement along the heat-absorbing junctions of thermoelements and a converter of permeable thermoelements, in which the heat carrier passes through channels located along the height of the thermoelement legs. The energy and economic indicators of such models are calculated and their comparative analysis is carried out. Bibl. 32, Fig. 10, Table. 1.

Key words: sectional thermoelectric converter, permeable thermoelement, permeable thermoelectric converter, thermoelectric generator

References

1. Cui, Y.J., Wang B.L., Wang K.F., Zheng L. (2019). Power output evaluation of a porous annular thermoelectric generator for waste heat harvesting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 979–989.
2. Kuz R.V. (2019). Thermoelectric generators for transport means: analysis of practical achievements. *J. Thermoelectricity*, 6, 1–10.
3. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2020). Efficiency of thermoelectric recuperators for rational temperatures of heat sources. *J. Thermoelectricity*, 4, 1–13.
4. Ismail Basel I., Ahmed Wael H. (2009). Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology. *Recent Patents on Electrical Engineering*, 27-39.
5. Kuroki T., Kabeya K., Makino K., Kajihara T., Kaibe H., Hachiuma H., Matsuno H. (2014). Thermoelectric generation using heat in steel works. *Journal of Electronic Materials*.
6. Anatyshuk L.I., Jenn-Dong Hwang, Lysko V.V. (2013). Thermoelectric heat recuperators for cement kilns. *J. Thermoelectricity*, 5, 39-45.
7. Kajikawa T. (2011). Advances in thermoelectric power generation technology in Japan. *J. Thermoelectricity*, 3, 5–19.
8. Montecucco A., Siviter J., Knox A.R. (2015). A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generator. The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015. *Energy Procedia*, 75, 597 – 602.
9. Gou X., Xiao H., Yang S. (2010). Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. *Appl. Energy*, 87, 3131–3136.
10. Villar A., Arribas J. (2012). Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Techn Environ Policy*, 14, 29-39.
11. Yodovard P., Khedari J., Hirunlabh J. (2001). The potential of waste heat thermoelectric power generation from diesel cycle and gas turbine cogeneration plants. *Energy Sources*, 23, 213-224.
12. Karri M.A., Thacher E.F., Helenbrook B.T. (2011). Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: two case studies. *Energy Convers. Manag.*, 52, 1596–1611.
13. Anatyshuk L.I., Morozov V.I., Mitin V.P., Prybyla A.V. (2012). Thermoelectric recuperator for gas turbines. *31-th International and 10-th European Conference on Thermoelectrics (Aalborg, Denmark, 2012)*.
14. In B.D., Kim H.L., Son J.W. (2015). The study of a thermoelectric generator with various thermal conditions of exhaust gas from a diesel engine. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 86, 667–680.
15. Orr B., Akbarzadeh A., Mochizuki M., Singh R. (2016). A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes. *Appl. Therm. Eng.*, 101, 490–495.
16. X. Liu Y. D. Deng W. S. Wang C., Su Q. (2015). Experimental investigation of exhaust thermoelectric system and application for vehicle. *J. of Electronic Materials*, 44(6), 2203–2210.
17. Meng Jing-Hui, Wang Xiao-Dong, Chen Wei-Hsin (2016). Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery. *Energy Convers. Manag.*, 120, 71–80.
18. Zhang Yanliang, Cleary Martin, Wang Xiaowei, Kempf Nicholas, Schoensee Luke, Yang Jian, Joshib Giri, Medac Lakshmi Kanth (2015). High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery. *Energy Convers. Manag.* 105, 946–950.
19. Kim S., Won B., Rhi S., Kim S.H., Yoo J. (2011). Thermoelectric power generation system for future hybrid vehicles using hot exhaust gas. *J. of Electronic Materials*, 40 (5).
20. Bosch Henry. (2016). From modules to a generator: An integrated heat exchanger concept for car appli-

- cations of a thermoelectric generator. *J. of Electronic Materials*, 45(3).
21. Anatychuk L.I., Kuz R.V., Prybyla A.V. (2014). Efficiency improvement of sectional thermoelectric heat recuperators. *J. Thermoelectricity*, 6, 77–88.
 22. *USSR Author's Certificate 162578* (1964). I.V.Zorin. Method for improving the efficiency of thermoelectric generator [in Russian].
 23. Eura T., Komine T., Hasegawa Y., Takata A., Katsuki F., Katoh M., Nakao K., Utsumi K. (2001). Research and development on a thermoelectric power generating system using low-calorie exhaust gas (*20th ICT, 2001, 409-412*).
 24. Reddy E.S., Noudem J.G., Goupil C. (2007). Open porous foam oxide thermoelectric elements for hot gases and liquid environments. *Energy Convers. Manage.* 48, 1251–1254.
 25. Cui Y.J., Wang B.L., Wang, K.F., et al. (2018). Fracture mechanics analysis of delamination buckling of a porous ceramic foam coating from elastic substrates. *Ceram. Int.* 44, 17986–17991.
 26. Nithyanandam K., Mahajan R.L. (2018). Evaluation of metal foam based thermoelectric generators for automobile waste heat recovery. *J. Heat Mass Transfer*, 122, 877–883.
 27. Koumoto K., Funahashi R., Guilmeau E., et al. (2013). Thermoelectric ceramics for energy harvesting. *J. Am. Ceram. Soc.* 96, 1–23.
 28. Cherkez R. G. (2012). Energy possibilities of permeable generator thermoelements based on segmented legs. *AIP Conf. Proc.* 1449 (443), 439-442.
 29. Cherkez R.G., Pozhar E.V., Zhukova A.S., Khrykov V.K. (2019). Influence of the number of channels on the efficiency of permeable thermoelements of *Bi-Te-Se-Sb* based materials. *J. Thermoelectricity*, 3, 58–63.
 30. Anatychuk L.I., Cherkez R.G. (2003). Permeable thermoelement in electric energy generation mode. *J. Thermoelectricity*, 2003, 2, 35–45.
 31. Burshtein A.I. (1964). *Semiconductor thermoelectric devices*. London: Temple Press.
 32. Pontryagin L.S., Boltianskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. (1976). *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes]*. Moscow: Nauka [in Russian].

Submitted: 19.05.2021