

## ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 537.311.4 : 629.7.048.7

ШАПОВАЛ А. А., к.т.н., с.н.с.; ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф.; СКРИПКА К. І., магістрант;  
САУЛІНА Ю. В., інж.; ШАПОВАЛ Арт. А., інж.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

### ВПЛИВ УМОВ ПРИЄДНАННЯ ПОРИСТИХ СТРУКТУР ДО СУЦІЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ДВОФАЗНИЙ ТЕПЛООБМІН ТА КОНТАКТНИЙ ТЕРМІЧНИЙ ОПІР

Наведено результати експериментальних досліджень впливу способів приєднання металевих волокнистих капілярних структур до суцільних технічних поверхонь на контактний термічний опір та інтенсивність теплообміну під час кипіння води. Одержано емпіричні формули для розрахунку інтенсивності двофазного теплообміну та контактного термічного опору в зонах нагрівання теплових труб і термосифонів із пористими волокнистими структурами.

**Ключові слова:** капілярні структури, пористі волокнисті структури, двофазний теплообмін, теплові труби, контактний термічний опір.

#### Постановка проблеми

Прогрес у розвитку вітчизняного енергозберігаючого обладнання та устаткування пов'язаний із розробкою і виробництвом теплообмінників-рекуператорів із тепловими трубами (ТТ) і термосифонами. Тепло трубні теплообмінники (ТТТ) мають технічні та експлуатаційні характеристики, що забезпечують ряд переваг порівняно з класичними рекуператорами. Прості за конструкцією, надійні й ремонтоздатні ТТ дозволяють ефективно утилізувати теплоту за відносно низької температури відпрацьованих газів.

Теплофізичні характеристики ТТ багато в чому залежать від досконалості капілярних структур (КС), що мають забезпечувати оптимальні гідродинамічні характеристики (швидке транспортування рідин-теплоносіїв до зон нагрівання) і високі теплофізичні параметри (високу інтенсивність двофазного теплообміну). Металоволокнисті КС, розроблені в Інституті проблем матеріалознавства НАН України, є одними з кращих сьогодні і здатні забезпечувати високі показники ТТ і, відповідно, ТТТ [1, 2].

Недостатньо досліджено вплив на процеси двофазного теплообміну (зокрема, процеси кипіння) умов контакту КС із корпусами ТТ. Проблема актуальна для технологій виробництва ТТ, тому що під час виготовлення теплових труб не завжди вдається досягнути ідеального контакту пористих КС із суцільними металевими корпусами-оболонками (остання умова забезпечується лише за якісних технологій спікання).

Щодо комплексних теплофізичних досліджень властивостей пористих проникних матеріалів нових типів, зокрема визначення їх теплопровідності (каркасної та ефективною) [1], слід зазначити, що актуальним є вивчення впливу фізичних характеристик капілярних структур на контактний термічний опір  $R_k$ .

Вплив на двофазний теплообмін теплопровідності металевих волокнистих матеріалів, що є перспективними капілярними структурами для теплових труб і термосифонів, вивчено у працях [2-5]. Водночас відсутні відомості про вплив характеристик КС на  $R_k$  у режимах передачі теплоти теплопровідністю. Між тим, термічні опори  $R_k$  у зонах теплопідведення й тепловідведення теплових труб і термосифонів є істотними для визначення сумарного термічного опору ТТ  $R_{\text{ТТ}}$ , знання якого дозволяє конструкторам упевнено прогнозувати технічні характеристики теплообмінників на основі теплових труб.

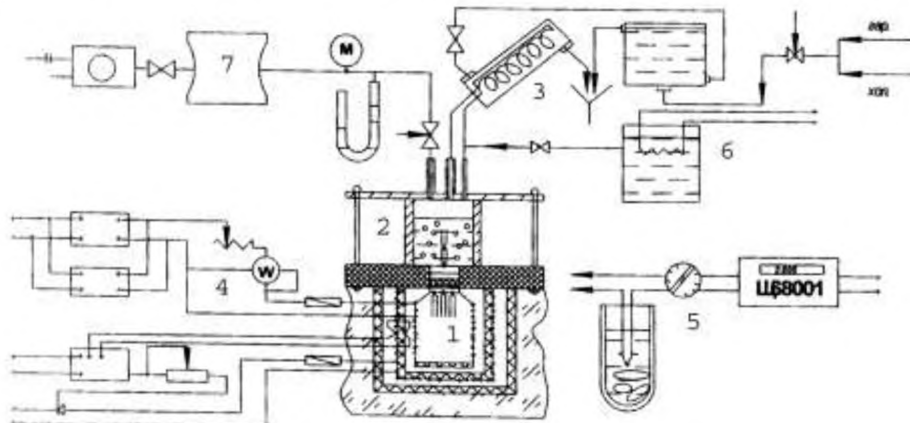
**Метою** статті є визначення впливу умов приєднання волокнистих капілярних структур із суцільними поверхнями нагрівання на інтенсивність двофазного теплообміну в режимах, типових для роботи теплових труб.

#### Методика досліджень

Використано експериментальну установку (рис. 1), створено ряд дослідних зразків металоволокнистих КС різної пористості  $\Theta_{\text{КС}}$ , коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\text{КС}}$  і товщини  $\delta_{\text{КС}}$ . Характеристики КС змінювали так: пористість – 50...95 %; коефіцієнт теплопровідності – 0,2...40 Вт/(м · К); товщина 0,5...5,0 мм;

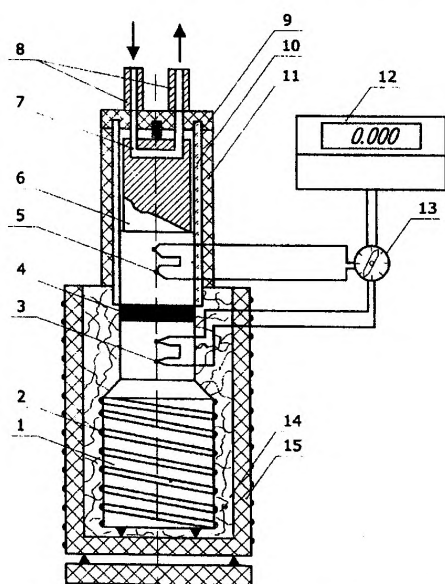
© Шаповал А. А., Панов Є. М., Скрипка К. І., Сауліна Ю. В., Шаповал Арт. А., 2012

матеріали – мідь і корозійностійка сталь 9Х18Н10Т. Ці характеристики забезпечили широкий діапазон зміни визначуваного контактного термічного опору  $R_k$ .



1 – блок підведення теплоти до зразка пористої структури; 2 – зона кипіння рідини на поверхні з пористою капілярною структурою; 3 – система конденсації пари; 4 – система підведення, регулювання й вимірювання електричної потужності; 5 – система вимірювання температури; 6 – система охолодження конденсату; 7 – система вакуумування й підтримання тиску

Рис. 1 – Схема експериментальної установки для дослідження теплообміну під час кипіння на поверхнях із пористими капілярними структурами



1 – мідний стрижень; 2 – основний електронагрівник;  
3, 5 – диференціальні термопари; 4 – дослідний зразок;  
6 – притискний пристрій; 7 – канал водяного охолодження;  
8 – штуцери підведення і відведення води; 9 – фланець; 10, 11 – теплоізольовані циліндри;  
12 – мілівольтметр; 13 – перемикач термопар;  
14 – термостійкий кожух; 15 – теплоізоляція

Рис. 2 – Експериментальна ділянка установки для дослідження теплопровідності пористих матеріалів і контактного термічного опору

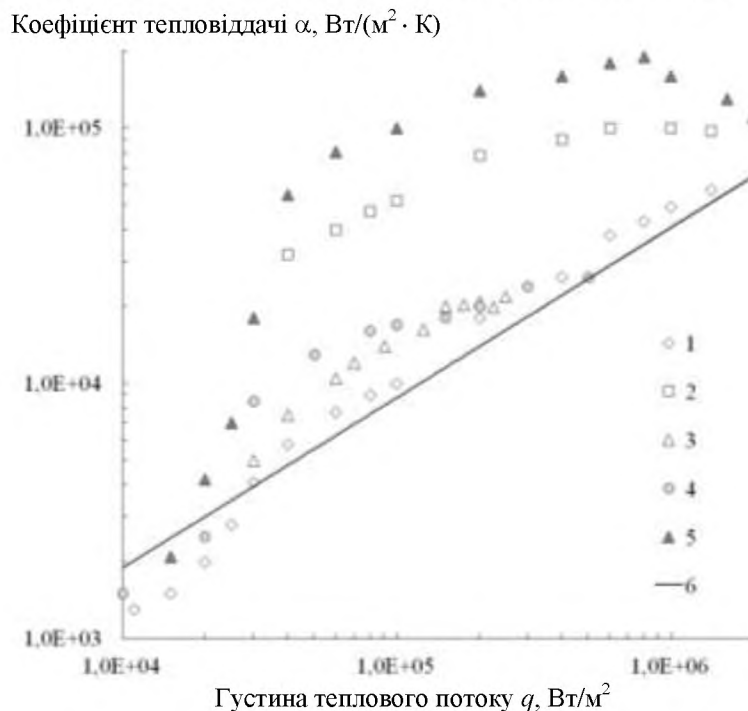
Оригінальне експериментальне обладнання (рис. 1 і 2) дозволяє досліджувати теплопровідність пористих матеріалів і капілярних структур на їх основі, а також вплив фізичних характеристик таких матеріалів на  $R_k$ .

Тепловий потік, створюваний омичним дровитим нагрівником 2, регулюється за допомогою автотрансформатора і крізь циліндричний стрижень 1 підводиться до дослідного зразка 4. Відведення теплоти забезпечує мідний циліндричний блок 6, охолодження якого здійснюється повітряним потоком (за відносно невеликої густини теплового потоку  $q$ ) або рідиною 7. Температуру вимірюють термопарами 3 і 5, встановленими за напрямом теплового потоку в контрольних мікроотворах у циліндрах із корозійностійкої сталі. Робочі спаї термопар розташовано в центрі циліндрів. Неробочі поверхні циліндрів ізолювано склострічкою й базальтовим волокном 15. Щоб забезпечити достовірність вимірів, виконано тарувальні досліди без КС і з еталонним металом (свинець) зі стабільним і відомим коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$ .

#### Результати досліджень

Дослідження здійснювали за умов вільного руху води на поверхнях (режим роботи термосифонів) та її капілярного транспортування (режим роботи теплових труб) за якісного і

погіршеного контакту МВКС із поверхнею нагрівання (рис. 3). Якісне приєднання КС, здійснюване припіканням, зменшує опір  $R_x$  на 25...35 % порівняно зі щільним приляганням неприпечених КС (рис. 4).



1 – мідні волокнисті КС ( $\Theta_{кс} = 40\%$ ;  $\delta_{кс} = 0,8$  мм); 2 – припечена КС; 3 – сталева притиснута КС;  
4 – припечена КС ( $\Theta = 88\%$ ;  $\delta = 0,8$  мм); 5 – притиснута КС ( $\Theta = 84\%$ ;  $\delta = 0,4$  мм);  
6 – кипіння води на гладкій технічній поверхні (літературні дані)

Рис. 3 – Вплив умов приєднання металоволокнистих пористих структур на інтенсивність двофазного теплообміну під час кипіння води за її вільного руху (режим роботи термосифонів)

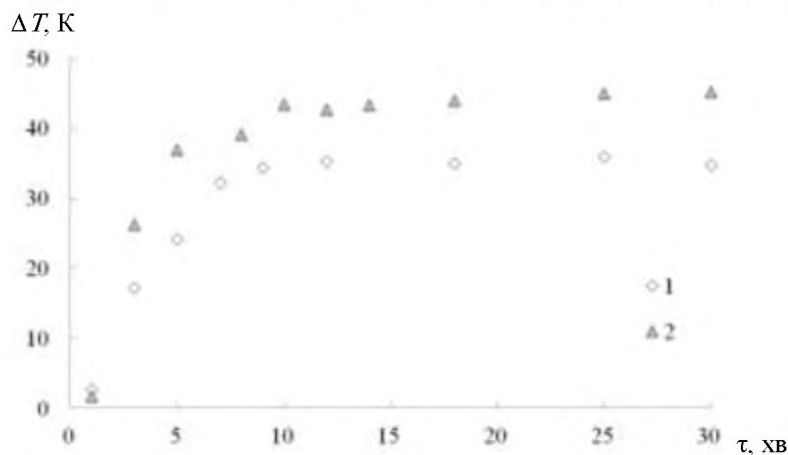


Рис. 4 – Експериментальні значення перепаду температур за умов припікання (1) і прилягання (2) мідної КС до технічно гладкої суцільної поверхні:  $\delta_{кс} = 0,5$  мм;  $\Theta = 84\%$

#### Узагальнення результатів

Особливості комплексного впливу основних характеристик КС ( $\Theta$ ,  $\lambda$ ,  $\delta$ ) за типових умов роботи теплових труб (капілярний транспорт) і термосифонів (вільний рух рідини) ґрунтовно досліджено в працях [2-4]. Одержані нами результати узагальнено емпіричними формулами з безрозмірними параметрами

$$\alpha = cq^n \Theta^m \lambda^p \delta^b D^s K^{0,33}, \quad (1)$$

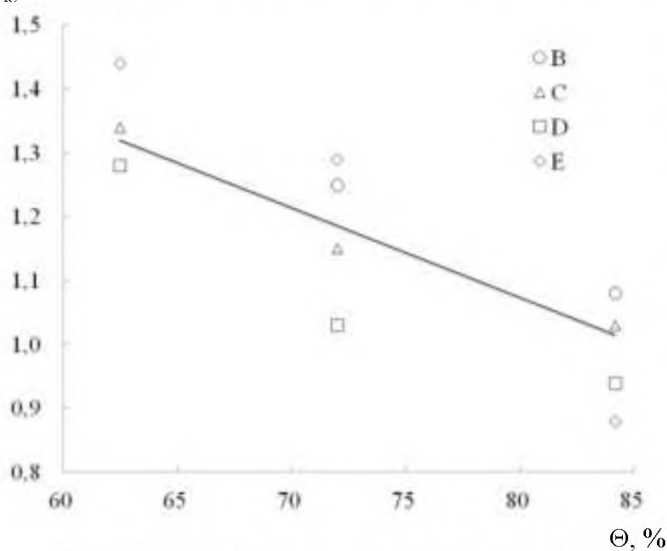
де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $c$  – коефіцієнт;  $q$  – густина теплового потоку;  $\Theta$  – пористість КС;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності КС;  $\delta$  – товщина КС;  $D$  – середній діаметр пор;  $K = \lambda_p^2 / (v_p \sigma_p T_n)$  – комплекс теплофізичних характеристик рідини;  $\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності;  $v_p$  – в'язкість;  $\sigma_p$  – поверхневий натяг;  $T_n$  – температура насичення. Для вільного руху:  $c = 20000$ ;  $n = 0,15\delta_{\text{КС}}^{-0,14}$ , коли  $\delta_{\text{КС}} < 0,8$  мм, і  $n = 0,05\delta_{\text{КС}}^{-0,28}$ , коли  $\delta_{\text{КС}} > 0,8$  мм;  $m = 0,5$ ;  $p = 0,6$ ;  $b = 1,0$ ;  $s = 0,15$ ; для капілярного руху:  $c = 200$  і  $b = 0,65$ , коли  $\delta_{\text{КС}} = 0,4 \dots 1,2$  мм;  $c = 0,5$  і  $b = -0,2$ , коли  $\delta_{\text{КС}} = 1,2 \dots 9,0$  мм;  $n = 0,6$ ;  $m = 0,15$ ;  $p = 0,25$ ;  $s = 0,1$ .

Інтенсивність теплообміну під час кипіння води на поверхнях із мідними припеченими КС (коли  $\delta_{\text{КС}} = 0,3 \dots 1,5$  мм) є вищою порівняно з технічними гладкими поверхнями майже на порядок (див. рис. 3).

За капілярного транспорту води коефіцієнти  $\alpha$  для КС середньої пористості ( $\Theta = 40$  %) у 5...8 разів перевищували типові для кипіння на гладких поверхнях. Початок кипіння рідини в крупних порах КС (який фіксували візуально) наставав за значно менших  $q$  порівняно з вільним рухом. Притиснуті волокнисті структури забезпечували коефіцієнти  $\alpha$  у 3...5 разів менші порівняно з аналогічними КС, якісно припеченими до гладкої поверхні. Під час кипіння за умов вільного руху («великого об'єму») інтенсивність теплообміну (точки 2) була ще вищою (у 9...10 разів для води; у 12...13 – для ацетону). Рідина за таких умов додатково транспортується до центрів пароутворення завдяки силам гравітації, значно більшим, аніж капілярні сили Лапласа (для першого випадку). КС, що неідеально приєднані до гладкої поверхні (точки 3), забезпечують менші  $\alpha$  порівняно з надійно припеченими КС. Проте вони суттєво переважають типові для гладких поверхонь. Інтенсивність теплообміну під час кипіння на поверхнях із притиснутими (не припеченими) пористими КС залишається відносно високою (порівняно з гладкою поверхнею). Ця тенденція зберігається як для мідних, так і для сталевих структур.

У праці [5] запропоновано напівемпіричну модель двофазного теплообміну під час пароутворення на поверхнях із пористими КС. Відповідно до неї теплота відводиться від гладкої поверхні з приєднаною КС: конвекцією рідини у порах КС; випаровуванням мікрошару рідини в основі парогенеруючих пор; випаровуванням мікроплівки рідини, що існує на бокових стінках парогенеруючих пор. Загальний термічний опір при цьому залежить від густини теплового потоку  $q$  і характеристик КС. Реальні процеси пароутворення у МВКС є складнішими, проте розрахунки за запропонованою моделлю підтверджують її адекватність. Зокрема, окремі складові сумарного термічного опору зростають із погіршенням контакту КС із суцільною поверхнею, що зменшує інтенсивність теплообміну.

$R_k, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$



*B, C, D, E – серії експериментів із різними КС;  
крива – розрахунок за формулою  $R_k = 55\Theta^{-0,9}$*

**Рис. 5 – Вплив пористості КС на контактний термічний опір за стаціонарного теплового режиму**

під час конструювання нових теплообмінних пристроїв і обладнання.

Для інженерних розрахунків інтенсивності теплообміну на поверхнях з якісно приєднаними (припеченими) КС можна рекомендувати формулу (1). Для притиснутих КС розрахункові значення  $\alpha$  слід зменшувати на 20...30 %, залежно від умов приєднання КС.

Із зростанням пористості  $\Theta_{\text{КС}}$  термічний опір  $R_k$  у місцях контакту КС із суцільною поверхнею зменшується (рис. 5). Це пояснюється зменшенням площі контактної поверхні між КС й суцільною поверхнею. Одержані дані узагальнюються формулою  $R_k = 55\Theta^{-0,9}$ , де  $R_k$  – контактний термічний опір,  $\text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ;  $\Theta$  – пористість КС, %.

#### Висновок

Результати експериментальних досліджень впливу умов контакту пористих капілярних структур на інтенсивність двофазного теплообміну (кипіння) і контактних термічних опорів у місцях приєднання КС до суцільних поверхонь нагрівання можна рекомендувати для інженерних розрахунків

**Список використаної літератури**

1. Косторнов, А. Г. Проницаемые металлические волокнистые материалы [Текст] / А. Г. Косторнов. – К. : Техніка, 1983. – 128 с.
2. Шаповал, А. А. Исследование интенсивности теплообмена при кипении на поверхности с металловолокнистыми пористыми покрытиями [Текст] / А. А. Шаповал, В. К. Зарипов, М. Г. Семена // Теплоэнергетика. – 1983. – № 12. – С. 63-65.
3. Шаповал, А. А. К расчётам интенсивности теплообмена при кипении на поверхностях с пористыми покрытиями [Текст] / А. А. Шаповал, В. К. Зарипов, М. Г. Семена // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1989. – № 3. – С. 63-68.
4. Смирнов, Г. Ф. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах [Текст] / Г. Ф. Смирнов, А. Д. Цой. – М. : Изд-во МЭИ, 1999. – 440 с.
5. Шаповал, А. А. К моделированию процессов теплообмена при кипении на поверхностях с неупорядоченными пористыми структурами [Текст] / А. А. Шаповал // ММФ-2000. – Т. 5: Тепломассообмен в двухфазных системах. – С. 198-204.

*Results of experimental researches of influence of ways are presented connections of metal-fiber structures to continuous technical surfaces on intensity of heat transfer at boiling water and on contact thermal resistance. Empirical formulas for calculations of intensity of biphasic heat transfer and contact thermal resistance in zones of heating are received for heat pipes and thermosyphons with porous fibrous structures.*

**Keywords:** capillary structures, metal-fiber structures, biphasic heat transfer, heat pipes, contact thermal resistance.

Надійшла до редакції 01.03.2012

---

УДК 66.099.2-046.67

**КОРНИЄНКО Я. М., д.т.н., проф.; ГАТІЛОВ К. О., асп.; КРАВЧУК М. А., магістрант;  
МАРТИНЮК О. В., зав. лаб.; КОСЯНЧУК В. О., магістрант**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## **ОДЕРЖАННЯ ГУМІНОВО-МІНЕРАЛЬНИХ ТВЕРДИХ КОМПОЗИТІВ ІЗ ДОМІШКАМИ ЕКСТРАКТУ ТОРФУ**

*Наведено результати експериментальних досліджень процесу одержання з рідких систем гуміново-азотно-кальцієво-сірковісних добрив із домішками гумату калію, екстрагованого з торфу.*

**Ключові слова:** гуміново-мінеральні добрива, екстракт торфу, грануляція.

### **Постановка проблеми**

Щоб зберегти врожайність ґрунтів за інтенсивного землекористування, слід застосувати нові покоління твердих композиційних добрив змінного складу, що визначається агроекологічними умовами регіону їхнього використання. При цьому нові добрива мають містити мінеральні поживні речовини, компоненти для розкислення, сполуки сірки, а також гумінові речовини, наприклад екстракти торфу.

Одержання гуміново-мінеральних добрив є складним тепломасообмінним процесом утворення твердих композитів із пошаровою структурою. Оскільки загальну швидкість процесу обмежує масова кристалізація на поверхні утворюваних гранул, актуальним є визначення впливу технологічних параметрів саме на цей процес.

### **Аналіз попередніх досліджень**

Кінетика утворення мінерально-гумінових добрив з пошаровою структурою визначається масообміном під час масової кристалізації [1]. Коефіцієнт гранулоутворення  $\psi > 90\%$  можна досягти за розвинутої площі поверхні частинок у псевдозрідженому шарі  $\Sigma f$ . Це вимагає збільшення висоти шару та призводить до барботажного режиму, за якого можливе утворення застійних зон. Щоб усунути цей недолік, запропоновано забезпечити спрямовану циркуляцію [2].

© Корнієнко Я. М., Гатілов К. О., Кравчук М. А., Мартинюк О. В., Косянчук В. О., 2012