

ШАПОВАЛ А. А., к.т.н., доц.; ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф.; САУЛІНА Ю. В., асп.;
РОМАНЧУК Б. В., магістрант; ЛЕВКІВСЬКА О. М., магістрант; ШАПОВАЛ Арт. А., інж.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

КИПІННЯ ВОДИ ТА ОРГАНІЧНИХ РІДИН НА ПОРИСТИХ ПОВЕРХНЯХ ТЕПЛОВИХ ТРУБ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДІАПАЗОНУ

Представлено результати експериментальних досліджень впливу основних характеристик і параметрів пористих металевих волокнистих структур на інтенсивність двофазного теплообміну при кипінні води та органічних рідин на пористих поверхнях. Отримано спрощені емпіричні формули для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі для зон нагрівання теплових труб і термосифонів, що функціонують у низькотемпературних діапазонах.

Ключові слова: двофазний теплообмін, кипіння, пориста поверхня, тепла труба, термосифон.

© Шаповал А. А., Панов Є. М., Сауліна Ю. В., Романчук Б. В., Левківська О. М., Шаповал Арт., 2014.

Постановка проблеми. Розвиток хіміко-енергетичного обладнання потребує застосування ефективних двофазних теплоперевальних пристроїв нового типу. Ними є теплові труби (ТТ) та їхні різновиди – термосифони (ТС) [1, 2]. За комплексом теплофізичних та експлуатаційних параметрів вони переважають класичні рекуператори (за умови однакових типорозмірів) [3, 4]. Якість і теплофізичні характеристики ТТ і ТС безпосередньо залежать від типів та параметрів металопористих матеріалів [5], що є важливими конструктивними елементами ТТ як капілярні структури (транспортери робочих рідин у ТТ) та інтенсифікатори двофазного теплообміну в зонах нагрівання (кипіння) та охолодження (конденсації) ТТ [6].

Теплофізичні характеристики ТТ і ТС залежать від структурних та теплофізичних характеристик металопористих капілярних структур (МПКС) [5, 6]. Ними є пористість $\Theta_{\text{кк}}$, ефективний діаметр пор $D_{\text{еф}}$ (інколи його називають середнім діаметром), розміри фракцій (для волокнистих КС – довжина волоконця $L_{\text{в}}$ та їх діаметр $d_{\text{в}}$), теплопровідність металу волокон $\lambda_{\text{мет}}$ і пористої структури $\lambda_{\text{кк}}$. Пористість $\Theta_{\text{кк}}$ і каркасна теплопровідність $\lambda_{\text{к}}$ пористих КС істотно впливають на теплообмін у ТТ. Зі збільшенням $\lambda_{\text{к}}$ інтенсивність двофазного теплообміну суттєво зростає, а термічний опір теплових труб $R_{\text{ТТ}}$ – зменшується. Визначення впливу пористості $\Theta_{\text{кк}}$ на коефіцієнт тепловіддачі α , таким чином, є важливою інженерною задачею.

Метою праці є визначення впливу пористості металоволокнистих капілярних структур, припечених до суцільних поверхонь нагрівання, на інтенсивність двофазного теплообміну в режимах, типових для роботи теплових труб і термосифонів.

Виклад основного матеріалу. Використано експериментальну установку, опис якої наведено в праці [7] (рис. 1). Створено зразки МПКС із такими характеристиками: $\Theta_{\text{кк}} = 35...95\%$, $\lambda_{\text{к}} = 0,2...60$ Вт/(м · К); товщина КС $\delta_{\text{кк}} = 0,2...4,0$ мм; $L_{\text{в}} = 3...12$ мм; $d_{\text{в}} = 20...70$ мкм; матеріал КС – мідь і корозійностійка сталь 09Х18Н10Т. Пористі матеріали (структури), виготовлені попередньо, припікали до мідних підкладок.

Дослідний зразок МПКС 6 (циліндричної форми) із попередньо припеченою до мідної підкладки пористою волокнистою структурою припаювали (легкоплавким припоєм) до торця мідного циліндричного нагрівника 3. До внутрішнього торця підкладок приєднували (припаюванням) шість мідь-константових термопар, покази яких осереднювали. Тепловий потік W , створюваний омичним дрововим нагрівником 2 (або 3), регулювали за допомогою автотрансформатора і крізь циліндричний стрижень-нагрівник 1 підводили до дослідного зразка 6. Тепловий потік вимірювали високоточним ваттметром, температуру – цифровим мікрровольтметром. Неробочі поверхні циліндрів ізолювали склострічкою і базальтовим волокном 20. Для забезпечення достовірності результатів виконували тарувальні досліди з використанням гладких технічних мідних поверхонь; результати тарування порівнювали з відомими у літературі даними. Результати тарування засвідчили, що похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі не перевищує 7...12% (залежно від підведеного питомого теплового потоку $q = 0...2500$ кВт/м²).



1 – блок підведення теплоти до зразка; 2, 3, 4, 15 – «малий», основний, охоронний і допоміжний нагрівники;
 5 – фторопластовий фланець; 6, 17 – зразки пористого матеріалу; 7 – скляний циліндр; 8, 18 – рідина;
 9 – кришка; 10 – штуцери; 11 – терморезистори; 12 – диференціальна терморезисторна пара; 13, 14 – алундовий
 і керамічний кожухи; 16 – циліндр; 19 – фланець; 20 – ізоляція

Рис. 1 – Конструкція робочих ділянок експериментальної установки для дослідження термосифонів (I) і теплових труб (II) [7]

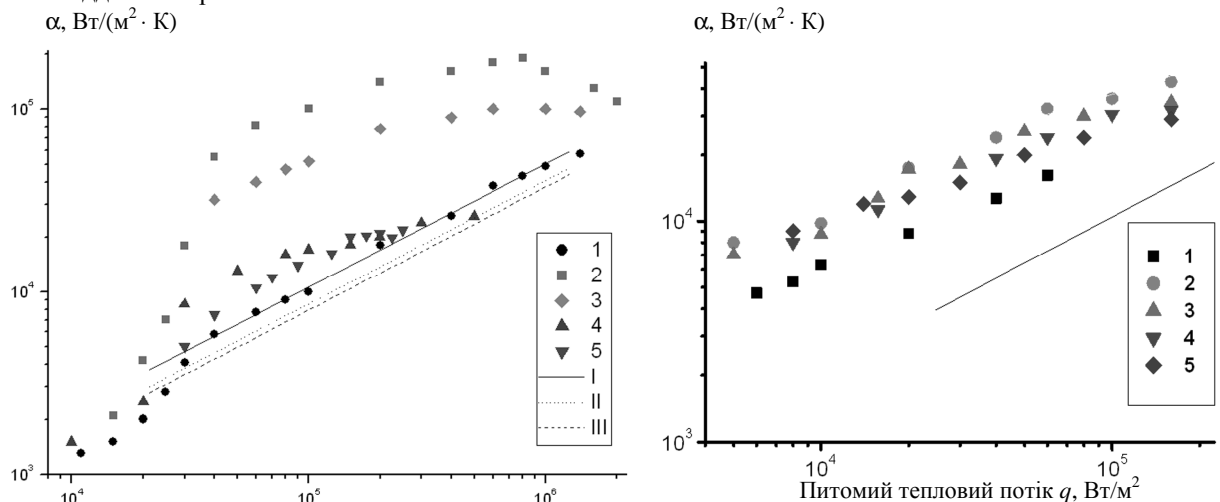
Аналіз отриманих результатів свідчить, що мідні волокнисті структури середньої пористості (40...50 %) у діапазоні товщин 0,3...1,0 мм дозволяють забезпечити найвищі коефіцієнти тепловіддачі α (рис. 2).

Зростання інтенсивності тепловіддачі під час кипіння на пористих поверхнях порівняно з гладкими технічними поверхнями можна пояснити, застосувавши запропоновану в праці [8] напівемпіричну модель двофазного теплообміну. Сутністю моделі є гіпотеза про істотний вплив теплофізичних властивостей капілярної структури (зокрема її теплопровідності) на межові умови при утворенні бульбашок у порах та при формуванні парових каналів (відсутніх при кипінні на гладких поверхнях). Експериментальні дані для умов кипіння під час вільного руху води та ацетону задовільно узагальнюються емпіричною формулою

$$\alpha = c q^n \delta_{\text{кк}} \lambda_{\text{кк}}^{0.6} [(1 - \Theta_{\text{max}})/(1 - \Theta)]^{0.5} D_{\text{еф}}^{0.15} [\lambda_{\text{рід}}^2 / (v_{\text{рід}} \sigma_{\text{рід}} T_s)]^{0.33}, \quad (1)$$

де коефіцієнт пропорційності $c = 2 \cdot 10^4$; $n = 0,15 \delta_{\text{кк}}^{-0.14}$, коли $\delta_{\text{кк}} = 0,1 \dots 0,8$ мм, і $n = 0,0535 \delta_{\text{кк}}^{-0.28}$, коли $\delta_{\text{кк}} = 0,8 \dots 10$ мм. Фізичні величини підставляють у формулу в безрозмірному вигляді.

За умов капілярного транспорту рідини інтенсивність теплообміну є гіршою порівняно з попередніми умовами (рис. 3). Кипіння рідини у порах відбувається у відносно невеликому діапазоні питомого теплового потоку. Поки капілярна структура здатна підсмоктувати до зони нагрівання певну кількість рідини (необхідної для існування бульбашок у крупних порах), пароутворення схоже на кипіння (але специфічне). Із збільшенням питомого теплового потоку (без допомоги сил гравітації) у капілярній структурі не вистачає рідини, необхідної для інтенсивного утворення бульбашок. У цьому випадку меніски рідини заглиблюються у пористу структуру, а на поверхнях капілярів, вільних від рідини, утворюється рідинна мікроплівка. Інтенсивне випаровування мікроплівки дещо компенсує нестачу рідини, залишаючи коефіцієнти тепловіддачі α порівняно високими.



Питомий тепловий потік q , Вт/м²

1 – гладка поверхня; мідні МПКС (40 %, 0,8 мм);
2 – припечена, 3 – притиснута; корозійностійкі КС
(сталь): 4 – припечена (88 %, 0,8 мм), 5 – притиснута
(84 %, 0,4 мм); I-III – гладка поверхня (різні автори)

Рис. 2 – Інтенсивність теплообміну при кипінні води на поверхнях із МПКС за умов вільного руху рідини та атмосферному тиску

За таких умов розрахункова формула (аналогічна наведеній вище):

$$\alpha = cq^{0,6} \delta_{\text{кк}}^m \lambda_{\text{кк}}^{0,25} [(1 - \Theta_{\text{max}})/(1 - \Theta)]^{0,15} D_{\text{еф}}^{0,15} [\lambda_{\text{рід}}^2 / (v_{\text{рід}} \sigma_{\text{рід}} T_s)]^{0,33}. \quad (2)$$

де $c = 200$, $m = 0,65$, коли $\delta_{\text{кк}} = 0,4 \dots 1,3$ мм; $c = 0,5$, $m = -0,2$, коли $\delta_{\text{кк}} > 1,3$ мм; $\lambda_{\text{кк}} = 1,0 \dots 70,0$ Вт/(м · К); $\Theta_{\text{кк}} = 40 \dots 91$ %; $D_{\text{еф}} = 20 \dots 230$ мкм.

Застосування формул (1) і (2) для інженерних розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі в зонах нагрівання ТТ і ТС ускладнене внаслідок складності визначення симплексу $(1 - \Theta_{\text{max}})/(1 - \Theta)$. Простішим є коректне застосування замість нього пористості $\Theta_{\text{кк}}$. Зокрема, для вільного руху рідин на поверхнях із МПКС можна застосовувати формулу:

$$\alpha = cq^w \delta_{\text{кк}} \lambda_{\text{кк}}^{0,6} \Theta^w D_{\text{еф}}^{0,15} [\lambda_{\text{рід}}^2 / (v_{\text{рід}} \sigma_{\text{рід}} T_s)]^{0,33}, \quad (3)$$

де $w = 2,4\Theta_{\text{кк}}$ (коли $\Theta_{\text{кк}} = 35 \dots 80$ %).

Похибка розрахунку α , порівняно з формулою (1), не перевищує ± 3 % (для $\Theta_{\text{кк}} = 35 \dots 80$ %). При цьому відношення довжини волокон до діаметра пор (коли $L_b/d_b = 43 \dots 150$) на точність майже не впливає.

Складніше спростити формулу (2), оскільки нехтувати відношенням L_b/d_b тут не бажано. При капілярному транспорті рідин у неї замість симплексу $[(1 - \Theta_{\text{max}})/(1 - \Theta)]^{0,15}$ також підставляють Θ^w , а w визначають за номограмами (для $\Theta_{\text{кк}} = 35 \dots 80$ % – рис. 4, а; для $\Theta_{\text{кк}} = 80 \dots 90$ % – рис. 4, б). Похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі α із застосуванням модифікованої формули (2) не перевищують ± 10 %, що можна вважати прийнятним для інженерної практики.

Висновки. Виконані дослідження дозволяють кількісно оцінити вплив характеристик і параметрів металоволокнистих пористих матеріалів (капілярних структур) на інтенсивність теплообміну в зонах нагрівання ефективних двофазних теплопередавальних пристроїв – теплових труб і термосифонів. Результати досліджень узагальнено у вигляді емпіричних формул, що дозволяють розраховувати коефіцієнти тепловіддачі α в зонах нагрівання теплових труб і термосифонів, в яких застосовують високопроникні металеві пористі матеріали.

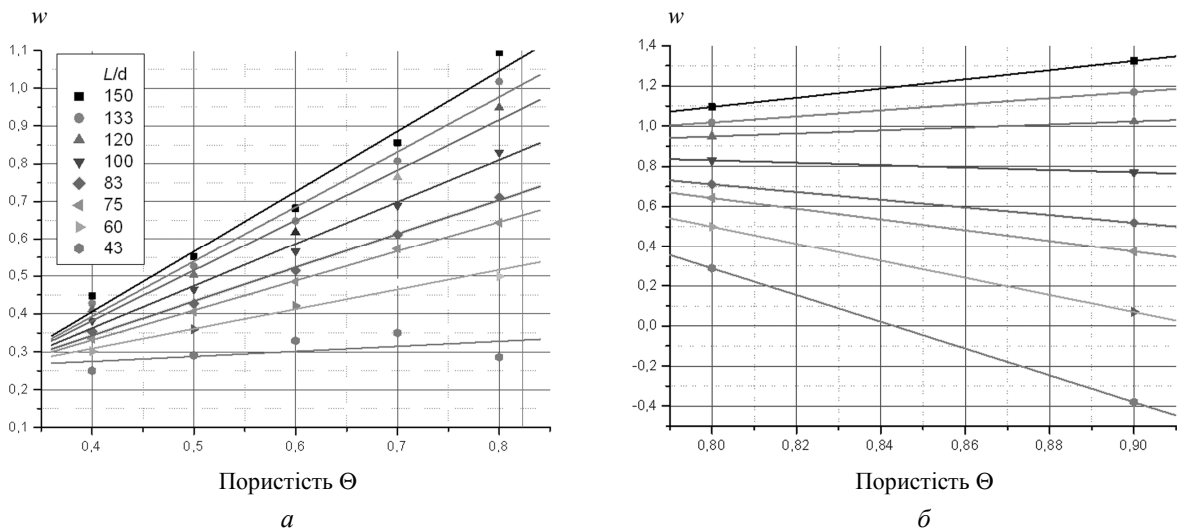


Рис. 4 – Номограми для визначення впливу пористості МПКС на інтенсивність теплообміну в зонах нагрівання теплових труб: а – $\Theta_{\text{кк}} = 0,35 \dots 0,80$; б – $\Theta_{\text{кк}} = 0,8 \dots 0,9$

Список використаної літератури

1. *Спелдинг Д. Б.* Справочник по теплообменникам : в 2 т. / пер. с англ. под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 2. – 352 с.
2. *Чи С.* Тепловые трубы. Теория и практика / С. Чи. – М. : Машиностроение, 1981. – 208 с.
3. *Васильев Л. Л.* Теплообменники на тепловых трубах / Л. Л. Васильев. – Минск : Наука и техника, 1981. – 144 с.

4. *Гершуни А. Н.* Системы теплопередачи испарительно-конденсационного типа для атомных энерготехнологий / А. Н. Гершуни, А. П. Нищик, Е. Н. Письменный. – К. : Наук. думка, 2012. – 223 с.
5. *Косторнов А. Г.* Проницаемые металлические волокновые материалы / А. Г. Косторнов. – К. : Техніка, 1983. – 128 с.
6. *Семена М. Г.* Тепловые трубы с металловолокнистыми структурами / М. Г. Семена, А. Н. Гершуни, В. К. Зарипов. – К. : Техніка, 1984. – 282 с.
7. *Вплив умов приєднання пористих структур до суцільних поверхонь на двофазний теплообмін та контактний термічний опір / А. А. Шаповал, Є. М. Панов, К. І. Скрипка та ін. // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2012. – № 1 (19). – С. 5–9.*
8. *Шаповал А. А.* К моделированию процессов теплообмена при кипении на поверхностях с неупорядоченными пористыми структурами / А. А. Шаповал // ММФ-2000. – Т. 5 : Тепломассообмен в двухфазных системах. – С. 198-204.
A Study of Heat Transfer in Heat Pipe Evaporators with Metal Fiber Capillary Structures / A. G. Kostornov, A. A. Shapoval, M. I. Lalor et al. // J. of Enhanced Heat Transfer. – 2012. – V. 19 (1). – P. 43-52.