

Р.Г. Черкез^{1,2}, М.С. Ластівка¹, А.С. Жукова³

Оптимізація ефективності проникних термоелектричних елементів для кондиціонування повітря

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна, radionch@ukr.net

²Інститут термоелектрики МОН і НАН України, Чернівці, Україна

³Коледж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

Представлена оптимізація проникного термоелемента для термоелектричного кондиціонера на базі. У термоелектричному блоці кондиціонера повітряний потік охолодження за допомогою спільної дії термоелектричних ефектів та ефекту Джоуля-Томсона. Відповідно до методики розрахунку розподілу температури, визначення енергетичних характеристик перетворення енергії та конструкції термоелементів у режимах максимальної КС. Результати комп'ютерних досліджень для випадків термоелементних ніжок на основі матеріалу Bi_2Te_3 показали можливість використання коефіцієнта коефіцієнта корисної дії у 1,6-1,7 рази порівняно із звичайними термоелектричними системами.

Ключові слова: термоелектричність, термоелементи, телурид вісмуту, коефіцієнт корисної дії, кондиціонер.

Подано до редакції 7.02.2021; прийнято до друку 10.04.2021.

Вступ

Термоелектричні системи охолодження екологічні (без фреону), безшумні, примітні простою конструкцією, високою надійністю, випадковим розташуванням у просторі, можливістю безступінчастого та точного контролю охолоджувальної потужності та температури, що свідчить про їхні перспективи для створення повітряних кондиціонерів. Однак, незважаючи на такі привабливі характеристики, термоелектричні системи охолодження не знайшли широкого застосування у вирішенні проблем термостабілізації повітря, що обумовлено їх меншим коефіцієнтом ефективності порівняно з компресорними пристроями. Тому підвищення ефективності термоелектричних систем кондиціонування є актуальною проблемою.

Можливості широкого застосування термоелектричного охолодження в першу чергу залежать від їх енергетичної ефективності, тобто

коефіцієнта холодопродуктивності (COP). Створення термоелектричних матеріалів з максимальним показником ефективності, використання каскадних конструкцій та вдосконалення системи теплообміну вважаються основними напрямками підвищення COP.

Методи поліпшення показника гідності термоелектричних матеріалів були викладені А. Ф. Іоффе ще в середині ХХ століття [1]. Вони полягають у легуванні матеріалу основи активними домішками для досягнення максимуму $\alpha^2\sigma$ значення і легуючий матеріал з ізовалентними домішками заміщення для зниження теплопровідності. Ці методи були застосовані до деяких матеріалів, які покращили гідність і, відповідно, сприяли широкому практичному використанню термоелектрики. Однак протягом останніх десятиліть, незважаючи на численні дослідження, подальше збільшення показника гідності термоелектричних матеріалів було незначним. Слід шукати нові шляхи підвищення ефективності. Тому все більша увага приділяється дослідженню альтернативних ліній - одновимірних та

вусових квантових структур, плівкових матеріалів та композитів квантових ям. Дослідження також проводяться на термоелектричних матеріалах із програмованою неоднорідністю (FGM), що сприяють підвищенню енергоефективності за рахунок використання об'ємних термоелектричних ефектів та належного обліку температурної залежності властивостей матеріалу [2, 3]. Застосування каскадних конструкцій [3, 4] дозволяє збільшити COP на 30 - 60 %.

Розглянемо тепер можливості вдосконалення системи теплообміну. Інтенсифікація системи теплообміну дозволяє зменшити різницю температур на термоелементі, і тим самим збільшується COP системи. Цей підхід може бути реалізований за допомогою теплових труб та термосифонів. Показано [4], що використання термосифонів для стандартних термоелектричних модулів 40×40 мм дозволяє збільшити COP системи на 30 %.

З точки зору збільшення COP системи, також привабливо використовувати замкнені цикли руху теплоносія в системах теплообміну холодних і гарячих поверхонь термоелектрики. При хорошій інтенсивності теплообміну такий підхід дозволяє зменшити різницю температур на термоелементах і підтримувати необхідне охолодження теплоносія в термоелементі. У багатоелементних термоелектричних системах [5, 6] це дозволяє поліпшити COP системи на 40 - 60 %.

Найефективнішими є системи теплообміну, в яких введення або відведення тепла відбувається не тільки через поверхні гарячого та холодного переходів, але також через внутрішні поверхні ніжок термоелемента. Такі термоелементи прийнято називати проникними або термоелементами з розвинутим внутрішнім теплообміном [7-9].

У проникних термоелементах перекачування теплоносія через канали (пори) матеріалу може спричинити його додаткове охолодження за рахунок

ефекту Джоуля-Томсона, створеного при дроселюванні потоків газу [11]. Це може допомогти реалізувати такі ситуації, коли спільна дія термоелектричних ефектів та ефект Джоуля-Томсона сприятиме збільшенню COP. Повітряні охолоджувачі добре обіцяють практичне впровадження, оскільки зростає попит на термоелектричні кондиціонери для невеликих приміщень, засоби мобільного та електронного зв'язку тощо.

Отже, метою даної роботи є встановити можливість підвищення енергетичної ефективності термоелектричного кондиціонера із комбінованою дією термоелектричних ефектів та ефекту Джоуля-Томсона.

1. Фізична модель та математичний опис проблеми

На рис. 1 представлена схема терморегулюючого блоку термоелектричного кондиціонера на основі проникних термоелементів [12]. Потік повітря 1 для термостатування подається вентилятором 2 уздовж труби 4 через очисний фільтр 11 і гарячий теплообмінник 5 до блоку проникних термоелементів 3.

Електричний струм необхідної полярності, який проходить через термоелементи, призводить до охолодження їх нижніх сторін. Повітря, що проходить через канали термоелементів у напрямку до холодних переходів, також охолоджується завдяки теплообміну з матеріалами ніжок, а охоложене повітря 14 подається через трубу 13 до споживача. Тепло з «гарячих» сторін термоелементів відводиться теплообмінником 5 за допомогою теплоносія, який циркулює в трубі 6 і відводить тепло в навколишнє середовище. Труба 8 і заслінка 7 з вентилятором 9 служать для забору повітря з навколишнього середовища. Основним компонентом блоку є

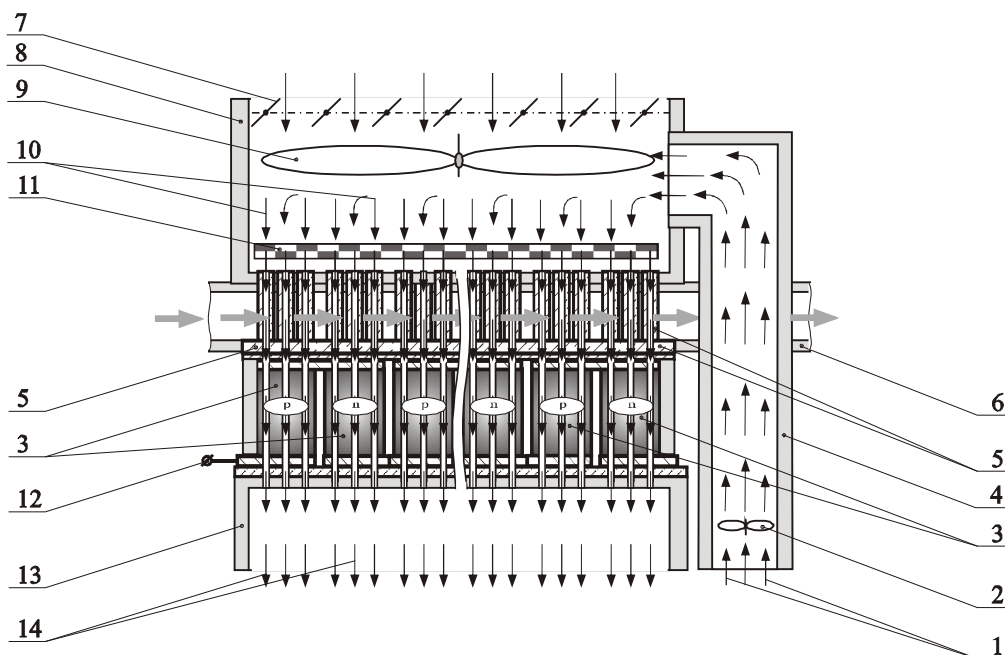


Рис. 1. Термостатичний блок термоелектричного кондиціонера.

термоелектрична проникна термоелементація 3, характеристика якої визначає енергетичну ефективність пристрою.

Проникні термоелементи 3 засновані на термоелектричному матеріалі типу p та n , включаючи канали (пори) для перекачування газового теплоносія, що охолоджується. Теплове навантаження на термоелемент від потоку газу, що охолоджується, створюється завдяки теплообміну всередині ніжок термоелемента. Гаряча та холодна сторони термоелемента підтримуються на постійних значеннях T_h та T_c відповідно. Теплоносій перекачується від гарячого до холодного переходів.

Пропускання електричного струму необхідної полярності призводить до виникнення відомих термоелектричних ефектів при охолодженні верхньої та нагріванні нижніх частин ніжок. Теплоносій, що перекачується через канали (пори) в термоелементних ніжках у напрямку від гарячого до холодного переходів, завдяки теплообміну з основною частиною матеріалу ніжок також охолоджується. Додаткова дія ефекту Джоуля-Томсона, що описується співвідношенням [13] у вигляді:

$$dt = \mu_{JT} dp, \quad (1)$$

викликає більш інтенсивне охолодження теплоносія, що проходить через ніжки.

Для формулювання проблеми визначення температурних полів, енергетичних характеристик перетворення потужності та конструкції таких перетворювачів потужності розглянемо фізичну модель охолоджуючого термоелемента з використанням ефекту Джоуля-Томсона.

Фізична модель охолоджуючого проникного термоелемента містить ніжки типу n та p , де властивості матеріалу змінюються в залежності від координати x внаслідок їх температурної залежності $T(x)$. Тепло від теплоносія передається термоелементному матеріалу через теплообмін з внутрішньою поверхнею каналів ніг.

Стационарний одновимірний розподіл температури в матеріалі ніжок $T(x)$ та в теплоносії $t(x)$ можна знайти з рішення системи диференціальних рівнянь [14] з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha^2 j}{\kappa} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + j\rho - \frac{h \Pi_K N_K l^2}{(S - S_K) j} (T - t), \\ \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha j}{\kappa} T - \frac{j}{\kappa} q, \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{h \Pi_K N_K l}{V c_p S_K} (T - t) - \mu_{JT} l \frac{dp}{dx}. \end{aligned} \right\} n,p \quad (2)$$

$$\text{де } j = il; \quad i = \frac{I}{S - S_K};$$

$$q = \frac{1}{j} \left(\alpha(T, \xi(x)) j T - \kappa(T, \xi(x)) \frac{dT}{dx} \right), \quad x = \frac{x}{l} \in$$

безрозмірною координатою; $\alpha(T)$, $\kappa(T)$, $\rho(T)$ - термоелектричний коефіцієнт, теплопровідність і опір матеріалу як функції температури T .

Вплив ширини каналу h на гідродинамічній картині враховувало через режим потоку теплоносія та теплофізичні властивості середовища відповідно до співвідношення [15]:

$$h = \frac{\lambda_m \cdot 1.4 \cdot (\text{Re}_m \frac{d}{l})^{0.4} \cdot \text{Pr}_m^{0.33} \cdot (\frac{\text{Pr}_m}{\text{Pr}_c})^{0.25}}{d}. \quad (3)$$

Зміна тиску $\frac{dp}{dx}$ в напрямку потоку теплоносія описується співвідношенням Дарсі-Вейсбаха:

$$\frac{dp}{dx} = \xi_d \frac{\pi V^2}{2 \Pi_K \rho g}. \quad (4)$$

Щодо (4), система диференціальних рівнянь (2) буде записана як:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha^2 j}{\kappa} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + j\rho - \frac{h \Pi_K N_K l^2}{(S - S_K) j} (T - t), \\ \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha j}{\kappa} T - \frac{j}{\kappa} q, \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{h \Pi_K N_K l}{V c_p S_K} (T - t) - \mu_{JT} \xi_d \frac{\pi V^2 l}{2 \Pi_K \rho g}. \end{aligned} \right\} n,p \quad (5)$$

Розглянемо проблему максимальної енергетичної ефективності термоелектричного охолодження при фіксованих температурах джерел тепла та раковин.

Проблема зводиться до пошуку максимального COP

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} \quad (6)$$

при диференціальних співвідношеннях (5) та граничних умовах:

$$T_{n,p}(0) = T_h, \quad T_{n,p}(l) = T_c, \quad t_{n,p}(0) = T_a, \quad (7)$$

де Q_h , Q_c - теплові потоки, що обмінюються між термоелементом та зовнішніми джерелами тепла:

$$Q_h = Q_n(0) + Q_p(0), \quad Q_c = Q_n(l) + Q_p(l) + Q_L,$$

де Q_L - це споживання тепла за рахунок внутрішнього теплообміну від теплоносія, що

$$\text{охолоджується } Q_L = \sum_{n,p} V c_p S_K (t(0) - t(1)). \quad q_n(1) + q_p(1) = 0 \quad (9)$$

Надалі замість максимального ε зручно вважати мінімум функціоналу J :

$$J = \ln q(0) - \ln q(1), \quad (8)$$

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

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

$q_n(1), q_p(1), q_n(0), q_p(0)$ - значення питомих теплових потоків на холодному та гарячому термоелементних переходах для гілок n - та p -типів, які знаходяться із розчину системи (5).

Проблема оптимізації полягає у виборі з безлічі допустимих елементів управління $\xi \in G_\xi$ така

питома масова швидкість теплоносія в каналах $V = V_0$, яка за обмеженнями (5), (7) та умовою щільності електричного струму j :

функціональний J надається найнижче значення, тим самим COP ε буде максимальним.

II. Метод вирішення сформульованої задачі

Для вирішення сформульованої задачі ми будемо використовувати математичну теорію Понтрягіна оптимального управління [17], застосовану до термоелектричного перетворення енергії [18]. Формалізм математичної теорії оптимального управління буде вказаний з посиланням на нашу задачу.

Введемо функцію Гамільтона:

$$H = \psi_1 f_1 + \psi_2 f_2 + \psi_3 f_3, \quad (10)$$

де f_1, f_2, f_3 - це праві частини набору рівнянь (5):

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

$$f_3 = \frac{h \Pi_K N_K l}{V c_p S_K} (T - t) - \mu J T^\xi d \frac{\pi V^2 l}{2 \Pi_K \rho g}.$$

Функції $*(\xi)$ (імпульси) повинні задовольняти систему рівнянь [17]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dx} &= \frac{\alpha j}{\kappa} R_1 \psi_1 - \left(\frac{\alpha j}{\kappa} R_2 - \frac{h \Pi_K N_K l^2}{(S - S_K) j} \right) \psi_2 - \frac{h \Pi_K N_K l}{V c_p S_R} \psi_3, \\ \frac{d\psi_2}{dx} &= \frac{j}{\kappa} \psi_1 - \frac{\alpha j}{\kappa} \psi_2, \\ \frac{d\psi_3}{dx} &= -\frac{h \Pi_K N_K l^2}{(S - S_K) j} \psi_2 + \frac{h \Pi_K N_K l}{V c_p S_K} \psi_3. \end{aligned} \right\}_{n,p} \quad (11)$$

де $\left. \begin{aligned} R_1 &= 1 + \frac{d \ln \alpha}{dT} T - \frac{d \ln \kappa}{dT} \left(T + \frac{q}{\alpha} \right), \\ R_2 &= R_1 + \frac{1}{Z} \frac{d \ln \sigma}{dT} + \frac{d \ln \kappa}{dT} \left(T + \frac{q}{\alpha} \right). \end{aligned} \right\}_{n,p}$ канонічно спряжений до системи (5).

З граничними умовами (умовами поперечності):

$$\psi(0) = \frac{\partial \bar{J}}{\partial y} \Big|_{x=0}, \quad \psi(1) = -\frac{\partial \bar{J}}{\partial y} \Big|_{x=1}, \quad (12)$$

де $\bar{J} = J + \sum(\nu, g)$ є розширеним функціоналом;

ν, g є векторами невизначених постійних множників Лагранжа та граничних умов (7).

Тоді граничні умови для спряженої системи приймуть вигляд:

$$\psi_2^{n,p}(0) = \frac{1}{q_n(0) + q_p(0)},$$

$$\psi_2^{n,p}(1) = -\frac{(S - S_K)j}{Wc_p S_R (2t(0) - t_n(1) - t_p(1))}, \quad (13)$$

$$\psi_3^{n,p}(1) = -\frac{1}{2t(0) - t_n(1) - t_p(1)}.$$

Для використання методу систему рівнянь (5), (7), (11), (13) слід доповнити функціями, що стосуються параметрів матеріалу α , σ , κ до концентрації домішок ξ і температури.

Проблема оптимізації полягає у визначенні такої швидкості потоку теплоносія V і такої щільності електричного струму j , що за обмежень (5), (7), (11), (13) буде надано найменше значення функціоналу J (8). У цьому випадку КС (8) буде максимальною.

Відповідно до принципу максимуму Понтрягіна, для мінімуму J повинні бути виконані наступні умови.

1. Щільність струму повинна відповідати рівності:

$$-\frac{\partial J}{\partial j} + \sum_{n,p} \int_0^1 \frac{\partial H(\psi, T, q, t, j, V)}{\partial j} dx = 0. \quad (14)$$

2. Витрата теплоносія в каналах повинен відповідати рівнянню:

$$-\frac{\partial J}{\partial V} + \sum_{n,p} \int_0^1 \frac{\partial H(\psi, T, q, t, j, V)}{\partial V} dx = 0. \quad (15)$$

Система рівнянь (5), (7), (11), (13) з урахуванням (14), (15) та чисельні методи вирішення були використані для створення програми автоматизованого проектування оптимальних параметрів проникного термоелемента охолодження.

III. Результати автоматизованого проектування проникного термоелемента на основі матеріалу Bi_2Te_3

Розглянемо результати проектування проникних термоелементів з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона для повітряного охолодження, а гілки термоелектричного матеріалу виготовлені з твердих розчинів на основі Bi_2Te_3 (рис. 2). Ці залежності $\alpha_{n,c} = \alpha_{n,c}(T)$; $\sigma_{n,c} = \sigma_{n,c}(T)$; $\kappa_{n,c} = \kappa_{n,c}(T)$ використовувались у програмі обчислень. Температуру повітря на вході в пористий термоелемент T_s приймали рівною температурі гарячого переходу T_h .

Характеристики проникного термоелемента як функції швидкості повітря в каналах V при співвідношенні $Sk/S = 0,5$ при оптимальній щільності струму представлені на рис. 3. Видно, що КС має максимум відповідно до швидкості

накачування повітря, яка в цьому випадку становить близько 20 см/с. Зі збільшенням швидкості руху повітря в каналах коефіцієнт коефіцієнта полегшення зменшується і при високих швидкостях повітря стає меншим, ніж у класичних термоелементах ϵ_0 . Із охолоджувальною здатністю це не так, тобто при малих швидкостях повітря (до 30 см/с) воно менше, ніж у класичних термоелементах Q_{c0} , а при високих швидкостях воно більше. Таким чином, для ефективного діаметра каналу 0,05 см при рівних значеннях COP (швидкість 50 см/с) охолоджуюча здатність проникних термоелементів на 40 % більша порівняно з класичними об'ємними термоелементами. Це дозволить забезпечити більш ефективний тепловий режим роботи кондиціонера.

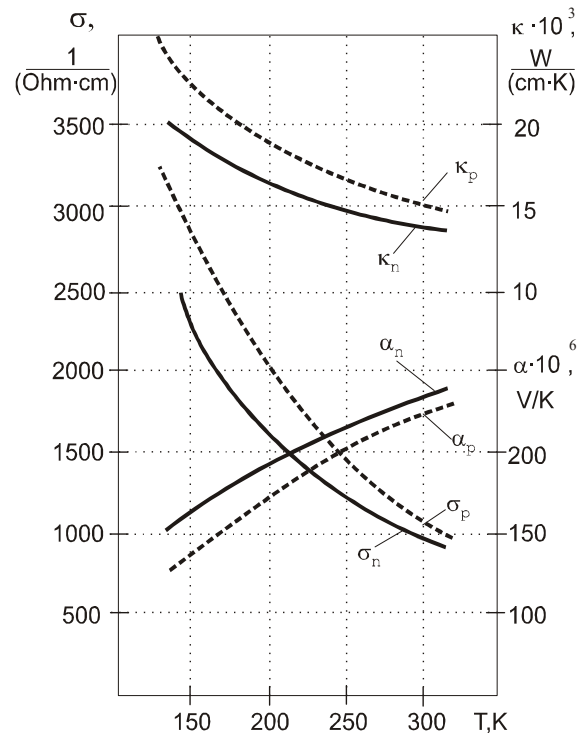


Рис. 2. Температурні залежності параметрів матеріалу Bi_2Te_3 .

Аналізуючи результати, слід зазначити, що ефект Джоуля-Томсона має більш виражений вплив на охолодження газів при малих діаметрах каналів ($dk < 0,1$ см). Отже, чим менший діаметр каналу, тим більший ефект. При цьому необхідно забезпечити досить велику кількість каналів, щоб гарантувати більш високу охолоджувальну потужність термоелемента. Ця ситуація реалізується у випадку використання пористих матеріалів, що свідчить про хороші перспективи використання таких матеріалів у проникних охолоджуючих термоелементах.

У той же час зменшення діаметрів каналів збільшує різницю тисків, яка повинна бути створена для перекачування повітря. Якщо ця різниця не є природною, а створюється зовнішніми способами, це призводить до збільшення витрат енергії, а отже, знижує термодинамічну ефективність перетворення енергії.

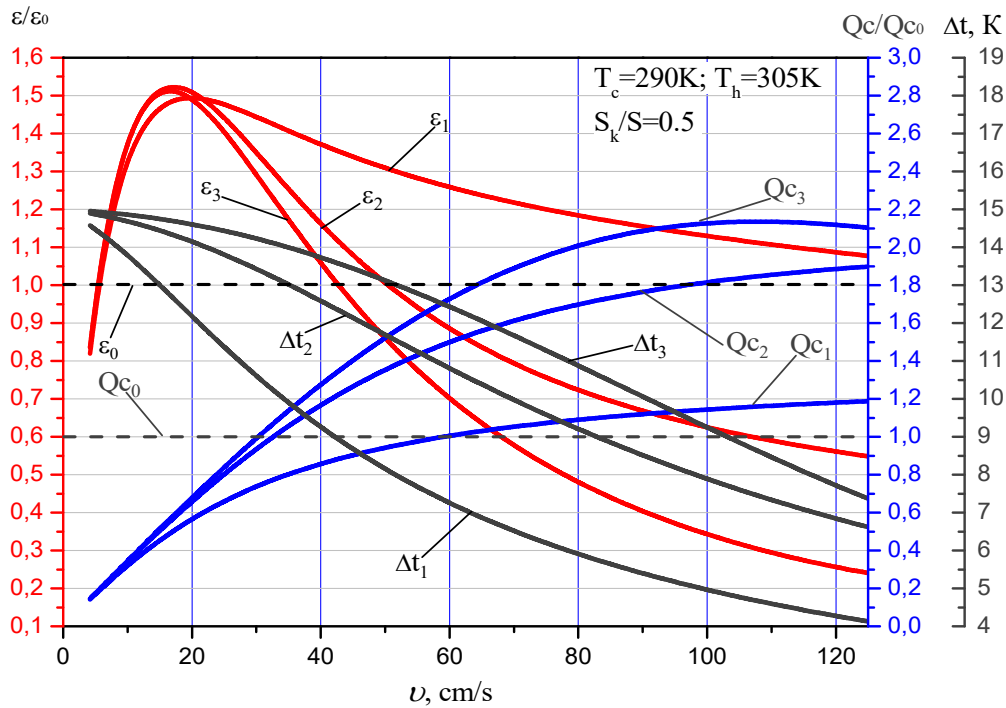


Рис. 3. Залежність коефіцієнта продуктивності ϵ , охолоджуючої здатності Q_c відносно їх значень для класичних елементів термопар (ϵ_0, Q_0) і глибини охолодження повітря Δt від швидкості повітря в каналах (індекс 1 - ефективний діаметр каналів 0,1см; 2 - 0,05 см; 3 - 0,033см).

Таблиця 1

Оптимальні параметри проникного термоелемента

$\Delta\theta$, К	$\Delta\tau$, К		SOPmax	Q_c , W	Q_h , W	V_{opt} , гр / (см ² с)	стрибок, А / см	P, W	U, V	Я, А
6,0	5,4		5,65	0,238	0,275	0,0228	5,3	0,042	0,015	2,7
10,0	9,3		3,95	0,312	0,384	0,0219	7,4	0,079	0,021	3,7
14,0	13,1		2,94	0,378	0,498	0,0209	9,5	0,128	0,027	4,8
18,0	17,0		2,28	0,436	0,618	0,0199	11,7	0,191	0,033	5,8
22,0	20,9		1,81	0,486	0,744	0,0188	14,0	0,269	0,038	7,0
26,0	24,8		1,46	0,528	0,878	0,0177	16,3	0,362	0,044	8,2
30,0	28,7		1,18	0,560	1,018	0,0166	18,7	0,471	0,050	9,4
34,0	32,6		0,97	0,583	1,168	0,0155	21,3	0,599	0,056	10,6
38,0	36,6		0,79	0,595	1,327	0,0143	23,9	0,746	0,062	11,9
42,0	40,6		0,65	0,597	1,496	0,0131	26,6	0,915	0,069	13,3
46,0	44,6		0,52	0,586	1,678	0,0118	29,5	1,108	0,075	14,7
50,0	48,7		0,42	0,563	1,874	0,0105	32,5	1,326	0,082	16,2

Оптимальні параметри проникного термоелемента на основі матеріалу Bi_2Te_3 для режиму максимального коефіцієнта продуктивності при $T_h = 305$ К залежно від різниці температур ΔT наведені в таблиці 1.

Цікаво вивчити збільшення коефіцієнта коефіцієнта проникності термоелементів за рахунок ефекту Джоуля-Томсона. Ці дані наведені на рис. 4 як зростання COP проникних термоелементів із застосуванням ефекту Джоуля-Томсона (залежність 1) та проникних термоелементів без ефекту Джоуля-Томсона (залежність 2) порівняно з непроникними термоелементами. Залежність 1 дана для випадку, коли діаметр каналів, розташованих щільністю 3800 шт. на 1 см², становить 0,01 см, а

висота ніжок - 1 см.

Очевидно, що раціональне використання термоелектричних ефектів у поєднанні з ефектом Джоуля-Томсона дозволяє збільшити коефіцієнт коефіцієнта корисної дії як функцію різниці температур на 60 - 70 % порівняно з непроникними охолоджувачами термопар (залежність 1) і на 5 - 8 % (різниця між залежностями 1 і 2) порівняно з проникними термоелементами, де ефект Джоуля-Томсона незначний.

Порівняємо коефіцієнт охолодження з традиційними термоелектричними модулями Пельтье [19]. Для різниці температур 33 К їх коефіцієнт охолодження становить 0,6. З таблиці 1 видно, що проникна термопара при охолодженні повітря до

33 К має коефіцієнт охолодження 0,9. Таким чином, коефіцієнт корисної дії при використанні проникних термопар досягає 50%. Ця перевага з точки зору коефіцієнта охолодження вказує на перспективність досліджень, спрямованих на створення проникних термоелектричних охолоджувачів повітря.

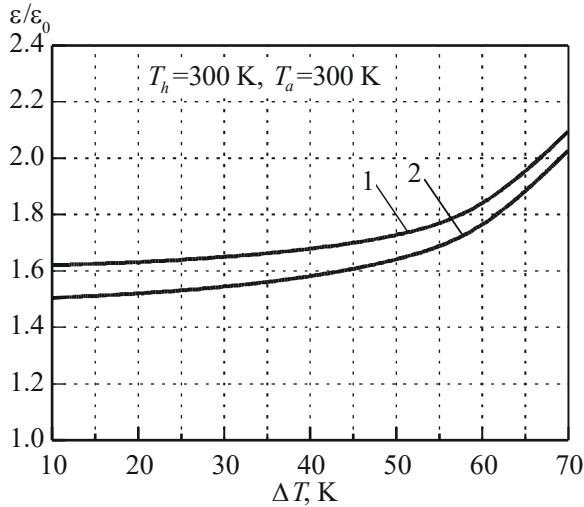


Рис. 4. Коефіцієнт зростання продуктивності порівняно з традиційними непроникними термоелементами як функція різниці температур. (1 - проникний термоелемент з використанням ефекту Джоуля-Томсона; 2 - проникний термоелемент без ефекту Джоуля-Томсона).

Порівняння значень коефіцієнта корисної дії такої термоелектричної системи з іншими варіантами, обговореними у вступі, дозволяє зробити висновок, що термоелектричні кондиціонери на основі проникних термоелементів мають перспективу.

Висновки

Представлена фізична модель охолодження термоелемента з використанням комбінованої дії термоелектричних ефектів та ефекту Джоуля-Томсона для охолодження газових потоків. Потужність охолодження термоелемента при максимальній COP має максимум відповідно до діаметра каналів, їх кількості та висоти гілок. Відхилення від оптимальних значень цих параметрів може призвести до істотного зменшення корисної потужності охолодження.

Результати комп'ютерних досліджень у випадку використання матеріалу Bi_2Te_3 для гілок термоелементів показали, що раціональне використання термоелементів дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії на 60 - 70% порівняно із звичайними термоелементами.

Термоелектричні охолоджувальні пристрої мають ряд переваг перед іншими типами

холодильних машин. В даний час теплосистеми або парові холодильні машини використовуються в системах кондиціонування повітря на суднах. У холодну пору року корабельні приміщення опалюються електричними, паровими або водонагрівачами, тобто використовуються окремі джерела тепла та холоду. За допомогою термоелектричних приладів в теплу пору року можна охолодити приміщення, а в холодну - обігріти. Режим нагріву змінюється на режим охолодження шляхом реверсування електричного струму. Крім того, до переваг термоелектричних приладів належать: повна відсутність шуму під час роботи, надійність, відсутність робочої речовини та масла, менша вага та габаритні розміри при однаковій холодильній потужності. Порівняльні дані про холодильні машини для постачання камер на суднах показують, що при однаковій холодильній потужності маса термоелектричної холодильної машини на 1,7 - 1,8 менше, ніж компресія. Термоелектричні холодильні машини для систем кондиціонування мають обсяг близько чотирьох і масу втричі менше, ніж холодильні компресійні машини [20-22].

До недоліків термоелектричних охолоджуючих пристроїв слід віднести недостатню ефективність та високу вартість. Ефективність традиційних термоелектричних холодильних машин порівняно з паровою приблизно на 20 - 50 % нижча [23]. Висока вартість пристроїв теплового охолодження пов'язана з високими цінами на напівпровідникові матеріали. Однак є сфери, де вони вже здатні конкурувати з іншими типами холодильних машин.

Ця робота надає можливість для більш широкого використання проникних термоелектричних приладів при вирішенні проблем термостабілізації повітря. Такі термоелектричні блоки також можуть застосовуватися для охолодження мікросхем у сучасних комп'ютерах, мобільних та телекомунікаційних блоках, приладах для біологічних та медичних застосувань

Подяка

Автор висловлює подяку Людмилі Вихор (Інститут термоелектрики) за консультацію щодо моделювання проникних термоелементів; Лук'яну Анастичуку (Інститут термоелектрики) за загальну консультацію.

Робота підтримана Міністерством освіти і науки України.

Через Р.Г. – д.ф.-м.н., доцент, професор кафедри термоелектрики та медичної фізики;
Ластівка М.С. - магістр кафедри термоелектрики та медичної фізики;
Жукова А.С. - студент коледжу комп'ютерних наук.

- [1] A.F. Ioffe, Semiconductors in modern physics (Moscow, 1954).
- [2] L.I. Anatyshuk, L.N. Vikhor, Computer design of thermoelectric functionally graded materials, Proceedings of the Fourth International Symposium on FGM (Tsukuba, Japan, 1996).
- [3] L.I. Anatyshuk, L.N. Vikhor, R.G. Cherkez, J. of Thermoelectricity 43 (1997).
- [4] D. Astrain, J. G. Vián, M. Domínguez, Applied Thermal Engineering 23(17), 2183 (2003).
- [5] L.E. Bell, Cooling, Science Magazine 321, 1457 (2018).
- [6] L.E. Bell, Use of Thermal Isolation to Improve Thermoelectric System Operating Efficiency, Proceedings of the 21st International Conference on Thermoelectrics (Long Beach, CA, 2002).
- [7] L.E. Bell, Increased Thermoelectric System Thermodynamic Efficiency by Use of Convective Heat Transport, Proceedings of the 21st International Conference on Thermoelectrics (Long Beach, CA, 2002).
- [8] G.K. Kotyrlo, Yu.N. Lobunets, Calculation and design of thermoelectric generators and heat pumps (Naukova Dumka, Kyiv, 1980).
- [9] USSR Certificate of Authorship 144883, Method for improving efficiency of thermoelectric generator (cooler), I.V. Zorin, 24.06.1961.
- [10] USSR Certificate of Authorship 162578, Method for improving efficiency of thermoelectric generator, I.V. Zorin, 02.06.1962.
- [11] Pat. UA 21944, Thermoelement, L.I. Anatyshuk and R.G. Cherkez, 20.09.2006.
- [12] Pat UA 85268, Thermoelectric air conditioner, R.G. Cherkez, 12.01.2009.
- [13] <http://biosystems.okstate.edu/Darcy/DarcyWeisbach/Darcy-WeisbachHistory.htm>.
- [14] L.I. Anatyshuk, Thermoelectricity, V.1. Physics of Thermoelectricity (Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 1998).
- [15] M.P. Malkov, Reference book on physical foundations of cryogenics (Energiya, Moscow, 1985).
- [16] A.M. Arkharov, I.V. Marfenina, E.I. Mikulin, Theory and calculation of cryogenic systems (Mashinostroyeniye, Moscow, 1978).
- [17] L.S. Pontryagin, V.G. Boltyansky, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mischenko, Mathematical theory of optimal processes (Moscow, 1976).
- [18] L.I. Anatyshuk, V.A. Semenyuk, Optimal control over properties of thermoelectric materials and devices (Chernivtsi, Prut, 1992).
- [19] <https://totech.com/wp-content/uploads/2014/08/performance-chart-instructions.pdf>.
- [20] S. Fillin, Termoelectryczne urzadzenia chlodnicze. IPPU MASTA (Gdansk 2002).
- [21] L.P. Bulat, Development of the research project on environmental cooling systems basent on the Peltier effect. Programs and abstracts of the 17 ICT (Nagoya, Japan) P. 87.
- [22] Y. Nakahara, A. Tsustsumi, K. Yoshida, A novel thermally-driven thermoelectric heat pump: Proc. of the XIY ICT – St. (Petersburg, Russia, 1995).
- [23] L.I. Anatyshuk, V.V. Razinkov, Vays of efficiency and reability of thermoelectric modules increased realized in Altec's modules: Proc. of the XYII ICT.

R.G. Cherkez^{1,2}, M.S. Lastivka¹, A.S. Gukova³

Optimization of the Efficiency of Permeable Thermoelectric Elements for Air Conditioner Applicatons

¹Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, radionch@ukr.net

²Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, Ukraine

³The Coledg department of Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

The optimathation of permeable thermoelement for thermoelectric air conditioner unit based is presented. In the thermoelectric air conditioner unit the air flow is cooled due to a combined action of thermoelectric effects and the Joule-Thomson effect. Methods for calculation of temperature distribution, determination of power conversion energy characteristics and thermoelement design in maximum COP mode are discussed. Results of computer studies for the case of thermoelement legs based on Bi₂Te₃ material have shown the possibility of COP increase by a factor of 1.6 - 1.7 as compared to conventional thermoelectric systems.

Keywords: thermoelectricity, thermoelements, bismuth telluride, coefficient of performance, air conditioner.

Термінологія

- d - діаметр каналу (см)
 P_k - периметр каналу (см)
 T_c - холодний температура термоелемента (К)
 x - координата (см)
 S - площа перерізу термоелектричних ніжок з каналами (см²)
 SK - площа перерізу всіх каналів(см²)
 i - щільність електричного струму (А / см²)
 $Я$ - електричний струм (А)
 P - електрична потужність (Вт)
 U - електрична напруга (В)
 Z - показник гідності термоелектрика (К⁻¹)
 P - тиск газу (Па)
 H - Гамільтонова функція
 C_p - теплоємність теплоносія (Джоуль / (кг К))
 V - масова швидкість теплоносія в каналах (кг / (см² с))
 T - температура теплоносія (К)
 t - температура теплоносія (К)
 T_a - температура теплоносія на вході в термоелемент (К)
 v - швидкість теплоносія в каналах (см / с)
 l - висота термоелектричних ніжок (см)
 T_h - гарячий температура термоелемента (К)
 N_k - кількість каналів
 Q - потужність теплового потоку (Вт)
 j - питома щільність електричного струму (А / см)
 q - питомий тепловий потік (Вт / А)
 T - температура ніжок матеріалу (К)
 Pr_c - номер Прандтля для стінки каналу
 Pr_m - число Прандтля для теплоносія
 Re_m - число Рейнольдса для теплоносія

Грецькі символи

- ϵ - коефіцієнт ефективності (ККД) КС
 ψ - компоненти векторної функції імпульсів
 σ - електропровідність матеріалу (1 / (Ом · см))
 ρ - електричний опір матеріалу (Ом · см)
 ξ_d - коефіцієнт тертя
 ρ_g - щільність газу (кг / см³)
 h - коефіцієнт теплообміну (Вт / (см² К))
 ξ - концентрація домішок (см⁻³)
 μ_{JT} - коефіцієнт Джоуля-Томсона (К / Па)
 α - коефіцієнт Зеебека для матеріалу (В / К)
 λ_m - теплопровідність газу (Вт / см.К)
 κ - теплопровідність матеріалу (Вт / см.К)

Підписки

- n - термоелектричний матеріал типу n
 p - термоелектричний матеріал типу p
 h - гарячий
 c - холодний