

УДК 621.1



Кшевецький О.С.

Кшевецький О.С. канд. фіз.-мат. наук, доцент  
Орлецький О.В.



Орлецький О.В.

Чернівецький національний університет імені Юрія  
Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна  
e-mail: kshevovs@gmail.com

---

### ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТИННОГО ВИПАДКУ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ МІЖ ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ І РУХОМОЮ РЕЧОВИНОЮ, ЧАСТЬ 3

---

*Представлена теоретична модель для оцінки ефективності роботи частинного випадку процесів тепломасообміну між рухомою речовиною і термоелектричними тепловими насосами з їх теплообмінними частинами, при якому рухому речовину (або принаймні частину цієї рухомої речовини) приводять у тепловий контакт з теплопоглинальною і тепловиділяючою теплообмінними частинами принаймні двох термоелектричних теплових насосів, які можуть працювати в режимах, які можуть відрізнятися від режиму максимальної енергоефективності, зокрема, з врахуванням кількостей матеріалів, що необхідні для виготовлення цих термоелектричних теплових насосів. Наведені результати відповідної теоретичної оцінки. Бібл. 9, табл. 1, рис. 2.*

**Ключові слова:** тепловий насос, рухома речовина, тепломасообмін, ефективність, енергоефективність, термоелектричний тепловий насос, термоелементи, термоелектричний матеріал.

#### Вступ

Ця робота (частина 3) є продовженням попередніх робіт [1, 2] (частини 1 та частини 2). У цій частині 3 будемо використовувати скорочення та аббревіатури, які були введені в [1, 2], у тому ж значенні, як і в [1, 2]. Будемо використовувати також словосполучення *досліджуваний процес* для того, щоб вказати на процес, який відповідає *досліджуваному способу тепломасообміну* [1–5]. В роботах [1, 2] були отримані математичні вирази для оцінки ефективності *досліджуваного способу тепломасообміну* та наведені приклади відповідних розрахунків, зокрема, для випадку використання при цьому ТТН, які працюють в режимах максимальної енергоефективності. За даними цих розрахунків існує можливість підвищення енергоефективності *досліджуваного способу тепломасообміну* завдяки збільшенню кількості ТН, які при цьому використовуються. В той же час в [1, 2] не розглядалися деталі того, як саме змінюється кількість матеріалів, з яких виготовлені ТН, при зміні кількості ТН.

*Метою цієї роботи є створення теоретичних передумов для наближеної кількісної оцінки ефективності (в першу чергу – енергоефективності) досліджуваного способу тепломасообміну з використанням ТТН, які можуть працювати в режимах, які можуть відрізнятися від режиму максимальної енергоефективності, зокрема, з врахуванням кількості матеріалів, з яких*

виготовлені ці ТТН. Для реалізації такої мети завданнями цієї роботи є створення відповідної оціночної моделі, отримання математичних виразів для оціночних розрахунків та отримання прикладів відповідних розрахунків.

### Опис оціночної моделі

Розглянемо наступний приклад досліджуваних процесів. Розглянемо процеси за участю РР і принаймні одного ТТН (всі ТН, які використовуються у цих процесах – це ТТН на основі термоелементів), в яких згідно з рис. 2 [1] РР у її вхідному потоці охолоджують всіма окремо взятими ТТН. Нехай корисною дією цих процесів є підтримання різниці температур РР у її вхідному потоці між положеннями 1.0 та 1.n згідно з рис. 2 [1] (для деякої температури РР на вході у положенні 1.0). Ця корисна дія при цьому здійснюється завдяки сумарній споживаній електричній потужності всіма ТТН  $W^{TTH}$  (а більш безпосередньо завдяки сумарній холодопродуктивності всіх ТТН  $Q_{cool}^{TTH}$ ). У цій роботі (частині 3) витрати енергії на створення потоку РР [6] враховувати не будемо.

Розглянемо окремо взятий  $i$ -й ТТН.

Використаємо загально відоме співвідношення для визначення холодильного коефіцієнта термоелементів  $i$ -го ТТН  $\varepsilon_i^{TE}$  [7, 8]:

$$\varepsilon_i^{TE} = \frac{Q_{cool,i}^{TE}}{W_i^{TE}}, \quad (3.1)$$

де

$$Q_{cool,i}^{TE} = \alpha_i I_i T_{cool,i}^{TE} - \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}); \quad (3.2)$$

$$W_i^{TE} = I_i^2 r_i + \alpha_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) I_i; \quad (3.3)$$

$Q_{cool,i}^{TE}$  – загальна (сумарна) холодопродуктивність термоелементів  $i$ -го ТТН;  $W_i^{TE}$  – загальна (сумарна) електрична потужність, яку споживають термоелементи  $i$ -го ТТН;  $\alpha_i$  – загальний (сумарний) диференціальний коефіцієнт Зеєбека матеріалу термоелементів  $i$ -го ТТН;  $I_i$  – сила струму, який протікає через термоелементи  $i$ -го ТТН;  $r_i$  – загальний (сумарний) електричний опір термоелементів  $i$ -го ТТН;  $k_i$  – загальна (сумарна) теплопровідність термоелементів  $i$ -го ТТН;  $T_{hot,i}^{TE}$  – температура тепловиділяючих спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН;  $T_{cool,i}^{TE}$  – температура теплопоглинальних спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН.

Холодильний коефіцієнт  $i$ -го ТТН, який працює у досліджуваному процесі згідно з рис. 2 [1] та з врахуванням припущення 6 [1] ( $d = const$ )  $\varepsilon_i^{TTH}$ :

$$\varepsilon_i^{TTH} = \frac{Q_{cool,i}^{TTH}}{W_i^{TTH}} = \frac{T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{PP}}{(T_{hot,(i-1)}^{PP} - T_{hot,i}^{PP}) - (T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{PP})}, \quad (3.4)$$

де  $Q_{cool,i}^{TTH}$  – холодопродуктивність  $i$ -го ТТН;  $W_i^{TTH}$  – потужність, яку споживає  $i$ -й ТТН;  $T_{hot,i}^{PP}$  – температура РР безпосередньо перед її ТК з тепловиділяючою ТЧ  $i$ -го ТТН;  $T_{hot,(i-1)}^{PP}$  – температура РР одразу ж після її ТК з тепловиділяючою ТЧ  $i$ -го ТТН;  $T_{cool,i}^{PP}$  – температура РР одразу ж після її ТК з теплопоглинальною ТЧ  $i$ -го ТТН;  $T_{cool,(i-1)}^{PP}$  – температура РР безпосередньо перед її ТК з теплопоглинальною ТЧ  $i$ -го ТТН.

Нехай  $Q_{cool,i}^{TTH} = Q_{cool,i}^{TE}$  і  $W_i^{TTH} = W_i^{TE}$ . Тоді на основі виразів (3.1) і (3.4) можна записати:

$$\varepsilon_i^{TE} = \varepsilon_i^{TTH}, \quad (3.5)$$

$$\frac{T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{PP}}{(T_{hot,(i-1)}^{PP} - T_{hot,i}^{PP}) - (T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{PP})} = \frac{\alpha_i I_i T_{cool,i}^{TE} - \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE})}{I_i^2 r_i + \alpha_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) I_i}. \quad (3.6)$$

Будемо вважати, що передача тепла від РР до теплопоглинальних спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН здійснюється через середовище, яке характеризується відповідним опором теплопередачі (термічним опором)  $R_{cool,i}$ , а передача тепла від тепловиділяючих спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН до РР здійснюється через середовище, яке характеризується відповідним опором теплопередачі (термічним опором)  $R_{hot,i}$ . Також будемо вважати, що при цьому інших додаткових факторів, які б могли впливати на теплообмін між РР і  $i$ -м ТТН немає. Тоді можна записати наступні рівняння, які, зокрема, відображають взаємозв'язок між температурами спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН і РР (у відповідних положеннях її руху):

$$T_{cool,i}^{PP} - T_{cool,i}^{TE} = Q_{cool,i}^{TE} R_{cool,i}, \quad (3.7)$$

$$T_{cool,i}^{PP} - T_{cool,i}^{TE} = \left( \alpha_i I_i T_{cool,i}^{TE} - \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) \right) R_{cool,i} \quad (3.8)$$

(вираз (3.8) отриманий з використанням виразу (3.2));

$$T_{hot,i}^{TE} - T_{hot,(i-1)}^{PP} = Q_{hot,i}^{TE} R_{hot,i}, \quad (3.9)$$

$$T_{hot,i}^{TE} - T_{hot,(i-1)}^{PP} = \left( \alpha_i I_i T_{hot,i}^{TE} + \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) \right) R_{hot,i}, \quad (3.10)$$

де  $Q_{hot,i}^{TE}$  – загальна (сумарна) теплопродуктивність термоелементів  $i$ -го ТТН ( $Q_{hot,i}^{TE} = \alpha_i I_i T_{hot,i}^{TE} + \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE})$ ) [7, 8].

Як характеристику потоку РР будемо використовувати теплоємнісі витрати РР (швидкість витрачання РР, якщо кількість РР виражати в одиницях її теплоємності)  $V_C^{PP}$ , (Дж/К)/с або Вт/К:

$$V_C^{PP} = \frac{C^{PP}}{\Delta\tau}, \quad (3.11)$$

де  $C^{PP}$  – теплоємність РР, яка приймає участь у відповідному процесі за інтервал часу  $\Delta\tau$  (в деякому положенні руху РР, наприклад, згідно рис. 2 [1] – в положенні 1.1; у контексті цієї роботи будемо вважати, що  $V_C^{PP}$  однакова у всіх положеннях руху РР).

Наприклад, якщо відомі питома масова теплоємність РР  $c_m^{PP}$  та масові витрати РР  $M^{PP}$ , тоді теплоємнісні витрати РР можна визначити за формулою:

$$V_C^{PP} = c_m^{PP} M^{PP}. \quad (3.12)$$

З врахуванням припущення 6 [1] та інформації, яка наведена вище запишемо рівняння, яке, зокрема, відображає взаємозв'язок між загальною (сумарною) холодопродуктивністю термоелементів  $i$ -го ТТН, зміною температури РР в результаті її ТК з теплопоглинальною ТЧ  $i$ -го ТТН та теплоємнісними витратами РР:

$$V_C^{PP} (T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{PP}) = \alpha_i I_i T_{cool,i}^{TE} - \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}). \quad (3.13)$$

З врахуванням припущення 6 [1] та інформації, яка наведена вище запишемо рівняння, яке, зокрема, відображає взаємозв'язок між загальною (сумарною) теплопродуктивністю термоелементів  $i$ -го ТТН, зміною температури РР в результаті її ТК з тепловиділяючою ТЧ  $i$ -го ТТН та теплоємнісними витратами РР:

$$V_C^{PP} (T_{hot,(i-1)}^{PP} - T_{hot,i}^{PP}) = \alpha_i I_i T_{hot,i}^{TE} + \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}). \quad (3.14)$$

З врахуванням припущення 6 [1] та інформації, яка наведена вище запишемо рівняння, яке, зокрема, відображає взаємозв'язок між загальною (сумарною) споживаною потужністю термоелементів  $i$ -го ТТН, сумарною зміною температури РР в результаті її ТК з теплопоглинальною і тепловиділяючою ТЧ  $i$ -го ТТН та теплоємнісними витратами РР:

$$V_C^{PP} ((T_{hot,(i-1)}^{PP} - T_{hot,i}^{PP}) - (T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{PP})) = I_i^2 r_i + \alpha_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) I_i. \quad (3.15)$$

У цій роботі (частині 3) будемо вважати, що величини  $R_{hot,i}$ ,  $R_{cool,i}$ ,  $\alpha_i$ ,  $r_i$ ,  $k_i$  – це постійні величини (їх можливі температурні та інші залежності враховувати не будемо) для окремо взятого випадку.

Рівняння (3.6), (3.8), (3.10), (3.13), (3.14), (3.15) можна використовувати для оціночних розрахунків режимів роботи окремо взятих ТТН та досліджуваних процесів в загалом.

Для описаного вище прикладу будемо використовувати показник енергетичної ефективності досліджуваного процесу  $\omega_{cool}$ :

$$\omega_{cool} = \frac{Q_{cool}^{TTH}}{W^{TTH}} = \frac{\Delta T_{cool}^{PP}}{\Delta T_{hot}^{PP} - \Delta T_{cool}^{PP}} \quad (3.16)$$

(права частина цього виразу отримана з використанням виразів (1), (23) і (24) [1]), де  $\Delta T_{cool}^{PP}$  – відповідно до схеми рис. 2 [1] різниця температур РР, яка утворюється внаслідок охолодження РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН;  $\Delta T_{hot}^{PP}$  – відповідно до схеми рис. 2 [1] різниця температур РР, яка утворюється внаслідок нагрівання РР у її вихідному потоці всіма окремо взятими ТТН.

Зазначимо, що коли у досліджуваному процесі використовується лише один ТТН, тоді  $\omega_{cool}$  дорівнює холодильному коефіцієнту цього єдиного ТТН  $\varepsilon_1^{TTH}$ .

### Про зміну кількості матеріалів

Технічна реалізація досліджуваного способу тепломасообміну може здійснюватися з використанням відповідного пристрою. Вартість, маса, розміри та інші характеристики такого пристрою можуть залежати від кількостей (наприклад, мас) матеріалів, з яких виготовлені ТТН, наприклад, зокрема, від кількості термоелектричного матеріалу, з якого виготовлені вітки термоелементів (наприклад, матеріалу на основі телуриду вісмуту) та від кількості матеріалу, з якого виготовлені ТЧ (наприклад, в першу чергу, матеріалу на основі алюмінію, з якого виготовлені радіатори-теплообмінники). При зміні кількості ТТН  $n$ , які використовуються для реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, вказані вище кількості того чи іншого матеріалу можуть залишатися без змін, зменшуватися, збільшуватися. Як характеристики цього можна використовувати коефіцієнт зміни кількості термоелектричного матеріалу  $\gamma_{l_0}^{l_x}$  (при відповідній зміні варіанту реалізації досліджуваного способу тепломасообміну) та коефіцієнт зміни кількості матеріалу, з якого виготовлені теплообмінники  $\phi_{l_0}^{l_x}$  (при відповідній зміні варіанту реалізації досліджуваного способу тепломасообміну):

$$\gamma_{l_0}^{l_x} = \frac{m_{l_x}^{TM}}{m_{l_0}^{TM}}; \quad (3.17)$$

$$\phi_{l_0}^{l_x} = \frac{m_{l_x}^{MHE}}{m_{l_0}^{MHE}}, \quad (3.18)$$

де  $m_{l_0}^{TM}$  – кількість термоелектричного матеріалу, яка виражена у відповідних одиницях (наприклад, маса, яка виражена в кілограмах) у випадку (варіанті) реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, з яким здійснюється порівняння (у початковому випадку);  $l_0$  –

позначення цього початкового випадку (як варіант – його номер у таблиці 3.1);  $m_{l_x}^{TM}$  – відповідна кількість термоелектричного матеріалу (яка виражена у тих же одиницях) у випадку (варіанті) реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, який розглядається (який порівнюється);  $l_x$  – позначення цього порівнюваного випадку (як варіант – його номер у таблиці 3.1);  $m_{l_0}^{MHE}$  – кількість матеріалу, з якого виготовлені теплообмінники, яка виражена у відповідних одиницях (наприклад, маса, яка виражена в кілограмах) у випадку (варіанті) реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, з яким здійснюється порівняння (у початковому випадку);  $l_0$  – позначення цього початкового випадку (як варіант – його номер у таблиці 3.1);  $m_{n_{ch}}^{MHE}$  – відповідна кількість матеріалу, з якого виготовлені теплообмінники (яка виражена у тих же одиницях) у випадку (варіанті) реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, який розглядається (який порівнюється);  $l_x$  – позначення цього порівнюваного випадку (як варіант – його номер у таблиці 3.1).

Зробимо наступні припущення.

10. Нехай при зміні реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, яка може супроводжуватися зміною кількості ТТН виконуються наступні співвідношення, які мають відношення до кількості термоелектричного матеріалу (за умови, що всі термоелементи  $i$ -го ТТН електрично з'єднані послідовно, а з точки зору теплових потоків – паралельно):

$$\alpha_{i;x} = \frac{n_0}{n_x} \gamma_{l_0}^{l_x} \alpha_{i;0}; \quad (3.19)$$

$$r_{i;x} = \frac{n_0}{n_x} \gamma_{l_0}^{l_x} r_{i;0}; \quad (3.20)$$

$$k_{i;x} = \frac{n_0}{n_x} \gamma_{l_0}^{l_x} k_{i;0}; \quad (3.21)$$

де  $n_0$  – кількість ТТН у випадку (варіанті) реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, з яким здійснюється порівняння (у початковому випадку);  $n_x$  – кількість ТТН у випадку (варіанті) реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, який розглядається (який порівнюється);  $\alpha_{i;x}$  – сумарний диференціальний коефіцієнт Зеєбека матеріалу (віток) термоелементів  $i$ -го ТТН у випадку (варіанті) реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, який розглядається (який порівнюється);  $\alpha_{i;0}$  – сумарний диференціальний коефіцієнт Зеєбека матеріалу (віток) термоелементів  $i$ -го ТТН у випадку (варіанті) реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, з яким здійснюється порівняння (у початковому випадку);  $r_{i;x}$  – сумарний електричний опір термоелементів  $i$ -го ТТН у випадку (варіанті) реалізації *досліджуваного способу тепломасообміну*, який розглядається (який порівнюється);  $r_{i;0}$  – сумарний електричний опір термоелементів  $i$ -го ТТН у випадку (варіанті)

реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, з яким здійснюється порівняння (у початковому випадку);  $k_{i,x}$  – теплопровідність термоелементів  $i$ -го ТТН у випадку (варіанті) реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, який розглядається (який порівнюється);  $k_{i,0}$  – теплопровідність термоелементів  $i$ -го ТТН у випадку (варіанті) реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, з яким здійснюється порівняння (у початковому випадку).

11. Нехай при зміні реалізації досліджуваного способу тепломасообміну виконуються наступні співвідношення, які мають відношення до кількості матеріалу, з якого виготовлені теплообмінники (за умови, що всі термоелементи  $i$ -го ТТН з точки зору теплових потоків з'єднані паралельно):

$$R_{hot,i;l_x} = \frac{n_x}{n_0 \varphi_{l_0}^{l_x}} R_{hot,i;l_0}; \quad (3.22)$$

$$R_{cool,i;l_x} = \frac{n_x}{n_0 \varphi_{l_0}^{l_x}} R_{cool,i;l_0}, \quad (3.23)$$

де  $R_{hot,i;l_x}$  – сумарний опір теплопередачі від тепловиділяючих спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН до РР у випадку (варіанті) реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, який розглядається (який порівнюється);  $R_{hot,i;l_0}$  – сумарний опір теплопередачі від тепловиділяючих спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН до РР у випадку (варіанті) реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, з яким здійснюється порівняння (у початковому випадку);  $R_{cool,i;l_x}$  – сумарний опір теплопередачі від РР до теплопоглинальних спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН у випадку (варіанті) реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, який розглядається (який порівнюється);  $R_{cool,i;l_0}$  – сумарний опір теплопередачі від РР до теплопоглинальних спаїв термоелементів  $i$ -го ТТН у випадку (варіанті) реалізації досліджуваного способу тепломасообміну, з яким здійснюється порівняння (у початковому випадку).

У цій роботі (частині 3) далі будемо використовувати ці припущення 10 та 11.

## Результати оціночних розрахунків та їх особливості

Вихідні дані та результати відповідних розрахунків, які стосуються розглядуваного прикладу, представлені (в скороченому вигляді) в таблиці 3.1. Заголовки стовпців таблиці містять послідовно, згори донизу, текстовий опис відповідних величин, їх символічне позначення (за наявності) та розмірність (за наявності), які відокремлені пунктирними лініями. В таблиці вихідні дані та результати розрахунків позначені різними кольорами (вихідні дані – цим кольором, а результати розрахунків – цим іншим кольором). Номера випадків розглядуваного прикладу, для яких значення  $V_C^{PP}$  однаково позначені однаковими кольорами.

Для всіх випадків розглядуваного прикладу сумарний перепад температур РР у її вхідному потоці відповідно до виразу (23) [1] та схеми рис. 2 [1] однаковий і дорівнює  $5\text{ K}$ :

$$\Delta T_1^{PP} = 5\text{ K}. \quad (3.24)$$

Таблиця

Вихідні дані та деякі результати відповідних 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]; згідно з припущеннями 1, 2, 4-8 [1];  $T_{1,n}^{PP} = T_{2,n}^{PP} = 298.15 \text{ K}$ )

№ випадку розглядуваного прикладу	Загальна кількість ТТН $n$	Коефіцієнт зміни кількості термоелектричного матеріалу	Коефіцієнт зміни кількості матеріалу теплообмінників	Сумарний диференціальний коефіцієнт Зеебека матеріалу (віток термоелементів кожного окремо взятого $i$ -го ТТН)	Сумарний електричний опір термоелементів кожного окремо взятого $i$ -го ТТН	Сила струму, який протікає через кожен термоелемент кожного окремо взятого $i$ -го ТТН	Сумарна теплопровідність віток термоелементів кожного окремо взятого $i$ -го ТТН	Сумарний опір теплопередачі від тепловідділюючих сплавів термоелементів кожного окремо взятого $i$ -го ТТН до РР	Сумарний опір теплопередачі від РР до теплопоглинаючих сплавів термоелементів кожного окремо взятого $i$ -го ТТН	Теплоємнісна витрати РР (теплоємнісна швидкість РР)	Сумарний перепад температур РР у її вхідному потоці	Перепад температур на $R_{cool,n}$ , К	Перепад температур на термоелементах $n$ -го ТТН	Холодильний коефіцієнт термоелементів $n$ -го ТТН	Показник енергетичної ефективності досліджуваного процесу
$l$	$n$	$\gamma_{l_0}^{l_x}$	$\varphi_{l_0}^{l_x}$	$\alpha_i$	$r_i$	$I_i$	$k_i$	$R_{hot,i}$	$R_{cool,i}$	$V_C^{PP}$	$\Delta T_1^{PP}$	$\Delta T_{cool,n}^R$	$\Delta T_n^{TE}$	$\epsilon_n^{TE}$	$\omega_{cool}$
				В	Ом	А	Вт/К	К/Вт	К/Вт	Вт/К	К	К	К		
1 <sup>(1)</sup>	1	1	1	0.048	2.6	1.617	0.34	0.1	0.1	3.152	5	1.5762	11.36	2.051	2.051
2	1	2	1	0.096	5.2	0.863	0.68	0.1	0.1	3.152	5	1.5762	10.12	3.343	3.343
3	1	16	1	0.768	41.6	0.364	5.44	0.1	0.1	3.152	5	1.5762	11.829	1.789	1.789
4	2	1	1	0.024	1.3	1.49	0.17	0.2	0.2	3.152	5	1.5835	7.306	2.517	2.492
5	2	2	1	0.048	2.6	0.768	0.34	0.2	0.2	3.152	5	1.5844	6.601	4.458	4.411
6	2	2	2	0.048	2.6	0.713	0.34	0.1	0.1	3.152	5	0.791	4.712	5.337	5.288
7	2	0.87	0.87	0.021	1.128	1.765	0.148	0.23	0.23	3.152	5	1.825	8.255	2.074	2.051
8	2	0.9	0.9	0.022	1.17	1.689	0.153	0.222	0.222	3.152	5	1.760	7.989	2.183	2.160
9	8	1	1	0.006	0.325	1.403	0.042	0.8	0.8	3.152	5	1.586	4.560	2.923	2.878
10	16	1	1	0.003	0.162	1.3895	0.021	1.6	1.6	3.152	5	1.565	5.677	2.997	2.948
11	16	4	4	0.012	0.65	0.313	0.085	0.4	0.4	3.152	5	0.396	1.155	14.51	14.32
12	16	16	16	0.048	2.6	0.082	0.34	0.1	0.1	3.152	5	0.0991	0.521	50.44	49.71
13	16	32	16	0.096	5.2	0.047	0.68	0.1	0.1	3.152	5	0.0994	0.520	71.02	69.72
14	16	32	32	0.096	5.2	0.045	0.68	0.05	0.05	3.152	5	0.050	0.419	81.05	79.69
15	16	0.78	0.78	0.002	0.127	1.882	0.017	2.042	2.042	3.152	5	2.028	5.492	2.089	2.051
16	16	0.9	0.9	0.003	0.146	1.579	0.019	1.778	1.778	3.152	5	1.764	4.648	2.582	2.538



17	48	48	48	0.048	2.6	0.0272	0.34	0.1	0.1	3.152	5	0.033	0.172	153.5	151.2
----	----	----	----	-------	-----	--------	------	-----	-----	-------	---	-------	-------	-------	-------

Таблиця (продовження)

$l$	$n$	$\gamma_{l_0}^x$	$\phi_{l_0}^x$	$\alpha_i$	$r_i$	$I_i$	$k_i$	$R_{hot,i}$	$R_{cool,i}$	$V_C^{PP}$	$\Delta T_1^{PP}$	$\Delta T_{cool,n}^R$	$\Delta T_n^{TE}$	$\varepsilon_n^{TE}$	$\omega_{cool}$
				В	Ом	А	Вт/К	К/Вт	К/Вт	Вт/К	К	К	К		
18	1	1	1	0.048	2.6	0.314 <sup>(2)</sup>	0.34	0.1	0.1	0.445	5	0.223	6.267	6.360	6.360
19	1	1	1	0.048	2.6	0.350 <sup>(3)</sup>	0.34	0.1	0.1	0.536	5	0.268	6.374	6.293	6.293
20	2	1	1	0.024	1.3	0.274	0.17	0.2	0.2	0.536	5	0.270	3.300	11.31	11.18
21	16	1	1	0.003	0.162 5	0.214	0.021 25	1.6	1.6	0.536	5	0.269	0.881	21.12	20.83 9
22	16	0.31 4	0.31 4	0.000 94	0.051	0.699	0.006 7	5.098	5.098	0.536	5	0.859	2.216	6.383	6.293
23	64	1	1	0.000 75	0.041	0.207	0.005 3	6.4	6.4	0.536	5	0.269	0.632	22.81 6	22.51 6
24	64	8	8	0.006	0.325	0.027	0.042 5	0.8	0.8	0.536	5	0.034	0.147	160.4	158.1
25	1	1	1	0.048	2.6	4.502 <sup>(4)</sup>	0.34	0.1	0.1	5.669	5	2.834	26.841	0.484	0.484
26	1	1	1	0.048	2.6	5.455 <sup>(5)</sup>	0.34	0.1	0.1	5.343	5	2.671	35.21	0.309	0.309
27	2	1	1	0.024	1.3	3.086	0.17	0.2	0.2	5.343	5	2.694	13.08	1.009	0.994
28	16	1	1	0.003	0.162 5	2.846	0.021 25	1.6	1.6	5.343	5	2.704	8.201	1.219	1.191
29	16	0.82 8	0.82 8	0.002 483	0.134 5	4.838	0.017 59	1.93	1.93	5.343	5	3.327	14.008	0.519	0.495
30	16	0.80 1	1	0.002 404	0.130 2	4.928	0.017 03	1.6	1.6	5.343	5	2.751	11.724	0.521	0.497

<sup>(1)</sup> коефіцієнти зміни кількостей матеріалів для всіх інших випадків розраховані по відношенню до кількостей матеріалів у цьому випадку (кількість матеріалів у цьому випадку – початкова); <sup>(2)</sup> в режимі максимальної енергоефективності ТТН, який працює у досліджуваному процесі; <sup>(3)</sup> відповідає режиму максимальної енергоефективності термоелементів ТТН, які працюють при значеннях температур їх теплопоглинальних та тепловиділяючих спаїв, що відповідають цьому випадку; <sup>(4)</sup> в режимі максимальної холодопродуктивності ТТН, який працює у досліджуваному процесі; <sup>(5)</sup> відповідає режиму максимальної холодопродуктивності термоелементів ТТН, які працюють при значеннях температур їх теплопоглинальних та тепловиділяючих спаїв, що відповідають цьому випадку.

У 1-му випадку розглядуваного прикладу використовується лише один ТТН, термоелементи якого при цьому працюють в проміжному режимі між режимами максимальної енергоефективності та режимом максимальної холодопродуктивності. Параметри цього процесу обчислені з використанням системи 4-х рівнянь (3.8), (3.10), (3.13), (3.14) (можливе використання також системи 4-х рівнянь (3.8), (3.10), (3.13), (3.15) або системи 4-х рівнянь (3.8), (3.10), (3.14), (3.15), або системи 4-х рівнянь (3.6), (3.8), (3.10), (3.13), або системи 4-х рівнянь (3.6), (3.8), (3.10), (3.14), або системи 4-х рівнянь (3.6), (3.8), (3.10), (3.15)). Величини  $T_{hot,(i-1)}^{PP}$ ,  $T_{cool,i}^{TE}$ ,  $T_{hot,i}^{TE}$ ,  $V_C^{PP}$ , при цьому – не

відомі, а інші величини – відомі. Вихідні дані та результати розрахунків, для цього випадку наведені у рядку таблиці 3.1, який відповідає цьому випадку.

У тих наступних випадках розглядуваного прикладу, в яких використовуються декілька ТТН, ці декілька ТТН – однакові (значення  $\alpha_i$ ,  $r_i$ ,  $k_i$ ,  $R_{hot,i}$  та  $R_{cool,i}$  для всіх цих ТТН – однакові) і також для всіх цих ТТН сила струму, який через них протікає,  $I_i$  – однакова.

Рис. 3.1 відображає деякі особливості випадків 18 та 19 розглядуваного прикладу. Графік *a* на рис. 3.1 побудований на основі функції, яка відображає залежність холодильного коефіцієнта відповідного *i*-го ТТН від сили струму, який протікає через термоелементи цього *i*-го ТТН  $\varepsilon_i^{TTH}(I_i)$ , яка, в свою чергу, отримана на основі рівнянь, наприклад, (3.6), (3.8), (3.10), (3.13) та виразу (3.4) за умови, що  $\Delta T_1^{PP} = const = 5 K$ . Координати точки **18** на рис. 3.1 (яка відповідає 18-му випадку розглядуваного прикладу) отримані, зокрема, з використанням умови  $(\varepsilon_i^{TTH}(I_i))' = 0$ . Графіки *b* та *c* на рис. 3.1 побудовані на основі виразу (3.1) (з використанням виразів (3.2) та (3.3)).

Результати розрахунків для 19-го випадку розглядуваного прикладу отримані з використанням системи 5-ти рівнянь, наприклад, (3.6), (3.8), (3.10), (3.13) та загально відомого виразу-рівняння для визначення сили струму, який протікає через термоелементи, які працюють в режимі максимальної енергоефективності  $I_i^{\varepsilon_i^{TE,max}}$  [9]:

$$I_i^{\varepsilon_i^{TE,max}} = \frac{\alpha_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE})}{r_i \left( \sqrt{1 + 0.5 \frac{\alpha_i^2}{k_i r_i} (T_{hot,i}^{TE} + T_{cool,i}^{TE})} - 1 \right)}. \quad (3.25)$$

У цьому 19-му випадку  $I_i = I_i^{\varepsilon_i^{TE,max}}$ .

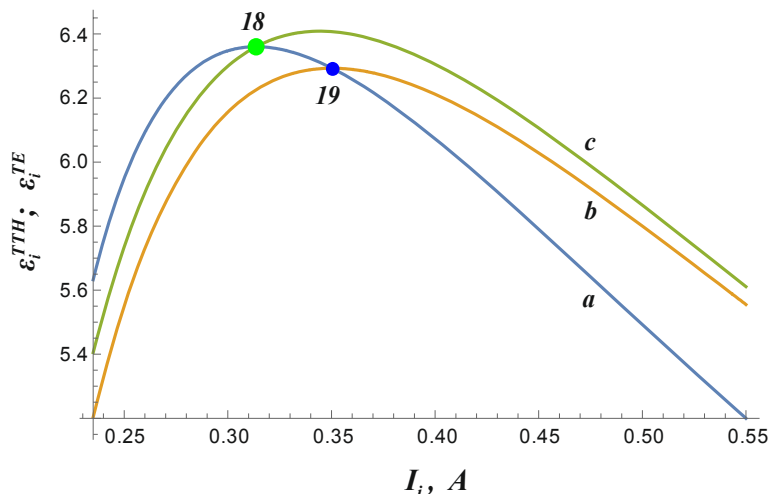


Рис. 3.1. Рисунок, який відображає деякі особливості випадків 18 та 19 розглядуваного прикладу: *a* – графік  $\varepsilon_i^{TTH}(I_i)$  ( $\Delta T_1^{PP} = const = 5 K$ ,  $V_C^{PP} \neq const$ ); *b* – графік залежності  $\varepsilon_i^{TE}$  від  $I_i$  для фіксованих значень температур теплопоглинальних та тепловиділяючих спайів термоелементів *i*-го ТТН, що відповідають 19-му випадку розглядуваного прикладу; *c* – графік залежності  $\varepsilon_i^{TE}$  від  $I_i$  для

фіксованих значень температур теплопоглинальних та тепловиділяючих спайів термоелементів  $i$ -го ТТН, що відповідають 18-му випадку розглядуваного прикладу; точка 18 відповідає 18-му випадку розглядуваного прикладу; точка 19 відповідає 19-му випадку розглядуваного прикладу.

Рис. 3.2 відображає деякі особливості випадків 25 та 26 розглядуваного прикладу. Графік  $a$  на рис. 3.2 побудований на основі функції, яка відображає залежність холодопродуктивності відповідного  $i$ -го ТТН від сили струму, який протікає через термоелементи цього  $i$ -го ТТН  $Q_{cool,i}^{TTH}(I_i)$ , яка, в свою чергу, отримана на основі рівнянь, наприклад, (3.6), (3.8), (3.10), (3.13) та виразу для визначення холодопродуктивності  $i$ -го ТТН за його дією на РР:

$$Q_{cool,i}^{TTH} = V_C^{PP} (T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{PP}) \quad (3.26)$$

(з врахуванням відповідних припущень) за умови, що  $\Delta T_1^{PP} = const = 5 K$ .

Координати точки 25 на рис. 3.2 (яка відповідає 25-му випадку розглядуваного прикладу) отримані, зокрема, з використанням умови  $(Q_{cool,i}^{TTH}(I_i))' = 0$ . Графіки  $b$  та  $c$  на рис. 3.2 побудовані на основі виразу (3.2).

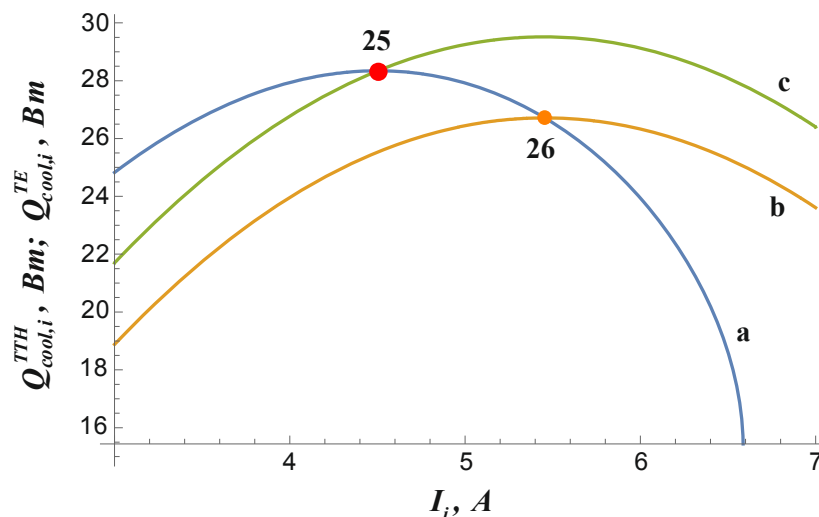


Рис. 3.2. Рисунок, який відображає деякі особливості випадків 25 та 26 розглядуваного прикладу:  $a$  – графік  $Q_{cool,i}^{TTH}(I_i)$  ( $\Delta T_1^{PP} = const = 5 K$ ,  $V_C^{PP} \neq const$ );  $b$  – графік залежності  $Q_{cool,i}^{TE}$  від  $I_i$  для фіксованих значень температур теплопоглинальних та тепловиділяючих спайів термоелементів  $i$ -го ТТН, що відповідають 26-му випадку розглядуваного прикладу;  $c$  – графік залежності  $Q_{cool,i}^{TE}$  від  $I_i$  для фіксованих значень температур теплопоглинальних та тепловиділяючих спайів термоелементів  $i$ -го ТТН, що відповідають 25-му випадку розглядуваного прикладу; точка 25 відповідає 25-му випадку розглядуваного прикладу; точка 26 відповідає 26-му випадку розглядуваного прикладу.

Результати розрахунків для 26-го випадку розглядуваного прикладу отримані з використанням системи 5-ти рівнянь, наприклад, (3.6), (3.8), (3.10), (3.13) та загально відомого виразу-рівняння для визначення сили струму, який протікає через термоелементи, які працюють в режимі максимальної холодопродуктивності  $I_i^{Q_{cool,i}^{TE,max}}$  [8]:

$$I_i^{Q_{cool,i}^{TE,max}} = \frac{\alpha_i T_{cool,i}^{TE}}{r_i} \quad (3.27)$$

У цьому 26-му випадку  $I_i = I_i^{Q_{cool,i,max}^{TE}}$ .

## Висновки

На основі описаних у цій роботі розрахунків можна зробити висновки про те, що збільшення кількості ТТН, що застосовуються у описаних вище процесах, зокрема, може:

- 1) створювати можливість зменшення кількості термоелектричного матеріалу та/або кількості матеріалу теплообмінників, з якого/яких виготовлені всі ТТН, при незмінній енергоефективності відповідного процесу;
- 2) створювати можливість підвищення енергоефективності відповідного процесу при незмінній/незмінних кількості/кількостях термоелектричного матеріалу та/або матеріалу теплообмінників, з якого/яких виготовлені всі ТТН;
- 3) створювати можливість підвищення енергоефективності відповідного процесу при зміні (зокрема, при збільшенні) кількості термоелектричного матеріалу та/або матеріалу теплообмінників, з якого/яких виготовлені всі ТТН.

## Література

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, 39–55.
2. Kshevetsky O.S. (2018). Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 2. *J. Thermoelectricity*, 2, 56–68.
3. Kshevetsky, O. (2019). About some of the possibilities of using heat pumps in processes that involve the movement of substance. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(3), 70–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.10>
4. Кшевецький 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.*
5. Кшевецький О.С. Патент UA №118972, МПК (2006) F26B 9/06 (2006.01), B01J 8/00, F26B 9/00 на винахід «Спосіб тепломасообміну між рухомою речовиною і тепловими насосами», 10.04.2019, Бюл.№7.
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. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Порівняльний аналіз термоелектричних та компресійних теплових насосів для індивідуальних кондиціонерів. *Термоелектрика*. 2016. №2. С.33–42.
8. Иоффе А.Ф. *Полупроводниковые термоэлементы*. М. – Л., Издательство АН СССР, 1960. 188 с.
9. Anatychuk L.I. *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Chernivtsi, Institute of Thermoelectricity, 2005. 348 p.

Надійшла до редакції 28.08.2019

**Кшавецький .О. С., канд. физ. мат наук, доцент**  
**Орлецький А.В.**

Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58012, Украина

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ В ЧАСТНОМ СЛУЧАЕ  
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАСООБМЕНА МЕЖДУ  
ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ И ПОДВИЖНЫМ  
ВЕЩЕСТВОМ, ЧАСТЬ 3**

*Представлена теоретическая модель для оценки эффективности работы в частном случае процессов тепломассообмена между подвижным веществом и термоэлектрическими тепловыми насосами с их теплообменными частями, при котором подвижное вещество (или хотя бы часть этого подвижного вещества) приводят в тепловой контакт с теплопоглощающей и тепловыделяющей теплообменными частями по крайней мере двух термоэлектрических тепловых насосов, которые могут работать в режимах, отличающихся от режима максимальной энергоэффективности, в частности, с учетом количества материалов, необходимых для изготовления этих термоэлектрических тепловых насосов. Приведены результаты соответствующей теоретической оценки. Библиография, табл. 1, рис. 2.*

**Ключевые слова:** тепловой насос, подвижное вещество, тепломассообмен, КПД, энергоэффективность, термоэлектрический тепловой насос, термоэлементы, термоэлектрический материал.

**Kshevetsky O.S., cand. Phys. - math. Sciences,**  
*assistant professor*  
**Orletskyi O.V.**

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

**ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF PARTIAL CASE OF  
HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES BETWEEN HEAT  
PUMPS AND MOVING SUBSTANCE, PART 3**

*A theoretical model for evaluating the efficiency of the partial case of heat and mass transfer processes between a moving substance and thermoelectric heat pumps with their heat exchange parts, in which the moving substance (or at least part of this moving substance) is brought into thermal contact with heat absorbing and heat dissipating heat exchangers, which can operate in modes that may differ from the mode of maximum energy efficiency, in particular, taking into account the amounts of materials required for the manufacture of these thermoelectric heat pumps. The results of the corresponding theoretical estimation are given. Bibl. 9, Tabl. 1, Fig. 2.*

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

## 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, 39–55.
2. Kshevetsky O.S. (2018). Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 2. *J. Thermoelectricity*, 2, 56–68.
3. Kshevetsky, O. (2019). About some of the possibilities of using heat pumps in processes that involve the movement of substance. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(3), 70-76. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.10>
4. Kshevetsky O.S. (2017). *On the possibility of increasing the energy efficiency of heat and mass transfer processes that provide for heating and cooling of moving substance*. *Khimichna Tekhnologija ta Ingeneriia: zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - Chemical Technology and Engineering: Abstracts of International scientific and practical conference (Lviv, June 26–30, 2017)* (pp.96-97).
5. *Patent of Ukraine №118972* (2019). Kshevetsky O.S. Process of heat and mass transfer between moving substance and heat pumps. *Bul. №7* [in Ukrainian].
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. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners. *J. Thermoelectricity*, 2, 33 – 42.
8. Ioffe A.F. (1960). *Poluprovodnikovyye termoelementy* [Semiconductor thermoelements]. Moscow-Leningrad: AN SSSR Publ. [in Russian].
9. Anatyshuk L.I. (2005). *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Chernivtsi, Institute of Thermoelectricity.

Submitted 28.08.2019