

ШАПОВАЛ А. А., к.т.н., с.н.с.; ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф.; САУЛІНА Ю. В., інж.;  
ЛЕВКІВСЬКА О. М., магістрант; РОМАНЧУК Б. В., магістрант; ШАПОВАЛ Арт. А., інж.

## ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТАЛОВОЛОКНИСТИХ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

*Досліджено вплив характеристик і параметрів металоволокнистих пористих матеріалів, які застосовують у двофазних теплопередаючих пристроях, на каркасну теплопровідність таких матеріалів. Проаналізовано відомі результати аналогічних досліджень. Показано, що істотно на каркасну теплопровідність впливає пористість металоволокнистих матеріалів. Розроблено і створено спеціальне обладнання, в якому для підвищення точності вимірювань застосовані оригінальні дротові датчики теплового потоку. Визначено залежності, що дозволяють розраховувати каркасну теплопровідність металоволокнистих матеріалів з урахуванням пористості, довжини й діаметра вихідних волокон.*

**Ключові слова:** каркасна теплопровідність, металоволокнисті пористі матеріали, двофазні теплообмінні процеси, теплові труби, капілярні структури.

© Шаповал А. А., Панов Є. М., Сауліна Ю. В., Левківська О. М., Романчук Б. В., Шаповал Арт. А., 2013.

**Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.** Технічний прогрес у процесах розробки нових двофазних теплопередавальних пристроїв (зокрема теплоутилізаційних теплообмінників-рекуператорів), створених на основі теплових труб (ТТ) і термосифонів (ТС), пов'язаний із застосуванням високопроникних пористих матеріалів, що відіграють у ТТ роль капілярних структур (КС) [1, 2]. Як відомо з теорії теплових труб, капілярні структури в ТТ і ТС транспортують рідини-теплоносії до зони нагрівання теплопередаючого пристрою і забезпечують високу інтенсивність теплообміну в зонах нагрівання та охолодження. Ці задачі вирішують завдяки застосуванню ефективних КС із високими гідродинамічними й теплофізичними характеристиками. Створені в Україні високоєфективні металоволокнисті та композиційні КС [3, 4] якнайкраще відповідають технічним вимогам до конструкцій сучасних теплових труб.

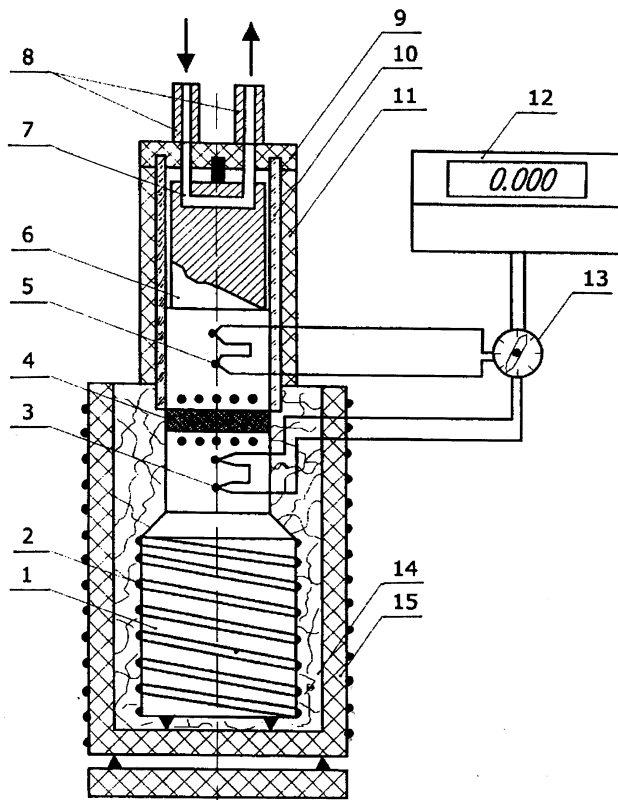
Однією з фізичних характеристик КС, що істотно впливає на теплообмін і теплоперенесення в ТТ, є коефіцієнт теплопровідності капілярних структур. У пористих матеріалах вирізняють каркасну  $\lambda_k$  та ефективну  $\lambda_{\text{еф}}$  умовні теплопровідності КС, що відрізняються «порожніми» порами (у першому випадку) та заповненими рідиною або газами порами (у другому) [3, 5]. Розраховуючи характеристики ТТ, насамперед використовують коефіцієнти каркасної теплопровідності  $\lambda_k$ , тому що вони не залежать від ступеня заповнення КС рідиною або парогазовою сумішшю.

Вплив параметрів фракцій металоволокнистих структур (довжини  $l_v$  й діаметра  $d_v$  волокон та їх співвідношення) на теплопровідність КС досліджено в працях [6–8]. Однак поява нових типів модернізованих КС (композиційних, градієнтних), створених на основі волокнистих структур, зумовила необхідність подальших досліджень. Із цією метою було необхідно розробити експериментальне устаткування та робочі зразки високопроникних КС із широким діапазоном коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda_k$ ; одержати експериментальні дані щодо нових пористих матеріалів та залежності, необхідні для розрахунку коефіцієнтів каркасної теплопровідності.

**Експериментальне устаткування і методика експеримента.** Створене устаткування дозволяє дослідити вплив характеристик капілярних структур на каркасну теплопровідність і контактний термічний опір, наявний у місцях контакту КС із суцільними поверхнями нагрівання. Експериментальну установку (рис. 1) побудовано за принципом «плоскої пластини» [9]. Тепловий потік, створюваний електронагрівником 2, проходить крізь мідний блок 1, дослідний зразок КС 4, в потім відводиться охолодною водою (вузол 7–8). Суттєвою відмінністю установки стало застосування розроблених в Інституті технічної теплофізики НАН України дротових датчиків теплового потоку нового типу. Це дозволило істотно підвищити точність вимірювань. Робочу ділянку установки було відтаровано (еталон – свинець); це забезпечило високу достовірність отримуваних результатів.

Після досягнення стаціонарного теплового режиму за заданого рівня теплового потоку вимірювали температури в контрольних точках робочої ділянки й розраховували коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_k$  із урахуванням контактних термічних опорів у місцях контакту КС із гладкими металевими поверхнями. Отримані значення порівнювали з відомими [3, 5–8, 10–12]. Характеристики досліджуваних металоволокнистих

структур були такими: матеріал волокон – мідь М1 та корозійностійка сталь 09Х18Н10Т, пористість  $\Theta = 40 \dots 90 \%$ , довжина фракцій (волокон)  $l_v = 3 \dots 9$  мм; діаметр  $d_v = 30 \dots 50$  мкм; діаметр дослідного зразка КС 20 мм; товщина КС 1...3 мм.



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

**Рис. 1 – Експериментальна установка**

Розрахунки  $\lambda_k$  металоволокнистих КС для вищезазначених діапазонів пористості КС та відношення  $l_b/d_b = 43 \dots 200$  задовільно кореспондуються з відомими даними (див. рис. 3). Підтверджено, що вплив на  $\lambda_k$  розмірів моноволокон є істотним лише для високотеплопровідних (мідних) КС, причому в діапазоні середніх значень пористості ( $\Theta = 40 \dots 60 \%$ ). Для низькотеплопровідних структур (корозійностійка сталь) вплив пористості й розмірів вихідних фракцій є незначним.

Одержані формули можна рекомендувати для інженерних розрахунків під час розроблення теплопередавальних пристроїв, що функціонують у режимах двофазного теплообміну. Похибка розрахунку  $\lambda_k$  при цьому не перевищує  $\pm 12 \%$ .

**Висновки.** Досліджено вплив характеристик металевих волокнистих капілярних структур на їх каркасну теплопровідність. Остання істотно впливає на інтенсивність теплообміну в зонах нагрівання двофазних теплопередавальних пристроїв. Зазначений вплив враховується запропонованими емпіричними формулами, простими для інженерного застосування та досить точними, що підтверджено відомими та авторськими експериментальними дослідженнями.

**Результати досліджень, їх аналіз та узагальнення.** Теоретичні залежності авторів праць [10–12] (криві 1–3) та експериментальні дані [6–8] (нижні криві) свідчать, що структурні характеристик металоволокнистих матеріалів (особливо пористість  $\Theta$ ) впливають на каркасну теплопровідність  $\lambda_k$  пористих матеріалів, виготовлених із високотеплопровідних металів (зокрема, з міді). Зі зменшенням коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda$  вихідних металів (наприклад, корозійностійкої сталі 09Х18Н10Т) вплив характеристик КС на  $\lambda_k$  зменшується. Слід зазначити, що в деяких теоретичних залежностях [5, 10] не враховано контактні явища між фракціями (волоконками); водночас якість контактів здатна покращувати або погіршувати теплопровідність у КС. Наведені ж у працях [6–8] розрахункові залежності, що враховують ці контакти, є непротистими для інженерних розрахунків.

Як свідчать відомі та отримані у цій праці результати досліджень (рис. 3), каркасна теплопровідність  $\lambda_k$  металоволокнистих структур залежить, передусім, від пористості, відношення довжини дискретних волокон до їх діаметра  $l_b/d_b$  та якості контактів між волокнами-фракціями. Збільшення пористості зменшує каркасну теплопровідність; збільшення  $l_b/d_b$  підвищує  $\lambda_k$ .

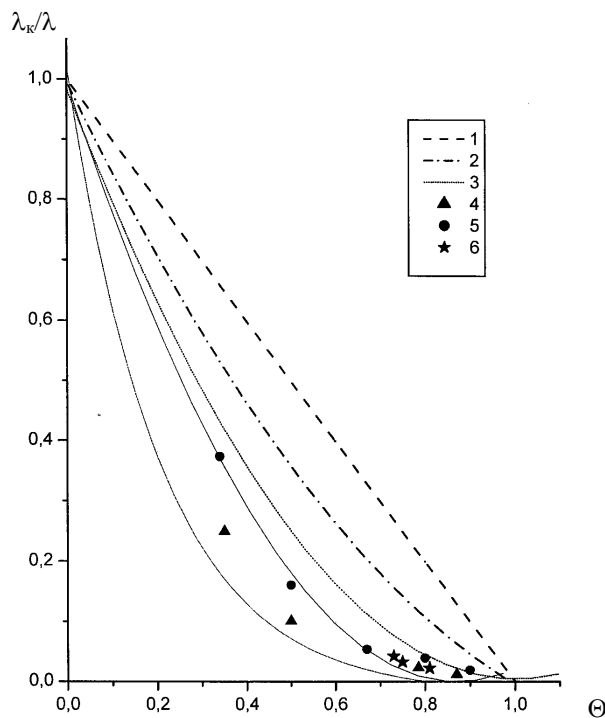
Для розрахунку каркасної теплопровідності металоволокнистих капілярних структур запропоновано такі емпіричні формули, що узагальнюють результати всіх відомих досліджень:

для МВКС із пористістю  $\Theta = 35 \dots 75 \%$ :

$$\lambda_k = 0,0045\Theta^{-1,6}\lambda^{-2}(l_b/d_b)^{0,1};$$

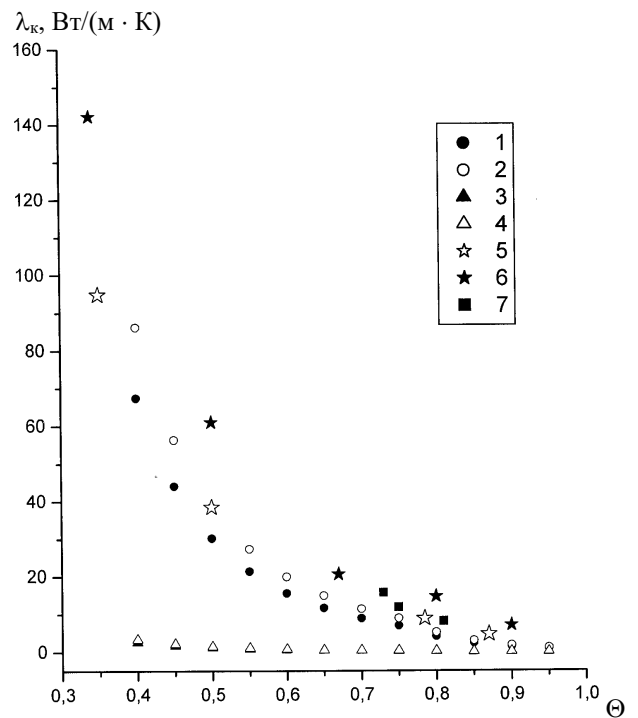
для МВКС із пористістю  $\Theta = 75 \dots 90 \%$ :

$$\lambda_k = 0,001\Theta^{-7}\lambda^{-2}(l_b/d_b)^{0,1}.$$



1 – [11]; 2 – [10]; 3 – [12];  
 4 – мідні МВКС,  $d_e = 20$  мкм [3, 7];  
 5 – мідні МВКС,  $d_e = 40$  мкм [3, 7];  
 6 – дані авторів,  $d_e = 30$  мкм

**Рис. 2 – Вплив пористості капілярних структур на їхню каркасну теплопровідність**



1 – мідь,  $l/d = 43$ ; 2 – мідь,  $l/d = 200$ ; 3-4 – корозійно-стійка сталь; 5 – мідь [7]; 6 – мідь [6, 8]; 7 – мідь

**Рис. 3 – Вплив характеристик МВКС на їхню каркасну теплопровідність (1-4 – розрахунок; 5-7 – експеримент)**

#### Список використаної літератури

1. Chi S. Heat Pipe Theory and Practice / S. W. Chi. – Washington, D. C. : A. Source Book, Hemisphere, 1976.
2. Справочник по теплообменникам [в 2-х т.] / пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 2. – 352 с.
3. Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы / А. Г. Косторнов – К. : Техніка, 1983. – 128 с.
4. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов [в 2-х т.] / А. Г. Косторнов – К. : Наукова думка, 2003. – Т. 2. – 550 с.
5. Дульнев Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
6. Семена М. Г. Каркасная теплопроводность металловолокнистых фитилей тепловых труб / М. Г. Семена, А. Г. Косторнов, В. К. Зарипов и др. // Порошковая металлургия. – 1976. – № 4. – С. 581-586.
7. Косторнов А. Г. Теплофизические свойства пористых волокновых материалов / А. Г. Косторнов, Л. Г. Галстян // Порошковая металлургия. – 1984. – № 3. – С. 88-92.
8. Семена М. Г. Тепловые трубы с металловолокнистыми структурами / М. Г. Семена, А. Н. Гершуни, В. К. Зарипов – К. : Техніка, 1984. – 282 с.
9. Вишенский С. А. Характеристики капиллярно-пористых материалов / С. А. Вишенский, В. С. Каштан. – К. : Вища школа, 1988. – 168 с.
10. Lichtenecker Z. Widerstandsberechnung der kristallfreier Legierungen / Z. Lichtenecker // Physic. Zeit. – 1929. – Bd 30. – N 22. – S. 805-810.
11. Скороход В. В. Некоторые физические свойства высокопористых тел. / В. В. Скороход // Порошковая металлургия. – 1967. – № 6. – С. 33-38.
12. Дульнев Г. Н. Теплопроводность упорядоченных волокнистых систем / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк, Б. Л. Муратова // Тепло- и массоперенос. – Минск, 1968. – С. 82-89.

Надійшла до редакції 01.02.2013.