



Кшавецький О.С.

Чернівецький торговельно-економічний інститут Київського національного торговельно-економічного університету,  
Центральна площа, 7, м. Чернівці, 58002, Україна  
e-mail: kshevos@gmail.com

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТИННОГО ВИПАДКУ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ МІЖ ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ І РУХОМОЮ РЕЧОВИНОЮ, ЧАСТИНА 2

*Теоретично проаналізовані особливості використання компресійних та термоелектричних теплових насосів у частинному випадковій способу тепломасообміну між рухомою речовиною і тепловими насосами, при якому рухома речовина (або принаймні частину цієї рухомої речовини) приводять у тепловий контакт з теплопоглинаючою і тепловиділяючою теплообмінними частинами принаймні двох теплових насосів. Наведені приклади відповідних розрахунків. Описані деякі варіанти відповідних можливих технічних рішень. Бібл. 11, рис. 9, табл. 2.*

**Ключові слова:** тепловий насос, рухома речовина, тепломасообмін, ефективність, енергоефективність, компресійний тепловий насос, термоелектричний тепловий насос, термоелектричний модуль.

### Вступ

Ця робота (частина 2) є продовженням попередньої роботи [1] (частини 1). У цій частині 2 будемо використовувати скорочення та аббревіатури, які були введені в [1], у тому ж значенні, як і в [1]. В [1] були отримані математичні вирази для оцінки ефективності *досліджуваного способу тепломасообміну*. Ці математичні вирази мають загальний характер і в них безпосередньо не враховується специфіка тих чи інших окремих типів ТН. В той же час добре відомо, що різні типи ТН мають різні властивості.

*Метою цієї роботи* є створення теоретичних передумов для наближеної кількісної оцінки ефективності (в першу чергу – енергоефективності) *досліджуваного способу тепломасообміну* з використанням компресійних ТН (КТН) та термоелектричних ТН (ТТН). Для реалізації такої мети *завданням цієї роботи* є аналіз відповідних специфіки КТН та специфіки ТТН. Також *завданням цієї роботи* є аналіз особливостей застосування КТН та ТТН у *досліджуваному способі тепломасообміну* та отримання математичних виразів, які можна було б використати для оцінки ефективності *досліджуваного способу тепломасообміну* з використанням КТН та з використанням ТТН. Також *завданням цієї роботи* є отримати приклади відповідних оціночних розрахунків.

### КТН у досліджуваному способі тепломасообміну

Для КТН в розрахунках у початковому наближенні використовують усереднену величину опалювального коефіцієнта, яка має значення приблизно 0.5 від значення опалювального

коефіцієнта відповідного циклу Карно [2, 3]. Використаємо це тут для відповідних подальших оціночних розрахунків. Прийmemo:

$$\mu_i^{KTH} = B_i^{KTH} \mu_{K,i}, B_i^{KTH} = const = 0.5, \quad (2.1)$$

де  $\mu_i^{KTH}$  – опалювальний коефіцієнт  $i$ -го КТН;  $B_i^{KTH}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність опалювального коефіцієнта  $i$ -го КТН від опалювального коефіцієнта ідеального ТН, який за тих самих умов працює за циклом Карно;  $\mu_{K,i}$  – опалювальний коефіцієнт ідеального ТН, який працює за циклом Карно за тих самих умов що й  $i$ -й КТН.

Розглянемо випадок досліджуваного способу тепломасообміну, в якому: всі ТН – це КТН; РР у її вхідному потоці охолоджують всіма окремо взятими КТН згідно з рис. 2 [1] так, що всі зміни температури РР в результаті її ТК з кожною окремо взятою ТЧ КТН у вхідному потоці цієї РР однакові (допущення 9 [1]). Для цього випадку  $\Delta T_{1,i}^{PP} = \Delta T_{cool,i}^{PP}$ ,  $\Delta T_1^{PP} = \Delta T_{cool}^{PP}$ ,  $\Delta T_{2,i}^{PP} = \Delta T_{hot,i}^{PP}$ ,  $\Delta T_2^{PP} = \Delta T_{hot}^{PP}$ . Для визначення сумарного перепаду температур РР у її вихідному потоці  $\Delta T_2^{PP}$  в такому випадку можна використати вирази (43) [1] і (2.1). В табл. 2.1 наведений приклад результатів відповідних розрахунків.

Таблиця 2.1

Приклад результатів оціночних розрахунків ефективності досліджуваного способу тепломасообміну з використанням КТН для випадку охолодження РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими КТН згідно з допущенням 9 [1] (згідно з рис. 2 [1];  $T_{2,n}^{PP} = T_{1,n}^{PP}$ )

$$B_i^{KTH} = const = 0.5)$$

Загальна кількість ТТН $n$	Вхідна температура РР $T_{1,0}^{PP}$ , К	Сумарний перепад температур РР у її вхідному потоці $\Delta T_1^{PP}$ , К	Сумарний перепад температур РР у її вихідному потоці $\Delta T_2^{PP}$ , К	$\frac{\Delta T_1^{PP}}{\Delta T_2^{PP} - \Delta T_1^{PP}}$
1	303.15	24	29.719	4.1965
2	303.15	24	26.443	9.8241

### ТТН у досліджуваному способі тепломасообміну

ТТН можуть бути виготовлені на основі термоелектричних модулів (ТМ). Холодильний та опалювальний коефіцієнти ТТН можуть бути меншими ніж відповідно холодильний та опалювальний коефіцієнти ТМ, [4 – 6]. Для того, щоб це врахувати прийmemo, що для  $i$ -го ТТН його холодильний коефіцієнт  $\varepsilon_i^{TTH}$  та його опалювальний коефіцієнт  $\mu_i^{TTH}$  визначаються за співвідношеннями:

$$\varepsilon_i^{TTH} = C_i^{TTH} \cdot \varepsilon_i^{TM}, C_i^{TTH} \leq 1; \quad (2.2)$$

$$\mu_i^{TTH} = D_i^{TTH} \cdot \mu_i^{TM}, D_i^{TTH} \leq 1, \quad (2.3)$$

де  $C_i^{TTH}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність холодильного коефіцієнта  $i$ -го ТТН від холодильного коефіцієнта ТМ (на основі якого виготовлений цей ТТН), який працює за тих самих умов, що і цей ТТН;  $D_i^{TTH}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність опалювального коефіцієнта  $i$ -го ТТН від опалювального коефіцієнта ТМ (на основі якого виготовлений цей ТТН), який працює за тих самих умов, що і цей ТТН;  $\varepsilon_i^{TM}$  – холодильний коефіцієнт ТМ (на основі якого виготовлений  $i$ -й ТТН), який працює в тих самих умовах, що й  $i$ -й ТТН;  $\mu_i^{TM}$  – опалювальний коефіцієнт ТМ (на основі якого виготовлений  $i$ -й ТТН), який працює в тих самих умовах, що й  $i$ -й ТТН.

Для досліджуваного способу тепломасообміну може бути бажаною робота ТН при якомога більших значеннях опалювального та холодильного коефіцієнтів. Особливо це може бути актуально для ТТН. Проаналізуємо, при яких режимах роботи ТТН можуть мати порівняно високі значення опалювального та холодильного коефіцієнтів. У ТТН, який виготовлений на основі ТМ суттєву роль відіграє ТМ. У зв'язку з цим проаналізуємо, при яких режимах роботи ТМ (типові ТМ, в яких всі вітки термоелементів електрично з'єднані послідовно, а з точки зору теплових потоків – паралельно; наприклад, ТМ ТЕС1-12706) можуть мати порівняно високі значення опалювального та холодильного коефіцієнтів. Для цього використаємо загально відомі співвідношення для визначення холодильного коефіцієнта ТМ  $\varepsilon^{TM}$  та опалювального коефіцієнта ТМ  $\mu^{TM}$  [4, 7]:

$$\varepsilon^{TM} = \frac{\alpha I T_{cool}^{TM} - \frac{1}{2} I^2 r - k(T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM})}{I^2 r + \alpha(T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM}) I}, \quad (2.4)$$

$$\mu^{TM} = \frac{\alpha I T_{hot}^{TM} + \frac{1}{2} I^2 r - k(T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM})}{I^2 r + \alpha(T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM}) I}, \quad (2.5)$$

де  $\varepsilon^{TM}$  – холодильний коефіцієнт ТМ;  $\alpha$  – диференціальний коефіцієнт Зеєбека матеріалу;  $I$  – сила струму, який протікає через ТМ;  $r$  – загальний електричний опір ТМ;  $k$  – теплопровідність ТМ;  $T_{hot}^{TM}$  – температура тепловиділяючої ТЧ ТМ;  $T_{cool}^{TM}$  – температура теплопоглинаючої ТЧ ТМ;  $\mu^{TM}$  – опалювальний коефіцієнт ТМ.

Позначимо:

$$T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM} = \Delta T^{TM}. \quad (2.6)$$

На основі виразів (2.4) і (2.6) отримаємо:

$$\Delta T^{TM} = \frac{\alpha I T_{cool}^{TM} - I^2 r \left( \varepsilon^{TM} + \frac{1}{2} \right)}{\varepsilon^{TM} \alpha I + k}. \quad (2.7)$$

На основі виразів (2.5) і (2.6) отримаємо:

$$\Delta T^{TM} = \frac{\alpha I T_{hot}^{TM} + I^2 r \left( \frac{1}{2} - \mu^{TM} \right)}{\mu^{TM} \alpha I + k}. \quad (2.8)$$

З використанням виразу (2.7) можна отримати графіки залежності  $\Delta T^{TM}$  від  $I$  для фіксованих значень  $\varepsilon^{TM}$ . Приклад таких графіків наведений на рис. 2.1. З наведених графіків видно, наприклад, що відповідний ТМ може мати значення холодильного коефіцієнту більші 10 ( $\varepsilon^{TM} > 10$ ) тільки при достатньо малих значеннях різниці температур  $\Delta T^{TM}$  і сили струму  $I$  (відповідні точки на площині графіків обмежені кривою для  $\varepsilon^{TM} = 10$  і знаходяться нижче цієї кривої).

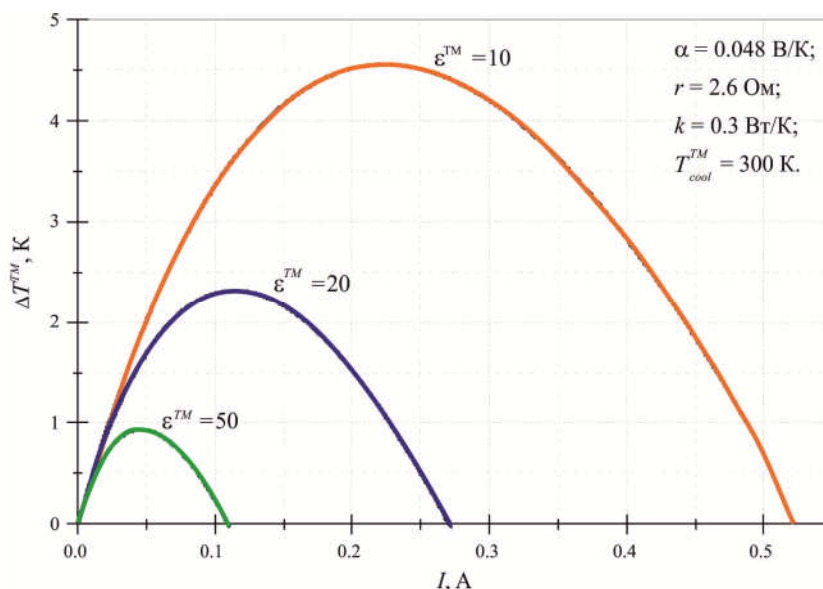


Рис. 2.1. Теоретичні залежності різниці температур  $\Delta T^{TM}$  від сили струму  $I$  при / фіксованих значеннях холодильного коефіцієнту  $\varepsilon^{TM}$  для ТМ, який працює при  $T_{cool}^{TM} = 300 \text{ K}$  і має наступні параметри:  $\alpha = 0.048 \text{ В/К}$ ;  $r = 2.6 \text{ Ом}$ ;  $k = 0.3 \text{ Вт/К}$ .

Подібні графіки можна отримати і для фіксованих значень опалювального коефіцієнту з використанням виразу (2.8).

### Випадок використання ТТН на основі ТМ в режимах максимальної енергоефективності

Допустимо, що всі ТТН, які використовуються у досліджуваному способі тепломасообміну, виготовлені на основі типових ТМ (на основі типових термоелементів). І ці ТМ працюють в режимах максимальної енергоефективності. Для оцінки ефективності досліджуваного способу тепломасообміну для такого випадку використаємо загальновідомий вираз для визначення холодильного коефіцієнту термоелемента, який працює в режимі максимальної енергоефективності [8]:

$$\varepsilon_{\max}^{TM} = \frac{\sqrt{1 + 0.5Z(T_{hot}^{TM} + T_{cool}^{TM})} - T_{hot}^{TM} / T_{cool}^{TM}}{\sqrt{1 + 0.5Z(T_{hot}^{TM} + T_{cool}^{TM})} + 1} \cdot \frac{T_{cool}^{TM}}{T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM}}, \quad (2.9)$$

де  $\varepsilon_{\max}^{TM}$  – холодильний коефіцієнт ТМ, який працює в режимі максимальної енергоефективності;  $Z$  – термоелектрична добротність матеріалу ТМ;  $T_{hot}^{TM}$  – температура тепловідляючої ТЧ ТМ;  $T_{cool}^{TM}$  – температура теплопоглинаючої ТЧ ТМ.

Позначимо:

$$\frac{\sqrt{1+0.5Z(T_{hot}^{TM} + T_{cool}^{TM})} - T_{hot}^{TM} / T_{cool}^{TM}}{\sqrt{1+0.5Z(T_{hot}^{TM} + T_{cool}^{TM})} + 1} = A_{max}^{TM}, \quad (2.10)$$

де  $A_{max}^{TM}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність холодильного коефіцієнту ТМ (який працює в режимі максимальної енергоефективності) від холодильного коефіцієнту ідеального ТН, який працює за циклом Карно в тих самих умовах, що й ТМ.

Допустимо, що

$$A_{max}^{TTH} = C^{TTH} A_{max}^{TM}, \quad C^{TTH} \leq 1, \quad \text{за умови, що } T_{cool}^{TTH} = T_{cool}^{TM} \text{ і } T_{hot}^{TTH} = T_{hot}^{TM}, \quad (2.11)$$

де  $A_{max}^{TTH}$  – безрозмірний множник (який загально введений в [1]), який враховує відмінність холодильного коефіцієнту ТТН на основі ТМ (який працює в режимі максимальної енергоефективності) від холодильного коефіцієнту ідеального ТН, який працює за циклом Карно в тих самих умовах, що й ТТН;  $C^{TTH}$  – безрозмірний множник, який враховує можливу відмінність холодильного коефіцієнта ТТН від холодильного коефіцієнта ТМ (на основі якого виготовлений цей ТТН), який працює за тих самих умов, що й ТТН;  $A_{max}^{TM}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність холодильного коефіцієнту ТМ (який працює в режимі максимальної енергоефективності і є основою ТТН) від холодильного коефіцієнту ідеального ТН, який працює за циклом Карно в тих самих умовах, що й ТМ;  $T_{cool}^{TTH}$  – температура теплопоглинаючої ТЧ ТТН;  $T_{hot}^{TTH}$  – температура тепловиділяючої ТЧ ТТН.

Для фіксованого значення термоелектричної добротності  $Z$  значення  $A_{max}^{TM}$  залежить від температур  $T_{hot}^{TM}$  та  $T_{cool}^{TM}$ .

З використанням виразів (2.10) і (2.11) можна отримати графіки залежностей значень  $A_{max}^{TM}$  від температури  $T_{cool}^{TM}$  (зокрема, при фіксованому значенні  $T_{hot}^{TM}$ ) та  $A_{max}^{TTH}$  від температури  $T_{cool}^{TTH}$  (зокрема, при фіксованому значенні  $T_{hot}^{TTH}$ ). Приклад таких графіків наведений на рис. 2.2.

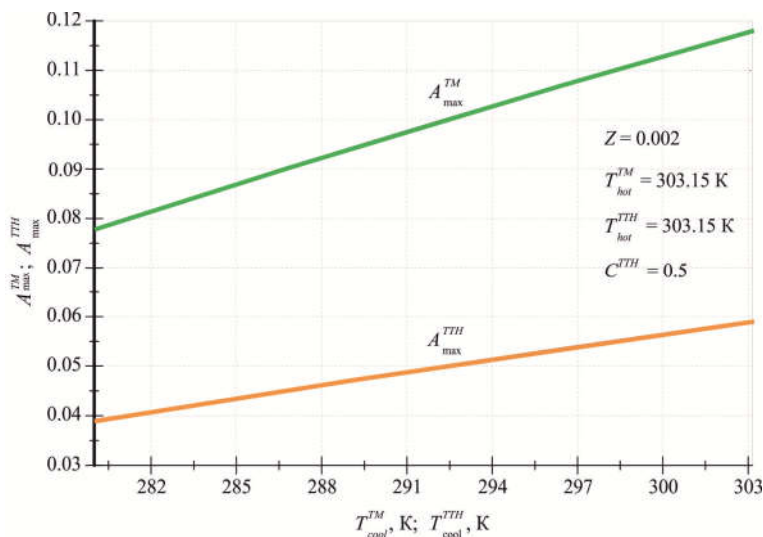


Рис. 2.2. Графіки залежностей значень  $A_{max}^{TM}$  від температури  $T_{cool}^{TTH}$  для випадку, коли  $Z = 0.002$ ,  $T_{hot}^{TM} = 303.15$  К та  $A_{max}^{TTH}$  від температури  $T_{cool}^{TTH}$  для випадку, коли  $Z = 0.002$ ,  $T_{hot}^{TTH} = 303.15$  К і  $C^{TTH} = const = 0.5$  (графіки отримані на основі виразів (2.10) і (2.11)).

У зв'язку із наведеною тут інформацією стосовно значень  $A_{\max}^{TM}$  та  $A_{\max}^{TMM}$  на основі виразів (2), (4), (7), (8) [1], (2.2), (2.9), (2.10), (2.11) отримаємо наступне рівняння для визначення температурного режиму роботи  $i$ -го ТТН на основі ТМ, який працює в режимі максимальної енергоефективності:

$$\frac{\Delta T_{cool,i}^{PP}}{\Delta T_{hot,i}^{PP} - \Delta T_{cool,i}^{PP}} = C_i^{TTH} \frac{\sqrt{1+0.5Z_i(T_{hot,i}^{TTH} + T_{cool,i}^{TTH})} - T_{hot,i}^{TTH} / T_{cool,i}^{TTH}}{\sqrt{1+0.5Z_i(T_{hot,i}^{TTH} + T_{cool,i}^{TTH})} + 1} \frac{T_{cool,i}^{TTH}}{T_{hot,i}^{TTH} - T_{cool,i}^{TTH}}, \quad (2.12)$$

де  $\Delta T_{cool,i}^{PP}$  – зміна температури РР внаслідок її ТК з теплопоглинаючою ТЧ  $i$ -го ТТН;  $\Delta T_{hot,i}^{PP}$  – зміна температури РР внаслідок її ТК з тепловиділяючою ТЧ  $i$ -го ТТН;  $Z_i$  – термоелектрична добротність матеріалу  $i$ -го ТМ (який є основою  $i$ -го ТТН);  $T_{hot,i}^{TTH}$  – температура тепловиділяючої ТЧ  $i$ -го ТТН;  $T_{cool,i}^{TTH}$  – температура теплопоглинаючої ТЧ  $i$ -го ТТН.

Такі рівняння можна розв'язувати числовими методами.

Розглянемо випадок *досліджуваного способу тепломасообміну*, в якому: всі ТН – це ТТН, у кожного з яких ТМ (який є основою відповідного ТТН) працює в режимі максимальної енергоефективності; РР у її вхідному потоці охолоджують всіма окремо взятими ТТН згідно з рис. 2 [1] та допущенням 9 [1]. В табл. 2.2 наведений приклад результатів розрахунків для оцінки ефективності цього випадку *досліджуваного способу тепломасообміну* з використанням розв'язування відповідних рівнянь (2.12) числовими методами.

Таблиця 2.2

*Приклад результатів оціночних розрахунків ефективності досліджуваного способу тепломасообміну з використанням ТТН для випадку охолодження РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН згідно з рис. 2 [1] та допущенням 9 [1]*  
 $T_{2,n}^{PP} = T_{1,n}^{PP}$  (з використанням рівняння (2.12);  $C_i^{TTH} = const = 0.5$ ;  $Z_i = const = 0.002$ )

Загальна кількість ТТН $n$	Вхідна температура РР $T_{1,0}^{PP}$ , К	Сумарний перепад температур РР у її вхідному потоці $\Delta T_1^{PP}$ , К	Сумарний перепад температур РР у її вихідному потоці $\Delta T_2^{PP}$ , К	$\frac{\Delta T_1^{PP}}{\Delta T_2^{PP} - \Delta T_1^{PP}}$
1	303.15	2	2.2628	7.6092
2	303.15	2	2.1249	16.016
16	303.15	24	29.926	4.0502
17	303.15	24	29.502	4.3618

### Деякі можливі варіанти технічної реалізації досліджуваного способу тепломасообміну

Технічна реалізація *досліджуваного способу тепломасообміну* з використанням декількох ТТН може бути дещо ускладненою, особливо при великій кількості ТТН. Вирішення цього питання може бути пов'язане із розробкою та створенням спеціалізованих ТМ. Наприклад, такі ТМ можуть містити принаймні один термоелемент, який відокремлений (тим чи іншим способом) з точки зору можливих теплових потоків (в тепловому відношенні) від

принаймні одного іншого термоелемента цього ж ТМ. Це, відповідно до допущення 1 [1], дасть можливість термоелементам ТМ працювати у відокремлених з точки зору можливих теплових потоків теплових режимах. Відповідні ТТН на основі таких термоелементів ТМ (які відокремлені з точки зору можливих теплових потоків один відносно одного) при цьому можна розглядати як окремі ТТН. ТН у досліджуваному способі тепломасообміну працюють в різних теплових умовах. У зв'язку з цим може бути доцільним, щоб відповідні спеціалізовані ТМ містили термоелементи або групи термоелементів з різними властивостями. Також може бути доцільним, щоб ТМ були виконані з можливістю окремого електричного підключення їх частин до електричних кіл (наприклад, для підключення окремих термоелементів або груп термоелементів до електричних кіл можуть використовуватися відповідні дротові виводи або клеми).

На рис. 2.3 наведена спрощена схема прикладу такого спеціалізованого ТМ, який можна розглядати як модифікований типовий ТМ (наприклад, TEC1-12706). Цей спеціалізований ТМ (рис. 2.3) містить 16 частин на основі груп термоелементів з теплопровідними електроізоляційними видовженими пластинами (наприклад, керамічними) 1, які відокремлені з точки зору можливих теплових потоків (в тепловому відношенні) одна відносно одної з використанням 15-ти шарів теплоізоляції 2. Частини цього спеціалізованого ТМ 1 мають різні властивості, що на рис. 2.3 умовно відображено різними відтінками сірого кольору. З точки зору електричних з'єднань цей спеціалізований модуль має 8 частин, від яких є 9 електричних дротових виводів 3 для підключення цих частин до електричних кіл. На рис. 2.3 також умовно відображені РР та її можливий напрям руху 4. Спеціалізований ТМ (рис. 2.3) відрізняється від типового ТМ, зокрема, тим, що його термоелементи поєднані в єдину конструкцію не двома теплопровідними електроізоляційними керамічними пластинами квадратної форми (як у типового ТМ), а 32-ма видовженими теплопровідними електроізоляційними пластинами (по 16 шт. з кожної сторони модуля) та шарами теплоізоляції (наприклад, на основі спіненого теплоізоляційного матеріалу). Для використання спеціалізованого ТМ (рис. 2.3) у досліджуваному способі тепломасообміну може знадобитися встановлення окремих додаткових теплообмінників (радіаторів) на цей модуль. Це показано на рис. 2.4 (на рис. 2.4 також умовно відображені РР та її можливий напрям руху). Також цей спеціалізований ТМ може використовуватися і без таких теплообмінників (наприклад, при безпосередньому тепловому контакті РР (наприклад, води) з 32-ма видовженими теплопровідними електроізоляційними пластинами).

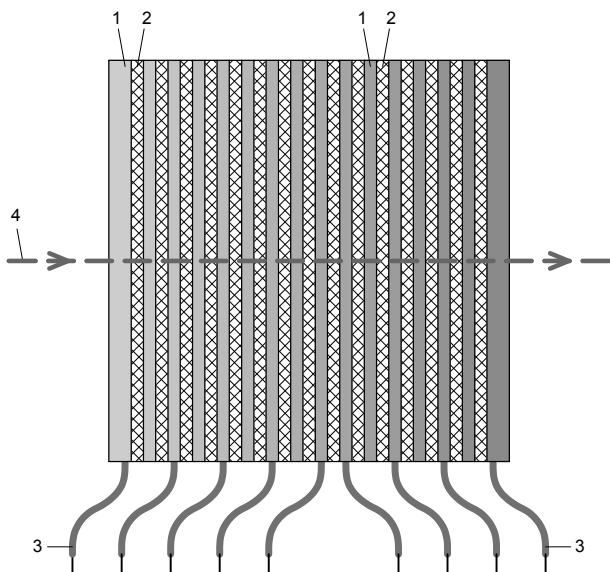


Рис. 2.3. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ (модифікованого типового ТМ), який містить 16 частин з різними властивостями на основі груп термоелементів з теплопровідними електроізоляційними видовженими пластинами, які відокремлені з точки зору можливих теплових потоків одна відносно одної. 1 – частини спеціалізованого ТМ на основі груп термоелементів з теплопровідними електроізоляційними видовженими пластинами; 2 – теплоізоляційні шари; 3 – електричні виводи; 4 – РР та її можливий напрям руху.

Зокрема, для зменшення термічних опорів між термоелементами ТМ і РР у досліджуваному способі тепломасообміну (а також і в деяких інших застосуваннях) можуть застосовуватися такі спеціалізовані ТМ, вітки термоелементів яких електрично з'єднані теплообмінниками (наприклад, мідними), які мають ТК з РР. Через теплообмінники може здійснюватися підключення спеціалізованого ТМ до електричного кола. При потребі теплообмінники можуть мати захист від корозії (зокрема, зумовлений контактом з РР) та/або електроізоляцію. Приклад такого можливого спеціалізованого ТМ представлений на рис. 2.5. Крім іншого цей спеціалізований ТМ має теплоізоляцію від навколишнього середовища. Зокрема, з використанням теплоізоляції у цьому спеціалізованому ТМ реалізовані два канали для руху РР.

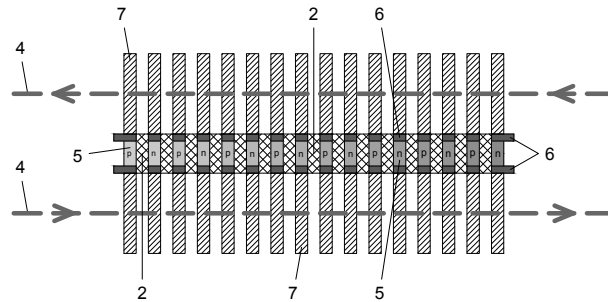


Рис. 2.4. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ (представленого на рис. 2.3), з встановленими на нього 32-ма окремими теплообмінниками (радіаторами). 2 – теплоізоляційні шари; 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів; 6 – теплопровідні електроізоляційні видовжені пластини (поперечний вигляд); 7 – теплообмінники (радіатори), які встановлені на пластини 6.

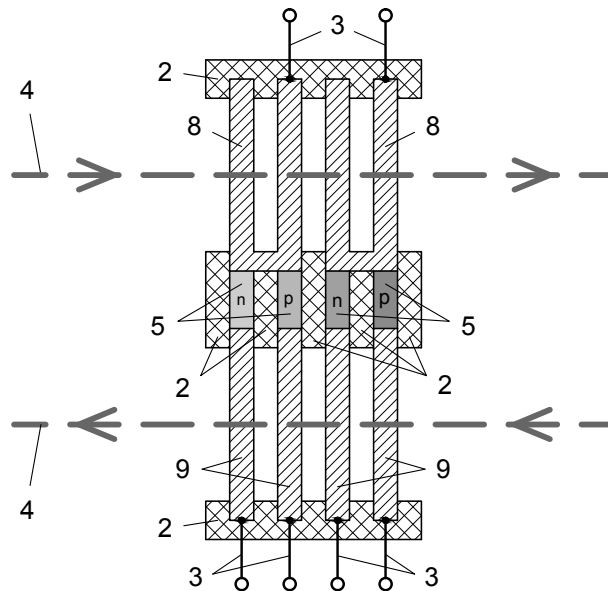


Рис. 2.5. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ з використанням теплообмінників для електричних з'єднань, теплоізоляцією від навколишнього середовища та каналами для руху РР. 2 – теплоізоляція; 3 – елементи для підключення до електричних кіл (наприклад, дротові виводи або клемми); 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів; 8 – теплообмінники (радіатори), зокрема, через які здійснюється електричне з'єднання віток термоелементів та підключення цих віток до електричних кіл; 9 – теплообмінники (радіатори), зокрема, через які здійснюється підключення віток термоелементів 5 до електричних кіл.



До деякої міри підвищити ефективність використання типових ТМ у досліджуваному способі тепломасообміну (а також і в деяких інших застосуваннях, наприклад, в таких застосуваннях, в яких термоелементи типового ТМ працюють в різних умовах) можна, у порівнянні з тим випадком, коли на кожній окремо взятій ТЧ ТМ (керамічній пластині) встановлений один теплообмінник – радіатор (як показано на рис. 2.6), якщо на хоча б одну окремо взятую ТЧ ТМ (на теплопровідну керамічну платину типового ТМ) встановити не один, а декілька окремих теплообмінників (радіаторів). Приклад цього представлений на рис. 2.7.

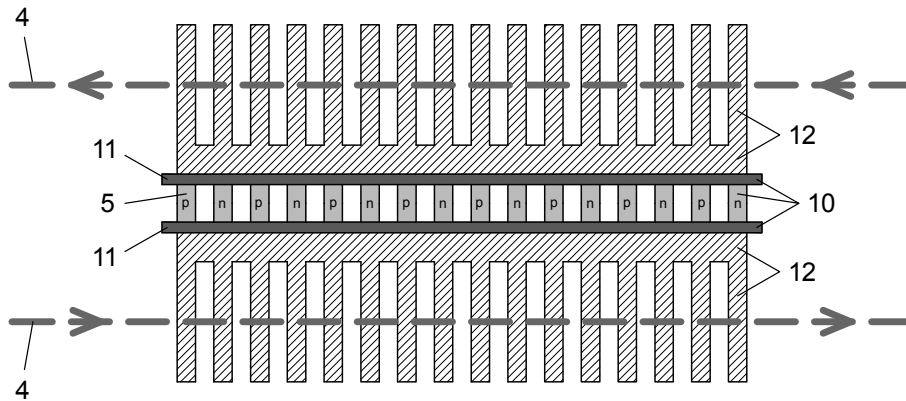


Рис. 2.6. Спрощена схема типового ТМ з встановленими на кожну з його протилежних ТЧ (теплопровідних керамічних пластин) тільки по одному теплообміннику. 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів типового ТМ; 10 – типовий ТМ; 11 – теплопровідні керамічні пластини типового ТМ; 12 – теплообмінники (радіатори), які є загальними для всіх термоелементів типового ТМ.

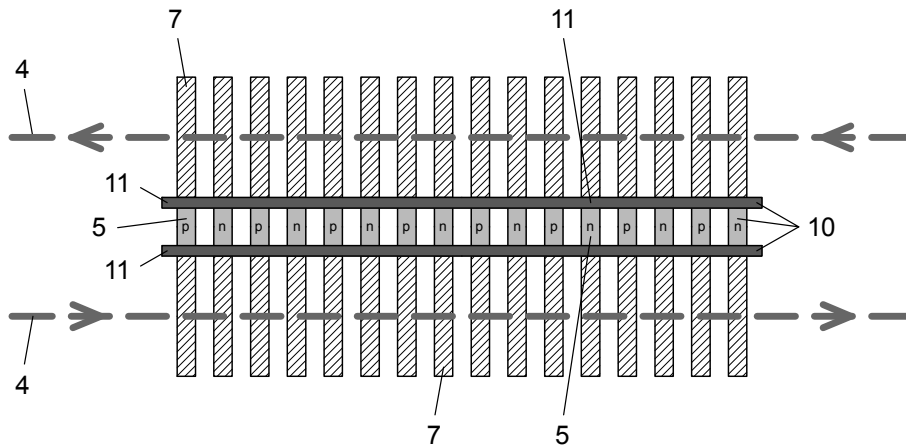


Рис. 2.7. Спрощена схема типового ТМ 10 з встановленими на нього 32-ма теплообмінниками (радіаторами) 7 (по 16 шт. з кожної сторони типового ТМ), які є до якоїсь міри окремими для відповідних 16-ти частин цього типового ТМ (ці частини деякою мірою поєднані з точки зору можливих теплових потоків 2-ма теплопровідними електроізоляційними керамічними пластинами 11). 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів.

Також у досліджуваному способі тепломасообміну можуть застосовуватися такі спеціалізовані ТМ, які також можна розглядати як модифіковані типові ТМ, термоелементи яких подібно до конструкції типових ТМ з протилежних сторін поєднані двома

теплопровідними пластинами (мають конструкцію подібну до конструкції типових ТМ), але відрізняються від типових ТМ тим, що містять частини (на основі принаймні одного термоелемента) з різними властивостями та/або виконані з можливістю окремого електричного підключення їх частин до електричних кіл. Спрощені схеми прикладів таких спеціалізованих ТМ представлені на рис. 2.8 та на рис. 2.9. На рис. 2.8 представлена спрощена схема прикладу спеціалізованого ТМ з встановленими на нього додатковими окремими теплообмінниками. У цьому прикладі термоелементи мають різні властивості, що умовно на рис. 2.8 відображено різними відтінками сірого кольору. На рис. 2.9 представлена спрощена схема прикладу спеціалізованого ТМ, який має 9 електричних дровових виводів для підключення частин цього спеціалізованого ТМ до електричних кіл.

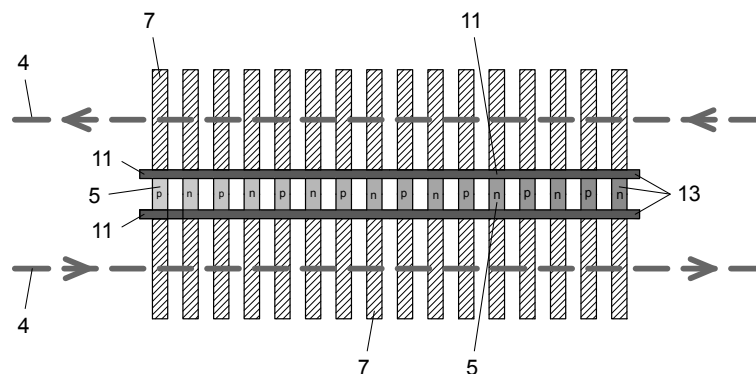


Рис. 2.8. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ (модифікованого типового ТМ), який містить 16 частин на основі термоелементів, які мають різні властивості. 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів, які мають різні властивості; 7 – окремі теплообмінники (радіатори); 11 – теплопровідні електроізоляційні пластини; 13 – спеціалізований ТМ.

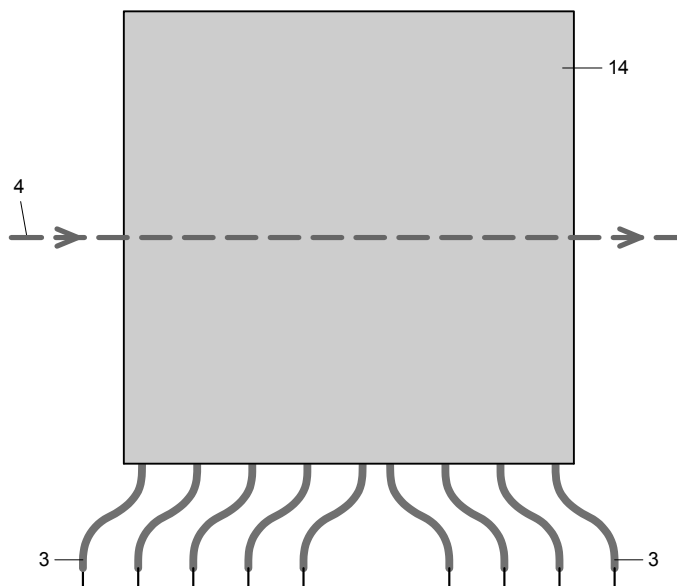


Рис. 2.9. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ (модифікованого типового ТМ), який містить 9 електричних виводів. 3 – електричні виводи; 4 – РР та її можливий напрям руху; 14 – частина ТМ на основі термоелементів, які з протилежних сторін поєднані двома теплопровідними пластинами.

Можливі також інші спеціалізовані ТМ для досліджуваного способу тепломасообміну, які можуть мати ознаки описаних вище спеціалізованих ТМ у різних комбінаціях. Описані вище спеціалізовані ТМ крім використання у досліджуваному способі тепломасообміну можуть мати інші застосування (призначення). Подібні до описаних вище або принципово їм аналогічні технічні рішення можливі і при використанні інших типів ТН з модульною конструкцією.

## Висновок

Наведені в цій роботі приклади оціночних розрахунків для випадків використання КТН та ТТН у досліджуваному способі тепломасообміну підтверджують принципову можливість підвищення енергоефективності відповідних процесів завдяки збільшенню кількості застосовуваних при цьому ТН [1, 9 – 11].

Описані деякі можливі варіанти технічної реалізації досліджуваного способу тепломасообміну.

В той же час для прийняття рішень стосовно практичних застосувань досліджуваного способу тепломасообміну можуть знадобитися подальші теоретичні та/або експериментальні дослідження.

## Література

1. Кшавецький О.С. Оцінка ефективності частинного випадку процесів тепломасообміну між тепловими насосами і рухомою речовиною, частина 1. *Термоелектрика*. 2017. №6. С.41–56.
2. Bonin J. *Heat Pump Planning Handbook*. London and New York, Routledge, 2015. 326 p.
3. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О. Аналіз енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння. *Промышленная теплотехника*. 2017. Том 39, №3. С.47–52.
4. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Порівняльний аналіз термоелектричних та компресійних теплових насосів для індивідуальних кондиціонерів. *Термоелектрика*. 2016. №2. С.33–42.
5. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про вплив якості теплообмінників на властивості термоелектричних теплових насосів рідина-рідина. *Термоелектрика*. 2017. №5. С.59–64.
6. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про холодильний коефіцієнт термоелектричних теплових насосів рідина-рідина з врахуванням енергії на переміщення теплоносія. *Термоелектрика*. 2017. №6. С.34–40.
7. Иоффе А.Ф. *Полупроводниковые термоэлементы*. М. – Л., Издательство АН СССР, 1960. 188 с.
8. Anatyshuk L.I. *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Chernivtsi, Institute of Thermoelectricity, 2005. 348 p.
9. Кшавецький О. С. Оцінка енергоефективності способу тепломасообміну між рухомою речовиною і тепловими насосами. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції “Інноваційні технології в готельно-ресторанному бізнесі” (22–23 березня 2017, м. Київ), Київ, НУХТ, 2017. С.172–174.
10. Кшавецький О. С. Про можливість підвищення енергоефективності процесів тепломасообміну, які передбачають нагрівання та охолодження рухомої речовини. *Chemical Technology and Engineering (Хімічна технологія та інженерія): збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (26–30 червня 2017, м. Львів), Львів, Видавництво Львівської політехніки, 2017. С.96–97.*

11. Кшавецький О. С., Штангеева Н. І. *Про можливість використання декількох теплових насосів для підвищення енергоефективності деяких процесів тепломасообміну. Тези доповідей Х-ї Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (23–26 травня 2017 м. Київ, Україна), Промышленная теплотехника. 2017. Том 39, №7. С.79–80.*

Надійшла до редакції 15.05.2018

**Кшавецький О.С.** канд. физ.-мат наук, доцент

Черновицкий торгово-экономический институт  
Киевского национального торгово-экономического университета,  
Центральная площадь, 7, г. Чернівці, 58002, Украина  
*e-mail: kshevov@gmail.com*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАСООБМЕНА МЕЖДУ ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ И ПОДВИЖНЫМ ВЕЩЕСТВОМ, ЧАСТЬ 2

*Теоретически проанализированы особенности использования компрессионных и термоэлектрических тепловых насосов в частном случае способа тепломассообмена между движущимся веществом и тепловыми насосами, при котором движущееся вещество (или хотя бы часть этого движущегося вещества) приводят в тепловой контакт с теплопоглощающей и тепловыделяющей теплообменными частями по крайней мере двух тепловых насосов. Приведены примеры соответствующих расчетов. Описаны некоторые варианты возможных технических решений. Библ. 11, рис. 9, табл. 2.*

**Ключевые слова:** тепловой насос, движущееся вещество, тепломассообмен, эффективность, энергоэффективность, компрессионный тепловой насос, термоэлектрический тепловой насос, термоэлектрический модуль.

**O.S. Kshevetsky** PhD in Physics and Mathematics, assistant professor

Chernivtsi Institute of Trade and Economics of Kyiv National  
University of Trade and Economics, 7, Tsentralna Square, Chernivtsi,  
58002, Ukraine, *e-mail: kshevov@gmail.com*

## ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF PARTIAL CASE OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES BETWEEN HEAT PUMPS AND MOVING SUBSTANCE, PART 2

*Theoretical analysis is made of the peculiarities of using compression and thermoelectric heat pumps in the partial case of heat and mass transfer between moving substance and heat pumps, whereby moving substance (or at least part of this moving substance) is brought into thermal contact with the heat absorbing and heat releasing heat-exchange parts of at least two heat*

pumps. Examples of corresponding calculations are given. Some variants of respective possible technical solutions are described. *Bsbl. 11, Fig. 9, tabl. 2.*

**Key words:** heat pump, moving substance, heat and mass transfer, efficiency, energy efficiency, compression heat pump, thermoelectric heat pump, thermoelectric module.

## References

1. Kshevetsky O.S. (2017). Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 1. *J. Thermoelectricity*, 6, 41–56.
2. Bonin J. (2015). *Heat Pump Planning Handbook*. London and New York: Routledge.
3. Snezhkin Yu.F., Chalaiev D.M., Dabizha N.O. (2017). Analiz energetychnykh pokaznykiv protsesu teplonasosnoho sushinnia [Analysis of energy performance of heat pump drying]. *Promyshlennaia teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 39, 47–52 [in Ukrainian].
4. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners. *J. Thermoelectricity*, 2, 33–42.
5. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). The influence of quality of heat exchangers on the properties of thermoelectric liquid-liquid heat pumps. *J. Thermoelectricity*, 5, 59–64.
6. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). On the coefficient of performance of thermoelectric liquid-liquid heat pumps with regard to energy loss for heat carrier transfer. *J. Thermoelectricity*, 6, 34–40.
7. Ioffe A.F. (1960). *Semiconductor Thermoelements*. Moscow- Leningrad: USSR Academy of Sciences.
8. Anatyshuk L.I. (2005). *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.
9. Kshevetsky O.S. (2017). Otsinka energoefektyvnosti sposobu teplomasoobminu mizh rukhomoiu rehovynoiu i tepolvymy nasosamy [Estimation of energy efficiency of a method for heat and mass transfer between moving substance and heat pumps]. *Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Innovatsiini tekhnologii v hotelno-restorannomu biznesi” – Proc. of All-Ukrainian scientific and practical conference “Innovation technologies in hotel and restaurant business”* (Ukraine, Kyiv, March 22–23). Kyiv: NUFT [in Ukrainian].
10. Kshevetsky O.S. (2017). Pro mozhlyvist pidvyshchennia enerhoefektyvnosti procesiv teplomasoobminu, yaki peredbachaiut nahrivannia ta okholodzhennia rukhomoi rehovyny [On the possibility of increasing the energy efficiency of heat and mass transfer processes which involve heating and cooling of moving substance]. *Khimichna tekhnologiiia ta inzheneriia: zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - Chemical Technology and Engineering: collection of abstracts of International scientific and practical conference* (Ukraine, Lviv, June 26–30, 2017). Lviv: Lvivska Politekhnikha [in Ukrainian].
11. Kshevetsky O.S., Shtangeieva N.I. (2017). Pro mozhlyvist vykorystannia dekilkokh teplovykh nasosiv dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti deiakykh procesiv teplomasoobminu [On the possibility of using several heat pumps for increasing energy efficiency of some heat and mass transfer processes]. Tezy dopovidei X Mizhnarodnoi konferentsii “Problemy teplofizyky ta teploenerhetyky” – Abstracts of X International conference “Problems of thermophysics and heat power engineering” (Ukraine, Kyiv, May 23–26, 2017). *Promyshlennaia teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 39(7), 79–80 [in Ukrainian].

Submitted 15.05.2018