

Кшевецький О.С., канд. фіз.-мат. наук¹
Черкез Р.Г., доктор фіз.-мат. наук^{1,2}
Мазар Ю.І.¹

¹ Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна;

² Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

e-mail: anatysh@gmail.com

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТИННОГО ВИПАДКУ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ МІЖ ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ І РУХОМОЮ РЕЧОВИНОЮ. ЧАСТИНА 4

Представлена теоретична модель для оцінки ефективності роботи частинного випадку процесів, в яких має місце тепловий контакт рухомої речовини (або принаймні частини цієї рухомої речовини) з теплопоглинальною і тепловиділяючою теплообмінними частинами принаймні двох теплових насосів для випадку нагрівання рухомої речовини у її вхідному потоці всіма окремо взятими термоелектричними тепловими насосами. Наведені математичні вирази для відповідних оціночних розрахунків та приклади результатів таких розрахунків.

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

Вступ

Ця робота (частина 4) є продовженням попередніх робіт [1, 2, 3] (частин 1 – 3). У цій частині 4 будемо використовувати позначення, скорочення (зокрема, словосполучення) та аббревіатури, які були введені в [1, 2, 3], у тому ж значенні, як і в [1, 2, 3]. В роботі [3] отримані математичні вирази для оцінки ефективності *досліджуваного способу тепломасообміну* та наведені приклади відповідних розрахунків, для випадку охолодження РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН за умови, що $T_{1,n}^{PP} = T_{2,n}^{PP}$ згідно з рис. 2 [1] (випадок нагрівання РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН в роботі [3] не розглядається).

Метою цієї роботи є створення теоретичних передумов для наближеної кількісної оцінки ефективності (в першу чергу – енергоефективності) *досліджуваного способу тепломасообміну* [1 - 6] з використанням ТТН, які можуть працювати в різних режимах, для випадку нагрівання РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН згідно з рис. 3 [1].

Для реалізації такої мети *завданнями цієї роботи* є створення оціночної моделі, отримання математичних виразів для оціночних розрахунків та отримання прикладів відповідних розрахунків для випадку нагрівання РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН згідно з рис. 3 [1], зокрема, для випадку, коли $T_{1,n}^{PP} \neq T_{2,n}^{PP}$.

Опис оціночної моделі та рівняння для оціночних розрахунків

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 [7]), в яких згідно з рис. 3 [1] РР у її вхідному потоці нагрівають всіма окремо взятими ТТН. Нехай корисною дією цих процесів є підтримування різниці температур РР у її вхідному потоці між положеннями 1.0 та 1.n згідно з рис. 3 [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 теплопродуктивності всіх ТТН Q_{hot}^{TTH}). У цій роботі (частині 4) витрати енергії на створення потоку РР враховувати не будемо.

Розглянемо окремо взятий i -й ТТН.

Використаємо загально відоме співвідношення для визначення опалювального коефіцієнта термоелементів i -го ТТН μ_i^{TE} [8]:

$$\mu_i^{TE} = \frac{Q_{hot,i}^{TE}}{W_i^{TE}}, \quad (4.1)$$

де

$$Q_{hot,i}^{TE} = \alpha_i I_i T_{hot,i}^{TE} + \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}); \quad (4.2)$$

$$W_i^{TE} = I_i^2 r_i + \alpha_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) I_i; \quad (4.3)$$

$Q_{hot,i}^{TE}$ – загальна (сумарна) теплопродуктивність термоелементів i -го ТТН; W_i^{TE} – загальна (сумарна) електрична потужність, яку споживають термоелементи i -го ТТН; α_i – загальний (сумарний) диференціальний коефіцієнт Зеебека 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.

Опалювальний коефіцієнт i -го ТТН, який працює у досліджуваному процесі згідно з рис. 3 [1] та з врахуванням припущення 6 [1] ($d = const$) μ_i^{TTH} :

$$\mu_i^{TTH} = \frac{Q_{hot,i}^{TTH}}{W_i^{TTH}} = \frac{T_{hot,i}^{PP} - T_{hot,(i-1)}^{PP}}{(T_{hot,i}^{PP} - T_{hot,(i-1)}^{PP}) - (T_{cool,i}^{PP} - T_{cool,(i-1)}^{PP})}, \quad (4.4)$$

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

Нехай $Q_{hot,i}^{TTH} = Q_{hot,i}^{TE}$ і $W_i^{TTH} = W_i^{TE}$. Тоді на основі виразів (4.1) і (4.4) можна записати:

$$\mu_i^{TE} = \mu_i^{TTH}, \quad (4.5)$$

$$\frac{T_{hot,i}^{PP} - T_{hot,(i-1)}^{PP}}{(T_{hot,i}^{PP} - T_{hot,(i-1)}^{PP}) - (T_{cool,i}^{PP} - T_{cool,(i-1)}^{PP})} = \frac{\alpha_i I_i T_{hot,i}^{TE} + \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE})}{I_i^2 r_i + \alpha_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE})} I_i. \quad (4.6)$$

Будемо вважати, що передача тепла від тепловиділяючих спаїв термоелементів i -го ТТН до РР здійснюється через середовище, яке характеризується відповідним опором теплопередачі (термічним опором) $R_{hot,i}$, а передача тепла від РР до теплопоглинальних спаїв термоелементів i -го ТТН здійснюється через середовище, яке характеризується відповідним опором теплопередачі (термічним опором) $R_{cool,i}$. 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):

$$T_{hot,i}^{TE} - T_{hot,i}^{PP} = Q_{hot,i}^{TE} R_{hot,i}, \quad (4.7)$$

$$T_{hot,i}^{TE} - T_{hot,i}^{PP} = \left(\alpha_i I_i T_{hot,i}^{TE} + \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) \right) R_{hot,i} \quad (4.8)$$

(вираз (4.8) отриманий з використанням виразу (4.2));

$$T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{TE} = Q_{cool,i}^{TE} R_{cool,i}, \quad (4.9)$$

$$T_{cool,(i-1)}^{PP} - T_{cool,i}^{TE} = \left(\alpha_i I_i T_{cool,i}^{TE} - \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) \right) R_{cool,i}, \quad (4.10)$$

де $Q_{cool,i}^{TE}$ – загальна (сумарна) холодопродуктивність термоелементів i -го ТТН (

$$Q_{cool,i}^{TE} = \alpha_i I_i T_{cool,i}^{TE} - \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) \quad [8]).$$

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} [3]:

$$V_C^{PP} (T_{hot,i}^{PP} - T_{hot,(i-1)}^{PP}) = \alpha_i I_i T_{hot,i}^{TE} + \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}). \quad (4.11)$$

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:

$$V_C^{PP} (T_{cool,i}^{PP} - T_{cool,(i-1)}^{PP}) = \alpha_i I_i T_{cool,i}^{TE} - \frac{1}{2} I_i^2 r_i - k_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}). \quad (4.12)$$

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:

$$V_C^{PP} \left((T_{hot,i}^{PP} - T_{hot,(i-1)}^{PP}) - (T_{cool,i}^{PP} - T_{cool,(i-1)}^{PP}) \right) = I_i^2 r_i + \alpha_i (T_{hot,i}^{TE} - T_{cool,i}^{TE}) I_i. \quad (4.13)$$

У цій роботі (частині 4) будемо вважати, що величини $R_{hot,i}$, $R_{cool,i}$, α_i , r_i , k_i не залежать від температури.

Рівняння (4.6), (4.7), (4.9), (4.11), (4.12), (4.13) 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 ω_{hot} :

$$\omega_{hot} = \frac{Q_{hot}^{TTH}}{W^{TTH}} = \frac{\Delta T_{hot}^{PP}}{\Delta T_{hot}^{PP} - \Delta T_{cool}^{PP}} \quad (4.15)$$

(права частина цього виразу отримана з використанням виразів (1), (54) і (55) [1]), де ΔT_{hot}^{PP} – відповідно до схеми рис. 3 [1] різниця температур PP, яка утворюється внаслідок нагрівання PP у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН; ΔT_{cool}^{PP} – відповідно до схеми рис. 3 [1] різниця температур PP, яка утворюється внаслідок охолодження PP у її вихідному потоці всіма окремо взятими ТТН.

Зазначимо, що коли у досліджуваному процесі використовується лише один ТТН, тоді ω_{hot} дорівнює опалювальному коефіцієнту цього єдиного ТТН μ_1^{TTH} [9 – 11].

Для реалізації одного із завдань цієї роботи були здійснені деякі оціночні розрахунки з використанням описаних вище оціночної моделі та рівнянь для оціночних розрахунків.

Результати оціночних розрахунків та їх особливості

Вихідні дані та деякі результати відповідних розрахунків, які стосуються розглядуваного в цій роботі прикладу досліджуваного процесу, представлені (в скороченому вигляді) в таблиці 4.1. Заголовки стовпців таблиці 4.1 містять послідовно, згори донизу, текстовий опис відповідних величин, їх символічне позначення (за наявності) та розмірність (за наявності), які відокремлені пунктирними лініями. В таблиці 4.1 вихідні дані та результати розрахунків позначені різними кольорами (вихідні дані – цим кольором, а результати розрахунків – цим іншим кольором).

Також інформація про розрахунки представлена на рисунках 4.1 - 4.7.

Для всіх випадків розглядуваного прикладу сумарний перепад температур PP у її вхідному потоці відповідно до виразу (54) [1] та схеми рис. 3 [1] однаковий і дорівнює 5 K:

$$\Delta T_1^{PP} = \Delta T_{hot}^{PP} = 5 \text{ K} . \quad (4.16)$$

Також для всіх випадків розглядуваного прикладу однакова і температура PP на вході згідно з рис. 3 [1]:

$$T_{1,0}^{PP} = 298.15 \text{ K} . \quad (4.17)$$

У тих випадках розглядуваного прикладу, в яких використовуються декілька ТТН, ці декілька ТТН – однакові (значення α_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.

Припустимо, що для реалізації досліджуваного процесу згідно із схемою рис. 3 [1] є ТТН з відомими заданими параметрами, наприклад, такими, які наведені в таблиці 4.1 для 1-го або 2-го або 5-го випадків розглядуваного прикладу досліджуваного способу тепломасообміну. Також задані фіксовані температура $T_{1,n}^{PP}$ та різниця температур $\Delta T_1^{PP} = \Delta T_{hot}^{PP} = 5 \text{ K}$ (4.16). Теплоємнісні витрати PP при цьому можуть змінюватися (не є фіксованими). Приклади результатів розрахунків для таких випадків представлені в таблиці 4.1 (1-й, 2-й та 5-й випадки) та на рисунках 4.1 - 4.6 (для вихідних даних, які відповідають 1-му та 2-му випадкам в таблиці 4.1).

Таблиця 4.1

Вихідні дані та деякі результати відповідних оціночних розрахунків ефективності досліджуваного способу теплообміну з використанням ТТН для випадку нагрівання РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН (згідно з рис. 3 [1]; згідно з припущеннями 1, 2, 4-7 [1]; $T_{1,0}^{PP} = 298.15 \text{ K}$)

№ випадку розглядуваного прикладу	Загальна кількість ТТН n	Термоелектрична добротність термоелементів кожного окремо взятого i -го ТТН	Сумарний диференціальний коефіцієнт Зесбека матеріалу (віток) термоелементів кожного окремо взятого i -го ТТН	Сумарний електричний опір термоелементів кожного окремо взятого i -го ТТН	Сумарна теплопровідність віток термоелементів кожного окремо взятого i -го ТТН	Сила струму, який протікає через кожен термоелемент кожного окремо взятого i -го ТТН	Сумарний опір теплопередачі від тепловідділюючих спайів термоелементів кожного окремо взятого i -го ТТН до РР	Сумарний опір теплопередачі від РР до теплопоглинальних спайів термоелементів кожного окремо взятого i -го ТТН	Теплоємнісні витрати РР	Температура РР у положенні 1.п	Температура РР у положенні 2.п	Перепад температур на термоелементах n -го ТТН	Опалювальний коефіцієнт термоелементів n -го ТТН	Показник енергетичної ефективності досліджуваного процесу
l	n	z_i	α_i	r_i	k_i	I_i	$R_{hot,i}$	$R_{cool,i}$	V_C^{PP}	$T_{1,n}^{PP}$	$T_{2,n}^{PP}$	ΔT_n^{TE}	μ_n^{TE}	ω_{hot}
		1/K	B	Om	Bт/K	A	K/Bт	K/Bт	Bт/K	K	K	K		
1 ⁽¹⁾	1	0.0026	0.048	2.6	0.34	0.2422	0.1	0.1	0.3917	303.15	303.15	4.8377	9.379 ⁽¹⁾	9.379 ⁽¹⁾
2 ⁽¹⁾	1	0.0026	0.048	1.3	0.68	0.4749	0.1	0.1	0.7185	303.15	303.15	5.1074	8.77 ⁽¹⁾	8.77 ⁽¹⁾
3 ⁽²⁾	1	0.0026	0.048	3.082	0.287	0.2245	0.1	0.1	0.3917	303.15	303.15	4.8411	9.436 ⁽²⁾	9.436 ⁽²⁾
4 ⁽²⁾	1	0.0026	0.048	1.783	0.496	0.4106	0.1	0.1	0.7185	303.15	303.15	5.1197	8.951 ⁽²⁾	8.951 ⁽²⁾
5 ⁽¹⁾	1	0.0026	0.048	2.6	0.34	0.2913	0.1	0.1	0.4755	303.15	302.15	5.8103	7.874 ⁽¹⁾	7.874 ⁽¹⁾
6 ⁽²⁾	1	0.0026	0.048	3.692	0.239	0.2227	0.1	0.1	0.3917	303.15	302.15	5.7432	8.013 ⁽²⁾	8.013 ⁽²⁾
7 ⁽²⁾	2	0.0026	0.048	3.077	0.287	0.1153	0.1	0.1	0.3917	303.15	303.15	2.5301	17.7	17.923 ⁽²⁾
8	1	0.0027	0.048	1.008	0.847	0.403	0.1	0.1	0.3917	303.15	303.15	4.7153	7.682	7.682
9	2	0.0027	0.048	1.008	0.847	0.2079	0.1	0.1	0.3917	303.15	303.15	2.4649	14.1	14.443
10	8	0.0026	0.048	3.232	0.274	0.0288	0.1	0.1	0.3917	303.15	303.15	0.6555	67.236	68.748

⁽¹⁾ значення V_C^{PP} підібране і вказане таке, що при цьому досягається максимальне значення ω_{hot} ;

⁽²⁾ значення r_i (та k_i) підібране і вказане таке, що при цьому досягається максимальне значення ω_{hot} .

Тепер припустимо, що потрібно реалізувати досліджуваний процес згідно із схемою рис. 3 [1], для якого задані фіксована температура $T_{1,n}^{PP}$, фіксована різниця температур $\Delta T_1^{PP} = \Delta T_{hot}^{PP} = 5 \text{ K}$ (4.16), фіксовані теплоємнісні витрати РР, фіксована термоелектрична

добротність термоелементів кожного окремо взятого i -го ТТН z_i та фіксований сумарний диференціальний коефіцієнт Зеєбека матеріалу (віток) термоелементів кожного окремо взятого i -го ТТН, наприклад, такі, які наведені в таблиці 4.1 для 3-го або 4-го або 6-го або 7-го випадків розглядуваного прикладу досліджуваного способу тепломасообміну. В той же час значення r_i та відповідно k_i не є фіксованими і можуть підбиратися (розраховуватися) для досягнення максимального значення ω_{hot} . Приклади результатів розрахунків для таких випадків представлені в таблиці 4.1 (3-й, 4-й, 6-й та 7-й випадки) та на рис. 4.7 (для вихідних даних, які відповідають 3-му та 7-му випадкам в таблиці 4.1; на рис. 4.7 наведені, зокрема, деякі результати розрахунків, яких немає в таблиці 4.1).

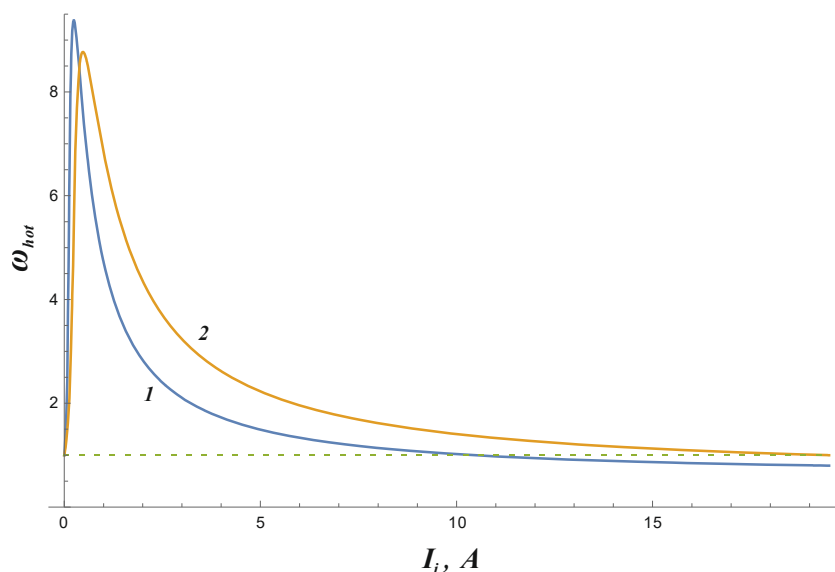


Рис. 4.1. Графіки залежності ω_{hot} від I_i розглядуваного прикладу досліджуваного процесу для вихідних даних, які відповідають 1-му та 2-му випадкам в таблиці 4.1 ($\Delta T_{hot}^{PP} = const = 5 K$, $V_C^{PP} \neq const$): 1 – для вихідних даних 1-го випадку з таблиці 4.1, 2 – для вихідних даних 2-го випадку з таблиці 4.1.

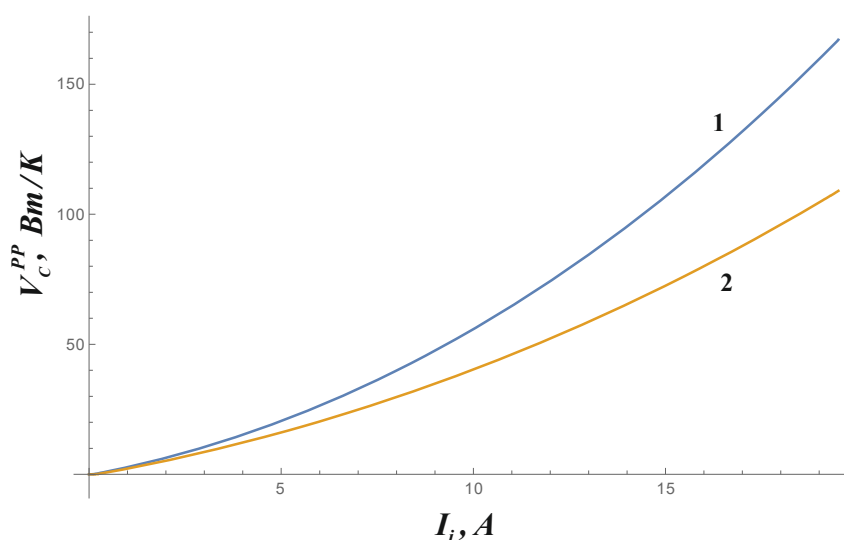


Рис. 4.2. Графіки залежності V_C^{PP} від I_i розглядуваного прикладу досліджуваного процесу для вихідних даних, які відповідають 1-му та 2-му випадкам в таблиці 4.1 ($\Delta T_{hot}^{PP} = const = 5 K$): 1 – для вихідних даних 1-го випадку з таблиці 4.1, 2 – для вихідних даних 2-го випадку з таблиці 4.1.

Для 8-го, 9-го та 10-го випадків розглядуваного прикладу досліджуваного способу тепломасообміну згідно з таблицею 4.1 оптимізація не здійснювалася.

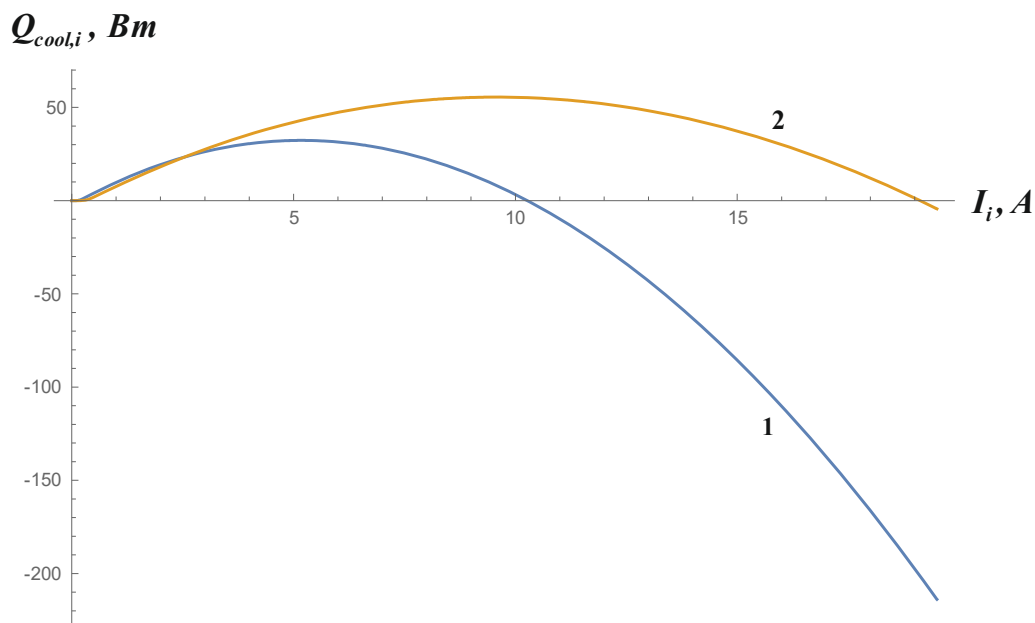


Рис. 4.3. Графіки залежності теплового потоку від PP до теплопоглинальних спаїв термоелементів i -го ТТН $Q_{cool,i}$ від I_i розглядуваного прикладу досліджуваного процесу для вихідних даних, які відповідають 1-му та 2-му випадкам в таблиці 4.1 ($\Delta T_{hot}^{PP} = const = 5 K$, $V_C^{PP} \neq const$): 1 – для вихідних даних 1-го випадку з таблиці 4.1, 2 – для вихідних даних 2-го випадку з таблиці 4.1.

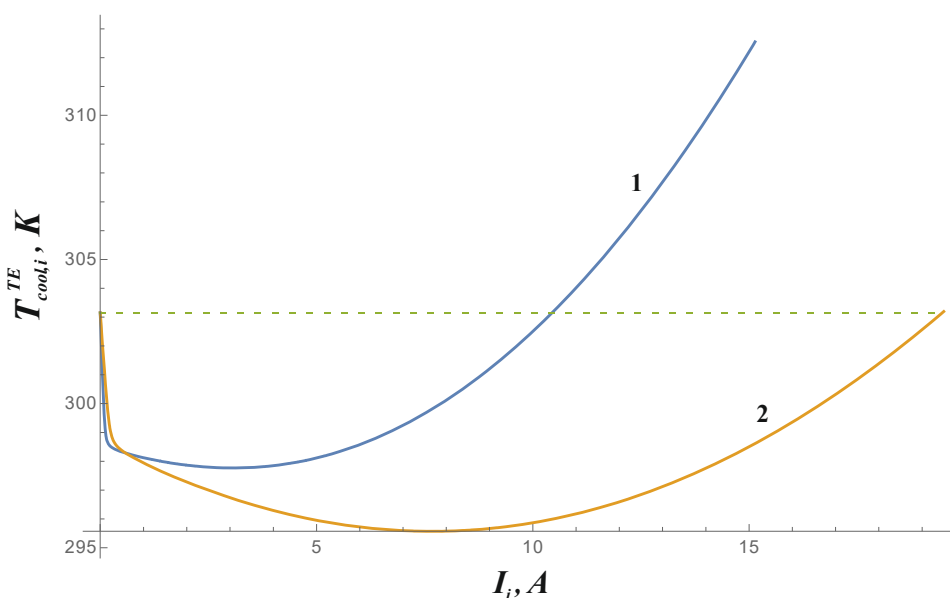


Рис. 4.4. Графіки залежності $T_{cool,i}^{TE}$ від I_i розглядуваного прикладу досліджуваного процесу для вихідних даних, які відповідають 1-му та 2-му випадкам в таблиці 4.1 ($\Delta T_{hot}^{PP} = const = 5 K$, $V_C^{PP} \neq const$): 1 – для вихідних даних 1-го випадку з таблиці 4.1, 2 – для вихідних даних 2-го випадку з таблиці 4.1.

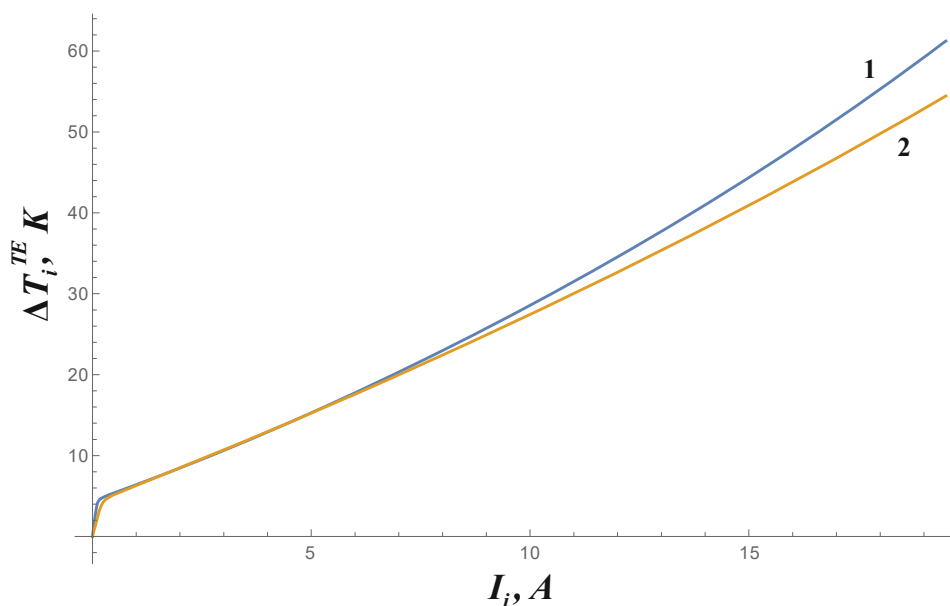


Рис. 4.5. Графіки залежності ΔT_i^{TE} від I_i розглянутого прикладу досліджуваного процесу для вихідних даних, які відповідають 1-му та 2-му випадкам в таблиці 4.1 ($\Delta T_{hot}^{PP} = const = 5\text{ K}$, $V_C^{PP} \neq const$): 1 – для вихідних даних 1-го випадку з таблиці 4.1, 2 – для вихідних даних 2-го випадку з таблиці 4.1.

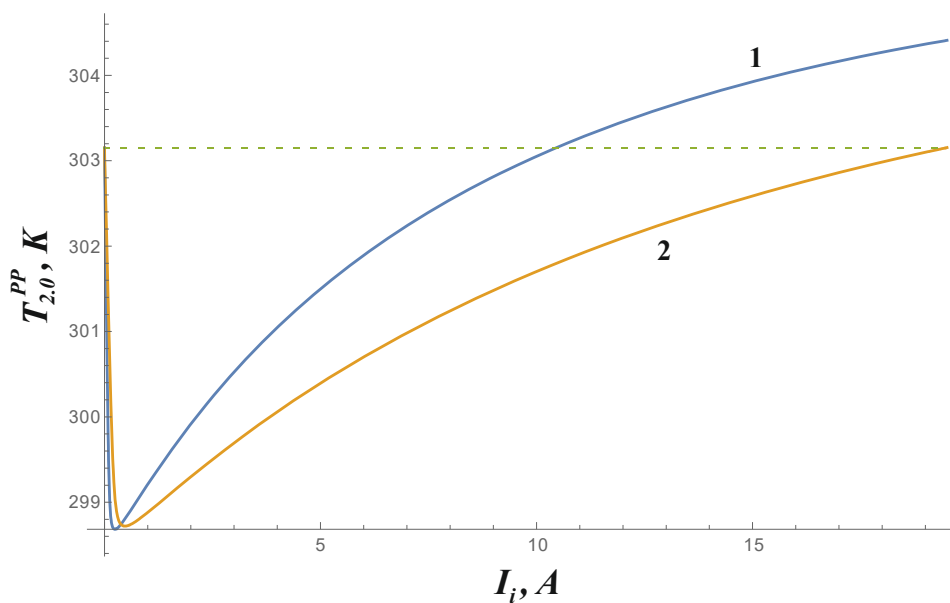


Рис. 4.6. Графіки залежності температури PP на виході відповідно до схеми рис. 3 [1] $T_{2,0}^{PP}$ від I_i розглянутого прикладу досліджуваного процесу для вихідних даних, які відповідають 1-му та 2-му випадкам в таблиці 4.1 ($\Delta T_{hot}^{PP} = const = 5\text{ K}$, $V_C^{PP} \neq const$): 1 – для вихідних даних 1-го випадку з таблиці 4.1, 2 – для вихідних даних 2-го випадку з таблиці 4.1.

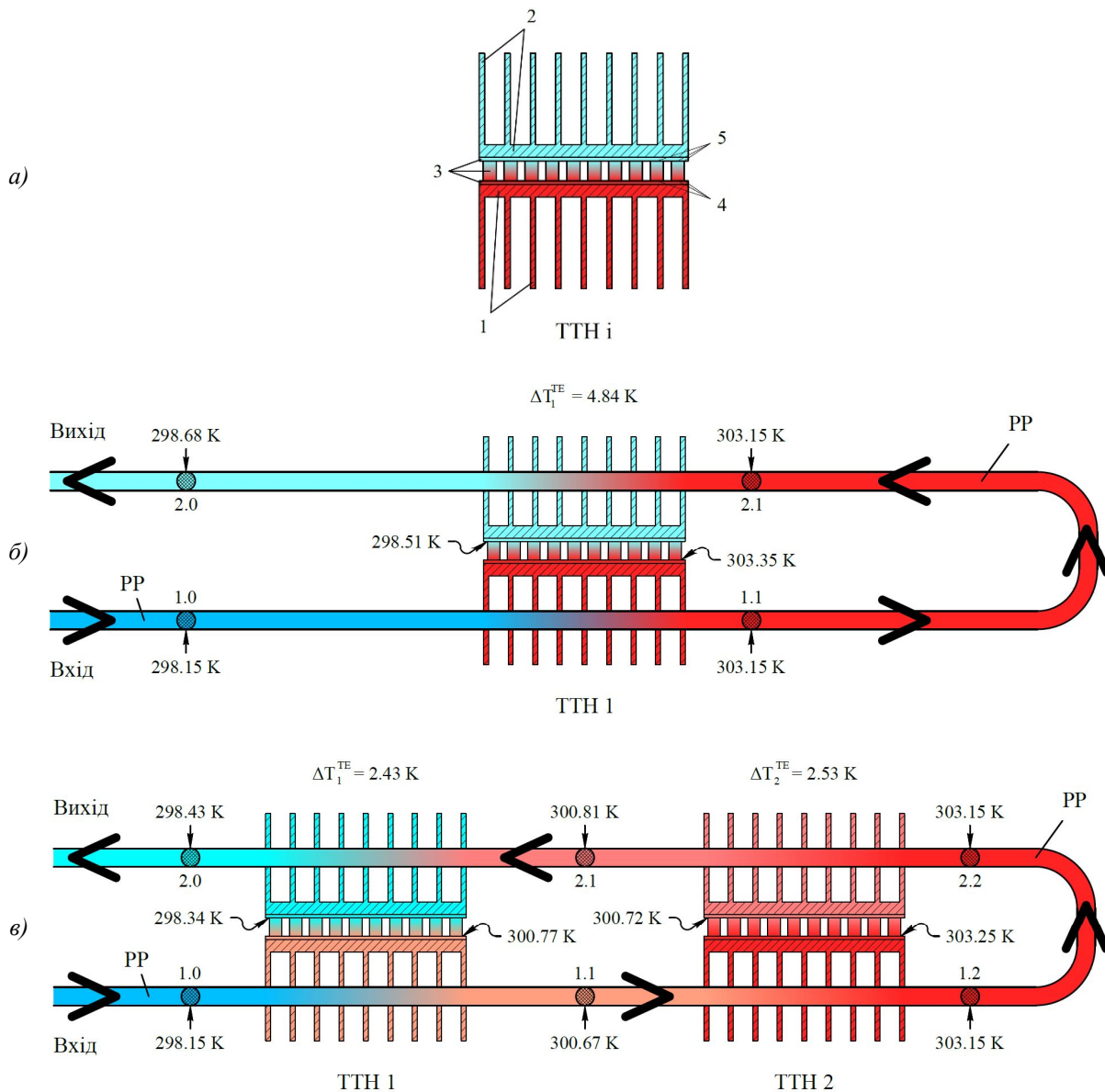


Рис. 4.7. Рисунок, який ілюструє результати розрахунків для 3-го та 7-го випадків розглядуваного прикладу досліджуваного способу тепломасообміну (згідно з таблицею 4.1): а) спрощена схема окремо взятого i -го ТТН: 1 – тепловідляючий теплообмінник, 2 – теплопоглинальний теплообмінник, 3 – термоелектричний модуль, 4 – розташування тепловідляючих спаїв термоелементів ТТН, 5 – розташування теплопоглинальних спаїв термоелементів ТТН; б) спрощена схема 3-го випадку розглядуваного прикладу досліджуваного процесу з деякими відповідними результатами розрахунків:

1.0, 1.1, 2.1, 2.0 – послідовні положення РР у процесі її руху (1.0 – безпосередньо перед ТК РР з тепловідляючою (1-ю) ТЧ ТТН 1, 1.1 – одразу ж після ТК РР з тепловідляючою (1-ю) ТЧ ТТН 1, 2.1 – безпосередньо перед ТК РР з теплопоглинальною (2-ю) ТЧ ТТН 1, 2.0 – одразу ж після ТК РР з теплопоглинальною (2-ю) ТЧ ТТН 1; в) спрощена схема 7-го випадку розглядуваного прикладу досліджуваного процесу з деякими відповідними результатами розрахунків: 1.0, 1.1, 1.2, 2.2, 2.1, 2.0 – послідовні положення РР у процесі її руху (1.0 – безпосередньо перед ТК РР з тепловідляючою (1-ю) ТЧ ТТН 1, 1.1 – одразу ж після ТК РР з тепловідляючою (1-ю) ТЧ ТТН 1, 1.2 – одразу ж після ТК РР з тепловідляючою (1-ю) ТЧ ТТН 2, 2.2 – безпосередньо перед ТК РР з теплопоглинальною (2-ю) ТЧ ТТН 2, 2.1 – одразу ж після ТК РР з теплопоглинальною (2-ю) ТЧ ТТН 2, 2.0 – одразу ж після ТК РР з теплопоглинальною (2-ю) ТЧ ТТН 1.

Висновки

1. Представлена теоретична модель для оцінки ефективності використання досліджуваного способу тепломасообміну для випадку нагрівання РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН. Наведені математичні вирази для відповідних оціночних розрахунків та приклади результатів таких розрахунків.
2. Енергоефективність досліджуваного процесу може залежати від його особливостей, від кількості ТТН, що застосовуються в процесі та від параметрів термоелементів ТТН.
3. Для прийняття рішень стосовно практичних застосувань досліджуваного способу тепломасообміну можуть знадобитися подальші теоретичні та/або експериментальні дослідження.

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.S., Orletskyi O.V. (2019). Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 3. *J. Thermoelectricity*, 4, 40 – 53.
4. Kshevetsky O.S. (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>
5. Kshevetsky O.S. (2017). On the possibility of increasing the energy efficiency of heat and mass transfer processes that involve heating and cooling of moving matter. *Chemical Technology and Engineering: collection of abstracts of International Scientific and Practical Conference* (June 26 – 30, 2017, Lviv). Lviv: Lvivska Politechnica Publ., 96 – 97.
6. 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.
7. Anatyshuk L.I. (2005). *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Chernivtsi, Institute of Thermoelectricity, 2005. 348 p.
8. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air conditioners. *J. Thermoelectricity*, 2, 33 – 42.
9. Cherkez R. (2012). Theoretical studies on the efficiency of air conditioner based on permeable thermoelectric converter. *Applied Thermal Engineering*, 38, 7 – 13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.012>
10. Anatyshuk L.I. and Cherkez R.G. (2012). Energy potential of permeable segmented thermoelements in cooling mode. *Journal of Electronic Materials*, 41 (6), 1115 – 1119. DOI: [10.1007/s11664-012-1946-4](https://doi.org/10.1007/s11664-012-1946-4)
11. Prybyla A.V. and Cherkez R.G. (2012). Effect of heat-exchange systems on the efficiency of thermoelectric devices. *AIP Conf. Proc.* 1449, 443, 443 – 446; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4731591>

Надійшла до редакції: 15.11.2023.

Kshevetsky O.S., Cand. Sc (Phys-Math) ¹

Cherkez R.G., DSc (Phys-Math) ^{1,2}

Mazar Yu.I. ¹

¹ Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskiyi str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine;

² Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine
e-mail: anatykh@gmail.com

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF PARTIAL CASE OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES BETWEEN HEAT PUMPS AND MOVING SUBSTANCE, PART 4

A theoretical model is presented for estimating the efficiency of a partial case of processes in which there is thermal contact of a moving substance (or at least part of this moving substance) with the heat-absorbing and heat-releasing heat-exchange parts of at least two heat pumps for the case of heating the moving substance in its input flow by all individual heat pumps. Mathematical expressions for the corresponding estimation calculations and examples of the results of such calculations are presented.

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

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.S., Orletskiy O.V. (2019). Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 3. *J. Thermoelectricity*, 4, 40 – 53.
4. Kshevetsky O.S. (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](https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.10)
5. Kshevetsky O.S. (2017). On the possibility of increasing the energy efficiency of heat and mass transfer processes that involve heating and cooling of moving matter. *Chemical Technology and Engineering: collection of abstracts of International Scientific and Practical Conference* (June 26 – 30, 2017, Lviv). Lviv: Lvivska Politechnica Publ., 96 – 97.
6. *Patent of Ukraine №118972*. O.S. Kshevetsky (2019). Method of heat and mass exchange between movable substance and heat pumps, Bul. №7.
7. Anatyshuk L.I. (2005). *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Chernivtsi, Institute of Thermoelectricity, 2005. 348 p.

8. Anatyчук L.I., Prybyla A.V. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air conditioners. *J. Thermoelectricity*, 2, 33 – 42.
9. Cherkez R. (2012). Theoretical studies on the efficiency of air conditioner based on permeable thermoelectric converter. *Applied Thermal Engineering*, 38, 7 – 13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.012>
10. Anatyчук L.I. and Cherkez R.G. (2012). Energy potential of permeable segmented thermoelements in cooling mode. *Journal of Electronic Materials*, 41 (6), 1115 – 1119. DOI: [10.1007/s11664-012-1946-4](https://doi.org/10.1007/s11664-012-1946-4)
11. Prybyla A.V. and Cherkez R.G. (2012). Effect of heat-exchange systems on the efficiency of thermoelectric devices. *AIP Conf. Proc.* 1449, 443, 443 – 446; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4731591>

Submitted: 15.11.2023.