

---

**ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ТЕПЛООБМІННИЙ АПАРАТ РЕКУПЕРАТИВНОГО  
ТИПУ З ТЕПЛОВИМИ МІСТКАМИ**

---

*У роботі розглянуто конструкцію термоелектричного теплообмінного апарата з тепловими містками. Показано результати його математичного моделювання й натурних випробувань дослідного зразка. Наведено розрахункові та експериментальні графіки зміни температури в різних точках апарата. Отримані результати дають можливість зробити висновок про ефективність використання конструкції теплообмінного апарата на практиці.*

**Ключові слова:** теплообмінний апарат, термоелектрична батарея, теплоносій, температурне поле, математична модель, дослідний зразок, експеримент.

*This paper dwells upon the design of a thermoelectric heat-exchange apparatus with thermal bridges. The results of its mathematical simulation and full-scale test of the prototype are presented. Calculated and experimental plots of temperature variation at different points of the apparatus are given. The results obtained allow for a conclusion on the efficient practical application of heat-exchange apparatus.*

**Key words:** heat-exchange apparatus, thermopile, heat carrier, temperature field, mathematical model, prototype, experiment.

## **Вступ**

На сучасному етапі розвитку науки й техніки все більш нагальними та актуальними є завдання дослідження спеціальних засобів для забезпечення інтенсивної теплопередачі від джерел з високими тепловими навантаженнями, створення принципово нових високоефективних систем охолодження й термостабілізації, що відповідають специфічним вимогам, проектування теплообмінних апаратів, що володіють поліпшеними характеристиками [1]. Це пов'язано з наповненням світового ринку новими технічними засобами, що мають більші функціональні можливості й високу швидкодію, але, в свою чергу, характеризуються підвищеним значенням питомих теплових перевантажень і перегрівів, що позначається на надійності їх роботи.

Одним з перспективних напрямків у створенні систем охолодження й термостабілізації апаратури є використання напівпровідникових термоелектричних перетворювачів, що забезпечують побудову економічних малогабаритних холодильників і стабілізаторів температури із широкими функціональними можливостями підтримки заданого теплового режиму [2, 3]. Теорію й можливості практичного застосування приладів подібного типу досить докладно описано в роботах Йоффе А.Ф., Стільбанса Л.С., Коленко А.Е., Бурштейна А.І., Каганова М.А., Прівіна М.Р., Анатичука Л.І., Вайнера А.Л., Йорданішвілі Е.К., Зоріна І.В. і ін. У їхніх працях розраховано параметри приладів, що працюють у різних режимах, визначено

енергетичну ефективність їх застосування. Основний акцент тут зроблено на дослідження теплофізичних процесів за незмінної температури на спаях термоелектричних перетворювачів енергії.

Однак існує багато областей застосування термоелектричних приладів, де має місце зміна температури теплоносіїв уздовж поверхонь термоелектричної батареї (ТЕБ), які поглинають та виділяють тепло. У першу чергу сюди необхідно віднести різні типи теплообмінних апаратів: охолоджувачі й нагрівачі потоків рідини, охолоджувачі повітря, кондиціонери і т.п., тобто всі прилади, у яких циркуляція теплоносіїв відбувається уздовж спаїв ТЕБ. Значного прогресу в термоелектричній техніці робіт про обладнання подібного типу практично немає, не розроблено повною мірою їх теоретичні основи, не зазначено ефективні режими роботи, не визначено області доцільного застосування і т.д.

Інтерес становить дослідження термоелектричних теплообмінних апаратів спеціальної конструкції з поліпшеними енергетичними характеристиками, їх оптимізація, визначення основних параметрів, а також областей раціонального застосування. Зазначений інтерес обумовлений недостатнім дослідженням у цій області поряд з гострою необхідністю розробки діючих високоефективних теплообмінних апаратів з поліпшеними властивостями. Згадані обставини і визначають актуальність нашого дослідження.

Мета роботи – дослідження термоелектричного теплообмінного апарата рекуперативного типу з тепловими містками із поліпшеними енергетичними, масогабаритними та надійнісними показниками.

### Математична модель теплообмінного апарата

Розрахункову схему приладу наведено на рис.1. На ній на елементарній ділянці  $dx$  довжини ТЕБ забезпечується теплопередача як через термоелементи (ТЕ), так і через високотеплопровідні теплові містки з інтенсивністю теплообміну, що визначається числами Біо відповідно для ТЕБ –  $Bi_{1,2}$ ; для теплового містка –  $Bi'_{1,2}$ . Вводиться поняття коефіцієнта заповнення  $\xi$ , який у цьому випадку характеризується відношенням площі ТЕБ на елементарній ділянці до площі елементарної ділянки. Тоді на елементарній ділянці довжини  $dx$  площа спаїв ТЕ займає поверхню  $\xi Ldx$ , а площа поверхні теплового містка –  $(1-\xi)Ldx$ , де  $L$  – ширина ТЕБ.

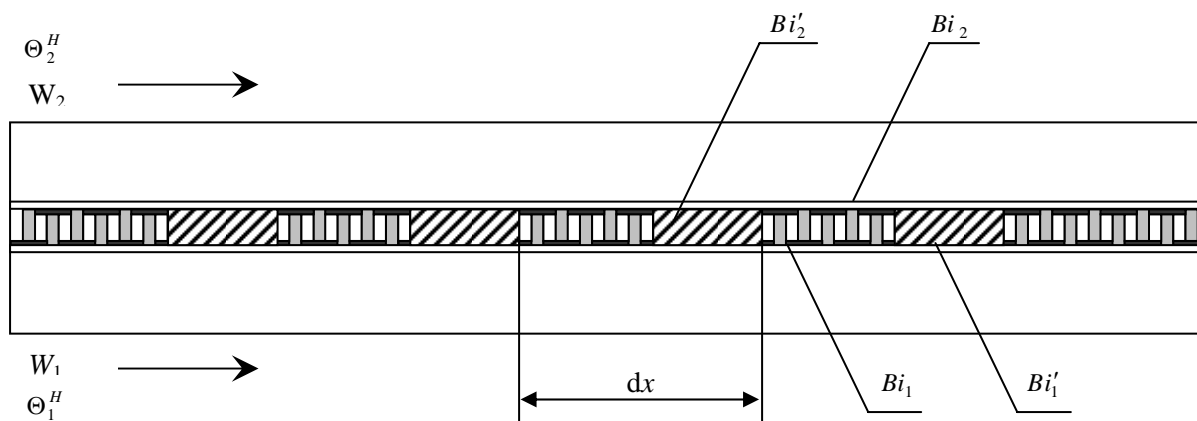


Рис. 1. Розрахункова схема термоелектричного теплообмінного апарата з тепловими містками.

Коефіцієнти тепловіддачі, теплопровідності та товщину відповідно для ТЕБ і теплового містка позначимо через  $\alpha_{1,2}$ ,  $\alpha'_{1,2}$ ,  $\lambda_{1,2}$ ,  $\lambda'_{1,2}$ ,  $d$ ,  $d'$ . Приймаємо, що температури теплоносіїв, що охолоджуються та нагріваються, на вході в ТЕБ співвідносяться як  $T_1 > T_2$ . Інші припущення відповідають загальноприйнятим для протічних термоелектричних теплових насосів: потоки абсолютно перемішуються в напрямку, перпендикулярному напрямку руху; властивості теплоносіїв і матеріалів не залежать від температури; теплопередача через невраховані елементи конструкції відсутня.

Рівняння теплового балансу потоків теплоносіїв для наведеної схеми в умовах прямогоку виглядають так:

$$W_1 \frac{dT_1}{dx} = \alpha_1 \xi L (T_{1TЭБ} - T_1) + \alpha'_1 (1 - \xi) L (T_{1м} - T_1),$$

$$W_2 \frac{dT_2}{dx} = \alpha_2 \xi L (T_{2TЭБ} - T_2) + \alpha'_2 (1 - \xi) L (T_{2м} - T_2),$$

де  $T_{1ТЕБ, 2ТЕБ}$  – температури спаїв термоелементів,  $T_{1м, 2м}$  – температури поверхонь теплових містків,  $T_{1, 2}$  – температури теплоносіїв, що охолоджуються та нагріваються.

Рівняння теплового балансу на поверхнях, що омиваються потоками теплоносіїв, для спаїв ТЕ мають вигляд

$$\alpha_1 (T_1 - T_{1TЭБ}) = \bar{e} j T_{1TЭБ} - \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2TЭБ} - T_{1TЭБ}),$$

$$\alpha_2 (T_{2TЭБ} - T_2) = \bar{e} j T_{2TЭБ} + \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2TЭБ} - T_{1TЭБ}),$$

де  $\bar{e}$  – коефіцієнт термоЕРС,  $j$  – густина електричного струму, для теплових містків

$$\alpha'_1 (T_1 - T_{1м}) = K' (T_1 - T_2),$$

$$\alpha'_2 (T_{2м} - T_2) = K' (T_1 - T_2),$$

де  $K' = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d'}{\lambda} \right)^{-1}$  – коефіцієнт теплопередачі через тепловий місток.

Після виключення температур поверхонь  $T_{1ТЕБ, 2ТЕБ}$  і  $T_{1м, 2м}$  і приведення виразів до безрозмірного вигляду, вирази для зміни температур потоків теплоносіїв уздовж теплообмінної поверхні теплообмінного апарата набувають вигляду

$$\frac{d\Theta_1}{dx} = b \xi \left\{ [m\beta v^2 - (1 + v)] \Theta_1 + \Theta_2 + \frac{v^2}{2} [1 + (2 - v)m\beta] \right\} + b' (1 - \xi) (\Theta_2 - \Theta_1), \quad (1)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dx} = \eta b \xi \left\{ [\beta v^2 - (1 - v)] \Theta_1 + \Theta_2 + \frac{v^2}{2} [1 + (2 + v)\beta] \right\} + \eta b' (1 - \xi) (\Theta_1 - \Theta_2), \quad (2)$$

де  $b' = \frac{K'}{W_1} S$ ;  $\Theta_1 = \frac{\bar{e}^2}{\rho \lambda} T_1$ ;  $\Theta_2 = \frac{\bar{e}^2}{\rho \lambda} T_2$ ;  $v = \frac{\bar{e} d}{\lambda} j$ ;

$$b = \frac{K}{W_1} S; K = \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda} + v \left( \frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{v \lambda}{\alpha_1 \alpha_2 d} \right) \right]^{-1}.$$

Граничні умови записуються для випадку прямопотоку у вигляді

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H. \quad (3)$$

Розв'язок отриманої системи диференціальних рівнянь (1)-(2) із граничними умовами (3) для умови прямопотоку записується таким чином:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= C_1(\Psi_1 - b_2) \frac{e^{\Psi_1 x}}{b_1} + C_2(\Psi_2 - b_2) - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1}(\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1}(\Psi_2 - b_2), \\ \Theta_2 &= C_1 e^{\Psi_1 x} + C_2 e^{\Psi_2 x} - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1}, \end{aligned}$$

де

$$C_1 = [\Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2)\Theta_2^H + (\Psi_2 - b_2)V - b_1 \delta] / (\Psi_1 - \Psi_2),$$

$$C_2 = [\Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2)\Theta_2^H + (\Psi_1 - b_2)V - b_1 \delta] / (\Psi_2 - \Psi_1),$$

$$P_1 = (a_3 b_1 - b_3 \Psi_2 + b_3 b_2) / (\Psi_1 - \Psi_2),$$

$$P_2 = (a_3 b_1 - b_3 \Psi_1 + b_3 b_2) / (\Psi_2 - \Psi_1),$$

$$\delta = \frac{P_1}{\Psi_1 b_1}(\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1}(\Psi_2 - b_2), \quad V = -\frac{P_1}{\Psi_1} - \frac{P_2}{\Psi_2},$$

$$\Psi_{1,2} = \frac{b_2 + a_1 \pm \sqrt{(b_2 - a_1)^2 + 4a_2 b_1}}{2},$$

$$a_1 = b\xi[v^2 m\beta - (1+v)] - b'(1-\xi), \quad a_2 = b\xi + b'(1-\xi),$$

$$a_3 = b\xi \frac{v^2}{2} [1 + (2-v)m\beta], \quad b_1 = \eta b\xi + \eta b'(1-\xi),$$

$$b_2 = \eta b\xi [v^2 \beta - (1-v)] - b'\eta(1-\xi), \quad b_3 = \eta b\xi \frac{v^2}{2} [1 + (2+v)\beta].$$

У випадку протитечії знак лівої частини другого рівняння вихідної системи для опису полів температур теплоносіїв уздовж теплообмінника слід змінити на протилежний. Це рівносильно тому, що у всіх виразах для визначення  $\Theta_1$  і  $\Theta_2$  у випадку прямопотоку замість  $b_1, b_2, b_3$  необхідно обрати  $-b_1, -b_2, -b_3$ .

Крім того, постійні  $C_1$  і  $C_2$  повинні бути визначені із граничних умов:

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H, \Theta_2|_{x=1} = \Theta_2^H.$$

Відповідно до викладеного, для визначення  $C_1$  і  $C_2$  у випадку протитечії використовуються такі співвідношення:

$$\begin{cases} \Theta_1^H = C_1(\Psi_1 - b_2) \frac{1}{b_1} + C_2(\Psi_2 - b_2) \frac{1}{b_1} + \delta, \\ \Theta_2^H = C_1 e^{\Psi_1} + C_2 e^{\Psi_2} + V. \end{cases} \quad (4)$$

Із системи одержимо

$$C_1 = \frac{-b_1(\Theta_1^H - \delta)e^{\Psi_2} + (\Theta_2^H - V)(\Psi_2 - b_2)}{(\Psi_2 - b_2)e^{\Psi_2} - (\Psi_1 - b_2)e^{\Psi_2}}, \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{-b_1(\Theta_1^H - \delta)e^{\Psi_1} + (V - \Theta_2^H)(\Psi_1 - b_2)}{(\Psi_2 - b_2)e^{\Psi_1} - (\Psi_1 - b_2)e^{\Psi_2}}. \quad (6)$$

У даних виразах також потрібно замінити  $b_1, b_2, b_3$ , на  $-b_1, -b_2, -b_3$ . А температури теплоносіїв при цьому визначаються тими ж формулами, що і для прямопотоку.

Відмінною рисою режиму протитечії є те, що в цьому випадку підкореневий вираз у  $\Psi_1$  і  $\Psi_2$  може виявитися від'ємною величиною, тобто

$$(b_2 - a_1)^2 + 4a_2b_1 < 0.$$

Якщо такий випадок має місце, то  $\Psi_1$  і  $\Psi_2$  можна подати у комплексному вигляді

$$\Psi_1 = \phi + j\Psi, \quad \Psi_2 = \phi - j\Psi,$$

де

$$\phi = (b_2 + a_1)/2, \quad \Psi = \sqrt{|(b_2 - a_1)^2 + 4a_2b_1|}$$

У цьому випадку зміна температур  $\Theta_1$  і  $\Theta_2$  уздовж теплообмінника буде мати характер гармонійних коливань.

У випадку, коли  $\Psi_1$  і  $\Psi_2$  дійсні в режимі протитечії, повні зміни температур у потоках теплоносіїв, що охолоджуються і нагріваються, проходженням через теплообмінник дорівнюють:

$$\Delta\Theta_1 = \Theta_1|_{x=0} - \Theta_1|_{x=1} = \frac{C_1}{b_1}(\Psi_1 - b_2)(1 - e^{\Psi_1}) + \frac{C_2}{b_1}(\Psi_2 - b_2)(1 - e^{\Psi_2}),$$

$$\Delta\Theta_2 = \Theta_2|_{x=0} - \Theta_2|_{x=1} = C_1(1 - e^{\Psi_1}) + C_2(1 - e^{\Psi_2}).$$

Результати обчислювального експерименту наведено на рис.2-4.

Як видно із рис.2, де показано графіки зміни температур на виході з теплообмінника залежно від його довжини, для найкращого використання термоелектричного теплообмінного апарата необхідно виходити із вимог до нього. Наприклад, якщо потрібно одержати більш глибоке охолодження за однієї й тієї ж величини струму, то необхідно використовувати довшу ТЕБ, а коефіцієнт заповнення нижчий. При цьому вигреш в економії ТЕ порівняно з випадком, коли ними покрита вся поверхня ( $\xi = 1$ ), досить відчутний. Із графіка випливає, що за  $\xi = 1$  максимальна довжина ТЕБ у теплообмінному апараті для зазначених вище умов дорівнює 1.1 м, а рідина охолоджується при цьому з 318 К до 312 К. Площа поверхні ТЕ в цьому випадку  $S_1 = L \cdot \xi = 1.1L$  м<sup>2</sup>. Коли  $\xi = 0.2$ , довжина ТЕБ в теплообмінному апараті, за якої досягається максимально можливе охолодження рідини, дорівнює 3.6 м. В цьому випадку теплоносіїв охолоджується з 318 К до 308 К, площа поверхні ТЕ при цьому  $S_2 = 0.38$  м<sup>2</sup>.

Якщо тепер порівняти ці два випадки, то охолодження рідини на виході в другому випадку більш глибоке, ніж у першому. Крім того, площа поверхні у другому випадку менша від площі в першому, тобто  $S_2 < S_1$ , що означає економію матеріалу ТЕ та електричної енергії, яка витрачається.

На рис. 3 показано графіки зміни граничних довжин ТЕБ залежно від коефіцієнта заповнення, тобто тих довжин, за яких температури рідин на виході з теплообмінника рівні між собою. Із наведених даних видно, що чим більша різниця температур теплоносіїв на вході в теплообмінник, тим більша довжина ТЕБ, необхідна для утримання режиму інтенсифікації. Графіки мають

монотонно спадний характер залежно від коефіцієнта заповнення. Чим більша різниця температур теплоносіїв на вході, тим різкіше спадають функції  $L = L(\xi)$  за постійного струму живлення  $I = 5A$ .

На рис. 4 наведено графіки залежності граничних довжин ТЕБ у режимі інтенсифікації від коефіцієнта заповнення за різних струмів живлення та постійної різниці температур теплоносіїв на вході в теплообмінник. Функції  $L = L(\xi)$  також мають монотонно спадний характер. При цьому чим більше значення струму живлення, тим менша довжина ТЕБ для утримання режиму інтенсифікації.

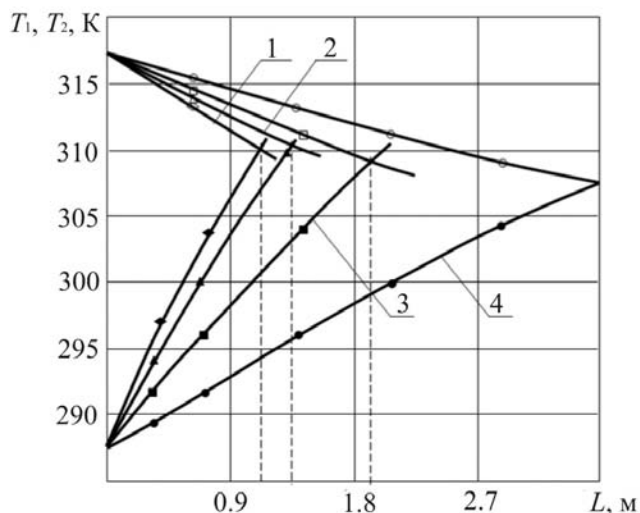


Рис. 2. Зміна температур рідин на виході із теплообмінника залежно від довжини за різних коефіцієнтів заповнення (1 –  $\xi = 1$ ; 2 –  $\xi = 0,8$ ; 3 –  $\xi = 0,5$ ; 4 –  $\xi = 0,2$ ;  $I = 10 A$ ).

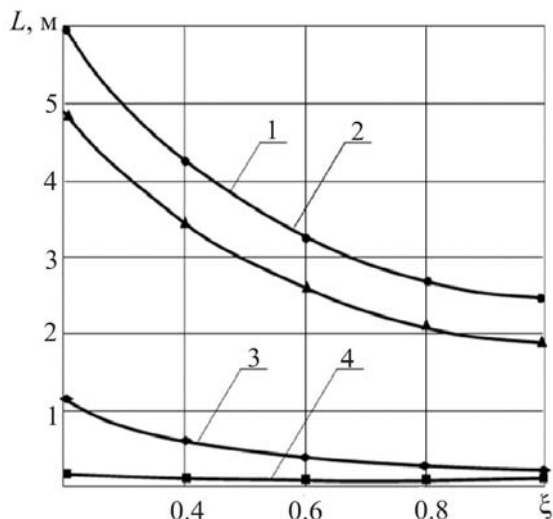


Рис. 3. Залежності граничних довжин ТЕБ в режимі інтенсифікації від коефіцієнта заповнення за різних температур (1 –  $T^H = 327K$ ; 2 –  $T^H = 318K$ ; 3 –  $T^H = 297K$ ; 4 –  $T^H = 293K$ ;  $T^H_2 = 287K$ ;  $I = 5A$ ).

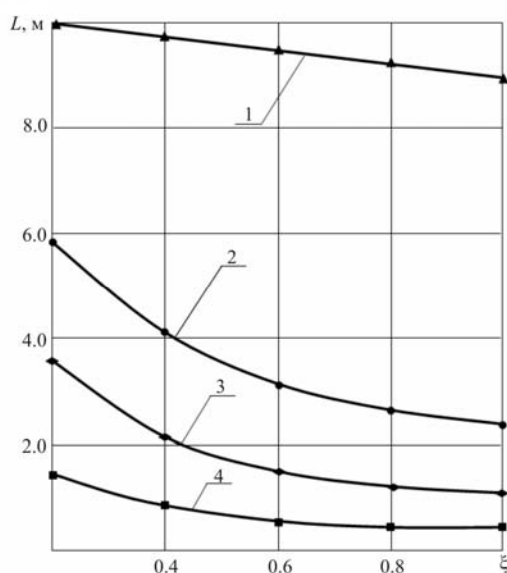


Рис. 4. Залежності граничних довжин ТЕБ в режимі інтенсифікації від коефіцієнта заповнення за різних струмів живлення (1 –  $I = 1A$ ; 2 –  $I = 5A$ ; 3 –  $I = 10A$ ; 4 –  $I = 20A$ ;  $T^H_1 = 318 K$ ;  $T^H_2 = 287K$ ).

Аналіз результатів розрахунків показує, що величина струму, за якого ще можлива робота теплообмінника в режимі інтенсифікатора, суттєво залежить від різниці температур теплоносіїв на вході в теплообмінник. Чим вища ця різниця, тим більшою є величина струму режиму інтенсифікатора за інших рівних параметрів.

Наведені результати розрахунків холодильного коефіцієнта  $\varepsilon(v)$ , коефіцієнта перетворення  $\mu(v)$  і температур теплоносіїв на виході з теплообмінників в 1 м і 0.5 м,  $T_{1\text{вх}}=45^\circ\text{C}$ ,  $T_{2\text{вх}}=14^\circ\text{C}$ , де  $T_{1\text{вх}}$ ,  $T_{2\text{вх}}$  – температури на вході теплоносіїв, що охолоджуються та нагріваються. Згідно з цими даними чим більший коефіцієнт заповнення, тим менша область зміни струму для режиму інтенсифікації. Більш глибокого охолодження можна досягти в режимі інтенсифікації меншими струмами, але за більших значень коефіцієнта заповнення  $\xi$ . За менших значень  $\xi$  такого охолодження може зовсім і не бути, тому що сильне збільшення струму призводить до подальшого нагрівання охолоджуваного теплоносія. Що стосується теплоносія, який нагрівається, то за того ж самого значення струму більш сильне нагрівання відбувається за малих значень коефіцієнта  $\xi$ . Порівняння холодильних коефіцієнтів або коефіцієнтів перетворення показує, що за інших рівних умов ці коефіцієнти вищі в теплообміннику з меншою довжиною. Якщо розглядається той самий теплообмінник з різними значеннями  $\xi$ , то вони вищі для менших значень  $\xi$ .

Наведені результати розрахунків  $\varepsilon(v)$ ,  $\mu(v)$  і температур теплоносіїв на виході з теплообмінника за довжини ТЕБ 0.24 м,  $T_{1\text{вх}}=30^\circ\text{C}$ ,  $T_{2\text{вх}}=21^\circ\text{C}$ . У цьому випадку області значень струмів, за яких дотримується режим інтенсифікації для різних значень коефіцієнта заповнення, близькі один до одного. Причому спадання цих областей повільніше, ніж для випадку більш високих різниць температур теплоносіїв на вході в теплообмінник. А температури на виході з теплообмінника для граничних значень струмів у режимі інтенсифікації відрізняються один від одного не більше, ніж на один градус.

### Експериментальні дослідження теплообмінного апарата

Для здійснення натурних досліджень теплообмінного апарата був розроблений експериментальний стенд, принципову схему якого наведено на рис.5.

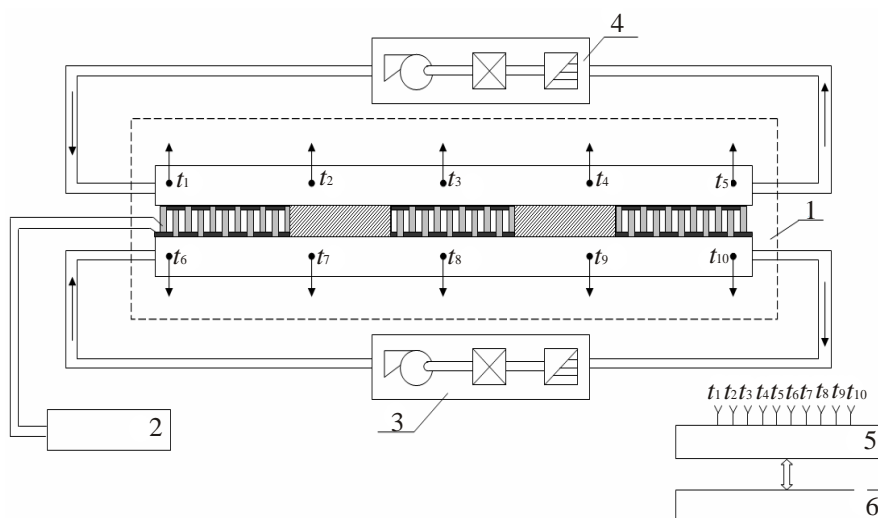


Рис. 5. Принципова схема експериментального стенда.

Теплообмінний апарат 1 підключений до контурів циркуляції холодо- і теплоносія, у ролі яких

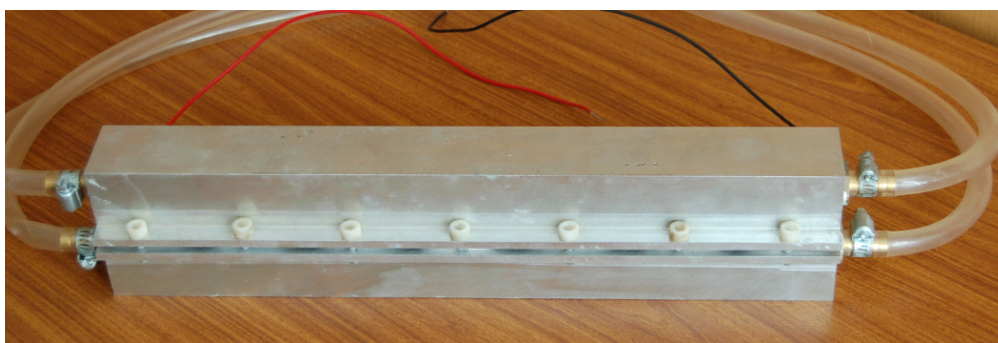
використовується вода, а також до регульованого джерела постійного струму 2. Ультратермостати 3 і 4 підтримують задані температури холодо- і теплоносіїв на входах теплообмінного апарата з точністю 0,1°C та забезпечують їх циркуляцію. Витрати по контурах холодо- і теплоносіїв регулюються вентилями, розташованими на відповідних ультратермостатах.

Реєстрація поточних значень температур здійснюється вимірювальним комплексом ИРТМ2402/МЗ - 5, який підключається до ПЕОМ - 6 і передбачає можливість одночасного приєднання до 24 датчиків температури.

Об'єктом експериментальних досліджень був термоелектричний теплообмінний апарат проточного типу (рис.6), що складається із двох сталевих труб із внутрішнім діаметром 7 мм і довжиною 250 мм. Зовнішня поверхня труб відшліфована у вигляді чотиригранника 20×20 мм. Як ТЕБ використано уніфіковані термоелектричні модулі (ТЕМ) типу БПТМ і ТЕМ, розроблені в лабораторії напівпровідникових термоелектричних приладів та приладів Дагестанського державного технічного університету.

Електрично послідовно підключені між собою ТЕМ і теплові містки через теплопровідну пасту КПТ затиснуті між двома трубами.

Для виключення теплообміну із зовнішнім середовищем уся конструкція розміщена в пінопластовий кожух. На бічних гранях по довжині труб установлені мідь-константанові термопари  $t_1 - t_{10}$ , опорні спаї яких термостабілізовані за 0°C у посудині Дьюара.



*Рис. 6. Зовнішній вигляд термоелектричного теплообмінного апарата з тепловими містками.*

Експериментальні криві розподілу температури по довжині були отримані шляхом вимірювання температур у різних точках теплообмінного апарата:

- за різних коефіцієнтів заповнення напівпровідниковими модулями,
- за різних струмів, що протікають через ТЕ,
- для різних матеріалів теплових містків.

Усі експерименти здійснювалися за заданими постійними температурами і витратах холодо- і теплоносіїв на входах конструкції. Для цього в теплообмінний апарат спочатку встановлювалися тільки напівпровідникові ТЕМ кількістю 10 шт. (100% заповнення ТЕМ, коефіцієнт заповнення  $\xi=1$ ).

За допомогою ультратермостатів підтримувалися задані витрати й температури холодо- і теплоносіїв на входах. Після стабілізації режиму ультратермостатів (через 15-20 хвилин) на вимірювальному комплексі запускалася програма циклічного опитування термопар з наступним виводом значень температури на ПЕОМ. Одночасно теплообмінний апарат підключався до джерела постійного струму, за вимірювальним приладом якого встановлювалася необхідна величина струму живлення.



Зміна коефіцієнта заповнення здійснювалася в такий спосіб: після складання обладнання відключалася частина ТЕМ, модулі, що залишилися, розсовувалися й розподілялися по довжині труби рівномірно, між ТЕМ установлювалися теплові містки, виготовлені з відповідного матеріалу (мідь, алюміній, сталь), сумарна площа яких була рівною сумарній площі вилучених модулів. Для цього було виготовлено різні типорозміри теплових містків. Наприклад, для одержання 80% заповнення ( $\xi=0,8$ ), з 10 ТЕМ віддалялися два модулі, замість яких установлювали 2 теплових містки, кожний з яких був рівний 1/4 частини площі модуля.

На основі експериментального стенда було здійснено низку дослідів, що дають можливість судити про прийнятність розробленої математичної моделі термоелектричного теплообмінного апарата з тепловими містками на практиці.

Основним завданням під час здійснення експериментальних досліджень дослідного зразка теплообмінного апарата було визначення залежності температури в контрольних точках, зазначених вище, від величини струму живлення ТЕ, коефіцієнта заповнення, матеріалу теплових містків.

На рис. 7 показано результати експериментальних досліджень (кружки) теплообмінного апарата в стаціонарних режимах роботи за різних коефіцієнтів заповнення ТЕМ і для порівняння результати теоретичних розрахунків (суцільна лінія). У розрахунках використано паспортні дані на теплофізичні властивості, використаних у конструкції, напівпровідникової речовини й характеристики ТЕМ, геометричні параметри віток, величини контактних електричних і теплових опорів.

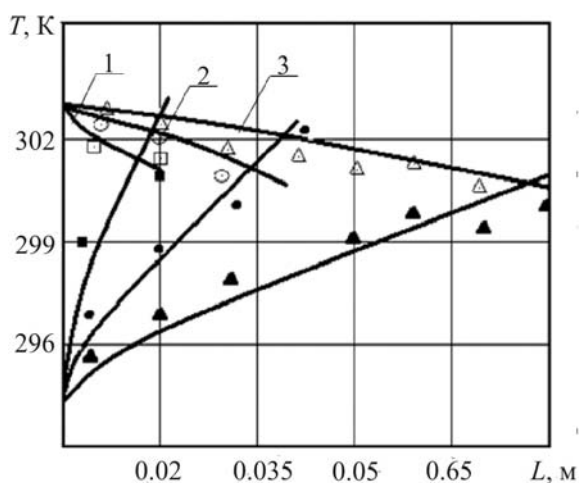


Рис. 7. Експериментальні та теоретичні залежності температур теплоносіїв на виході із теплообмінного апарата від довжини за різних коефіцієнтів заповнення (1 -  $\xi=1.0$ ; 2 -  $\xi=0.5$ ; 3 -  $\xi=0.2$ ; струм живлення ТЕМ, 8 А).

Теплоємності труб у розрахунках не враховувалися. При зіставленні даних з результатами можна побачити, що результати розрахунків і експериментальні дані відповідають один одному. Максимальні кількісні розбіжності теоретичних розрахунків з експериментальними результатами не перевищують 12%, спостерігалися в початковій ділянці трубопроводів, що можна вважати задовільним. Із малюнка видно, що зі збільшенням коефіцієнта заповнення криві розподілу температур зміни температур змінюються більш круто, тобто теплообмінний апарат працює ефективніше.

На рис. 8 наведено криві розподілу температури по довжині теплообмінного апарата за коефіцієнта заповнення рівному  $\xi=0.2$ , для теплових містків, виготовлених з різних матеріалів – міді,

алюмінію та сталі. Із наведених даних видно, що ефективність роботи теплообмінного апарата не суттєво залежить від матеріалу теплових містків, що підтверджується й результатами чисельного експерименту. Однак все-таки ефективнішим є використання мідних теплових містків, що пов'язано з більш високим значенням коефіцієнта теплопровідності цього матеріалу.

На рис. 9 наведено залежність довжини ТЕБ від струму живлення під час роботи обладнання в режимі інтенсифікації за коефіцієнта заповнення  $\xi=0.5$  для теплових містків, виготовлених з міді. Як видно, збільшення струму живлення зменшує ділянку теплообмінника, де ТЕБ працює в режимі інтенсифікації теплообміну. Наприклад, з підвищенням струму на 0.5 А для даних умов зазначена довжина зменшується на 1.8 см.

На рис. 9 наведено експериментальні залежності зміни температури від часу в точці на відстані 1.5 см від початку входу в теплообмінний апарат. Як випливає із наведених даних, стабілізація настає приблизно через 27 хв. після включення ТЕБ.

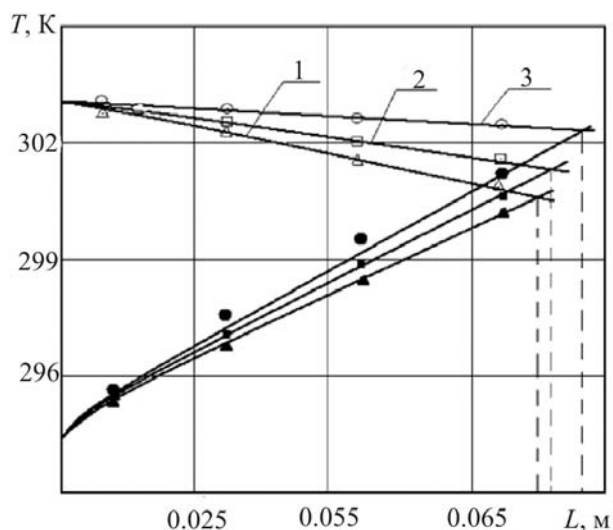


Рис. 8. Експериментальні та теоретичні залежності температур теплоносіїв на виході із теплообмінного апарата від довжини для теплових містків із різних матеріалів (1 – мідь, 2 – алюміній, 3 – сталь; струм живлення ТЕМ 1.8 А).

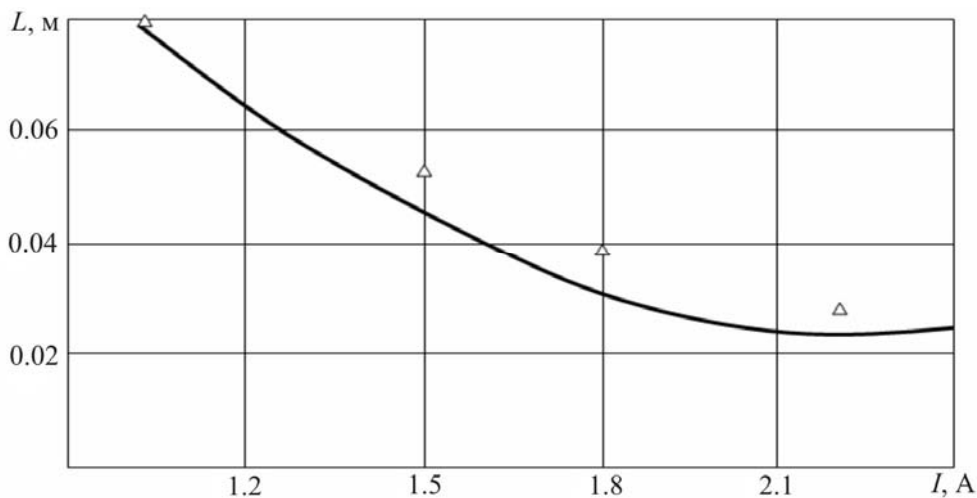


Рис. 9. Залежність граничної довжини ТЕБ в теплообмінному апараті від струму живлення ( $\xi=0.5$ , матеріал теплового містка - мідь).

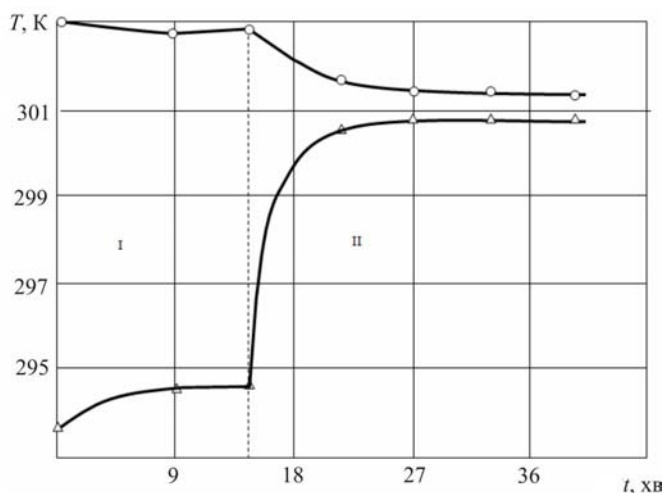


Рис. 10. Залежність температур теплоносіїв від часу без (область I) та з ввімкненою (область II) ТЕБ ( $\zeta=0.8$ ,  $L=0.015$  м;  $I=1.8$  А, матеріал теплового мостка – мідь).

В цілому результати експериментальних досліджень підтверджують достовірність розробленої математичної моделі.

## Висновки

На основі здійснених досліджень можуть бути зроблені такі висновки:

1. На основі результатів проведеного огляду методів інтенсифікації теплообміну, а також конструкцій теплообмінних апаратів показано, що для інтенсифікації теплообміну між двома потоками теплоносіїв доцільним є застосування термоелектричних перетворювачів енергії.
2. Запропоновано принцип побудови термоелектричних теплообмінних апаратів рекуперативного типу, що полягає в сполученні можливостей теплопередачі через високотеплопровідний матеріал (тепловий місток) та інтенсифікації теплообміну за використання ТЕБ.
3. Розроблено математичну модель для розрахунків теплового режиму термоелектричних теплообмінних апаратів рекуперативного типу, виконаних разом з тепловими мостками різної конфігурації.
4. Здійснено розрахунки основних характеристик термоелектричного теплообмінного апарата з тепловими мостками, у тому числі зміна температури теплоносіїв залежно від коефіцієнта заповнення, величини струму живлення ТЕБ, а також довжини теплообмінного апарата.
5. Доведено адекватність розробленої математичної моделі експериментальним шляхом; зіставлення експериментальних і розрахункових даних показало, що їх розбіжність не перевищила припустимих значень.

## Література

1. Каримов К.Ф. Оценка эффективности теплообменных аппаратов холодильных машин / К.Ф. Каримов // Вестник МАХ. – 2006. – №4. – С.14-16.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии./ Л.И. Анатычук // Киев-Черновцы: Институт термоэлектричества. – 2003. – С.376
3. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи / Т.А. Исмаилов // СПб.: Политехника. – 2005.

Надійшла до редакції 15.06.2015