

ШАПОВАЛ А. А., к.т.н., доц.; ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф.; СТРЕЛЬЦОВА Ю. В., асп.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЗАКИПАННЯ ВОДИ НА ПОРИСТИХ ПОВЕРХНЯХ: ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ

Наведено результати експериментальних досліджень впливу фізичних характеристик металевих волокнистих матеріалів на початок закипання води на пористих поверхнях за умов її вільного руху й капілярного транспорту. Досліди виконано за допомогою спеціально створеної експериментальної установки, що імітує умови функціонування теплових труб і термосифонів. Такі умови є типовими для роботи двофазних теплопередавальних пристроїв. Основні характеристики зразків металевих пористих капілярних матеріалів (МПКМ) змінювали у широких діапазонах значень. Дослідження свідчать, що за умов вільного руху рідини зміна пористості мідних металоволокнистих матеріалів впливає на температурні напори, за яких на пористих поверхнях починаються процеси, аналогічні закипанню води на гладких технічних поверхнях. Усі досліджені у роботі характеристики МПКМ впливають на значення температурних напорів початку закипання води. Із зменшенням пористості металоволокнистих матеріалів капілярні сили Лапласа перешикоджають виходу парової фази крізь парові канали-стволу. Одночасно зменшення пористості капілярних структур призводить до збільшення їх каркасної теплопровідності, що сприяє швидкій активації парових зародків, і зменшує температурні напори початку закипання порівняно з умовами закипання на гладких технічних поверхнях. Превалює вплив пористості капілярно-пористих матеріалів, що можна пояснити збільшенням кількості відносно крупних пор і полегшенням умов виходу утвореної парової фази у випадках застосування високопористих металевих матеріалів-покриттів. Результати узагальнено у вигляді простих емпіричних формул, придатних для інженерних розрахунків температурних напорів, за яких починається генерування парової фази на пористих поверхнях, тобто закипання води. Формули запропоновано для умов, типових як для вільного руху води на повністю «залитих» пористих поверхнях (функціонування термосифонів), так і для капілярного транспорту води (робота теплових труб).

Ключові слова: закипання, пористі матеріали, капілярні структури, теплові труби, термосифони, пористість, теплопровідність.

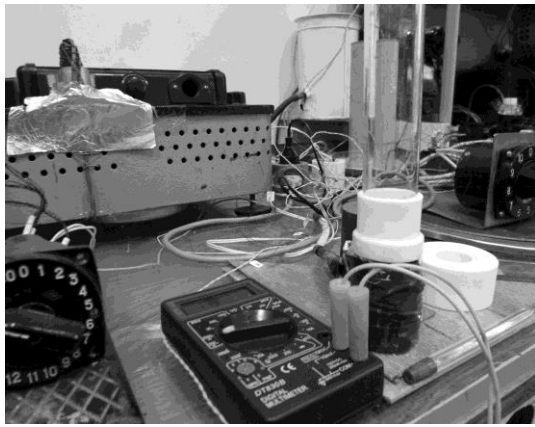
© Шаповал А. А., Панов Є. М., Стрельцова Ю. В., 2016.

Постановка проблеми. Дослідження впливу характеристик металевих капілярно-пористих матеріалів (МКПМ) [1, 2], приєднаних до поверхонь зон нагрівання елементів технічних пристроїв, на початок кипіння (закипання) води та органічних рідин на таких поверхнях є важливою науково-технічною задачею. Зазначені матеріали, зокрема, є функціональними робочими елементами двофазних теплопередавальних пристроїв: теплових труб і термосифонів [3–5], розвиток та практичне застосування яких є одним із аспектів сучасної теплофізики та теплоенергетики [4–6].

Металеві капілярно-пористі матеріали мають низку фізико-технічних характеристик, що залежать від типів та особливостей виготовлення МКПМ. До визначальних характеристик МПКМ належать пористість Θ , теплопровідність λ , розміри пор (середній $D_{\text{ср}}$ і максимальний D_{max}), інші характеристики. До параметрів МПКМ належать їхня товщина δ і розміри фракцій (діаметри порошинок – для порошкових МПКМ, довжина L і діаметр d волоконця – для волокнистих МПКМ). Кількісні показники впливу зазначених характеристик і параметрів на температурні напори при закипанні рідин на поверхнях із МПКМ майже не досліджені. У праці [6] запропоновано емпіричну формулу для розрахунків ΔT_3 , де як визначальний параметр запропоновано використовувати D_{max} – максимальний розмір пор волокнистих МПКМ. Проте такий підхід потребує експериментальної перевірки.

Метою роботи є: 1) експериментальне дослідження впливу фізичних характеристик (зокрема – пористості Θ і каркасної теплопровідності $\lambda_{\text{к}}$) волокнистих МКПМ, якісно припечених до суцільних гладких металевих поверхонь нагрівання, на закипання води на пористих поверхнях; 2) отримання розрахункових залежностей для визначення температури початку кипіння води за згаданих умов.

Експериментальне обладнання. Використано експериментальну установку, детальну схему-конструкцію якої наведено у працях [7, 9]. На рис. 1 наведено вигляд експериментального обладнання та робочі ділянки установки, за допомогою яких досліджували вплив характеристик МКПМ на початок закипання води (температурні напори ΔT_3). Імітували умови функціонування термосифонів: кипіння за умов вільної конвекції води (товщина шару якої незначно перевищувала товщину МКПМ) та умов функціонування теплових труб: кипіння (пароутворення) за умов капілярного транспорту води. Дослідні зразки металоволокнистих матеріалів мали різні характеристики й параметри, які варіювали в таких діапазонах: пористість $\Theta = 35 \dots 95$ % (0,35...0,95); каркасна теплопровідність $\lambda_{\text{к}} = 0,2 \dots 70$ Вт/(м · К); товщина $\delta_{\text{к}} = 0,1 \dots 10$ мм; довжина металевих волокон (фракцій МПКМ) $L_{\text{в}} = 3 \dots 12$ мм; діаметр волокон $d_{\text{в}} = 20 \dots 70$ мкм; матеріал МПКМ – мідь і корозійностійка сталь (9Х18Н10Т).



a



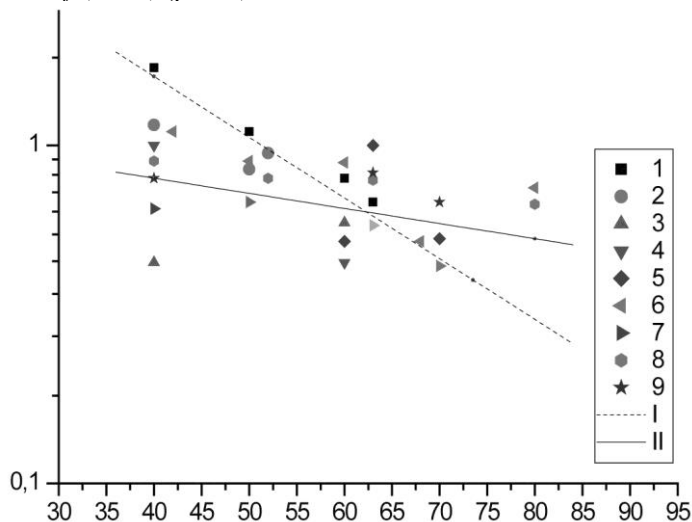
б

Рис. 1 – Обладнання (а) і робочі ділянки (б) експериментальної установки для дослідження впливу характеристик МПКМ на початок закипання води та органічних рідин

Методику проведення експериментів і вимірювань фізичних величин і параметрів наведено у праці [7]. Експерименти за умов вільного руху води (функціонування термосифонів) виконували, дотримуючись таких умов: 1) з існуванням певного «недогріву» води до температури кипіння; 2) з підігріванням води до температури, що була нижчою, ніж табличні температури кипіння за атмосферного тиску, лише на декілька десятих градусу Цельсія. За розрахункові приймали температурні напори ΔT_3 , одержані за досягнення температури води, близької до температури «догріву» (але трохи менші, аніж ці значення). Слід зазначити, що отримати достовірні ΔT_3 за відносно великих «недогрівів» – не просто (хоча при цьому «недогрів» на початок закипання впливає суттєво). Насамперед, експериментально важко забезпечити та отримати стабільні температури «недогрітого» шару води за всім його об'ємом.

Початок закипання води фіксували візуально, після появи й відривання перших парових бульбашок (парових струменів), що утворювалися в порах-каналах. Відповідно, вимірювали температурні напори ΔT_3 (для кожного зразка МПКМ), що вважали визначальними для початку закипання на пористих поверхнях.

Результати досліджень. Результати експериментів із закипання води на поверхнях із волокнистими МПКМ за умов вільного руху рідини та її капілярного транспорту, наведено у вигляді залежностей $\Delta T_3 = f(\Theta_{\text{МПКМ}})$ (рис. 2).



Товщина покриттів: 1 – 0,1 мм; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8; 6 – 1,0; 7 – 2,0; 8 – 4,0; 9 – 10,0 мм; розрахунки: I – авторів праці [6]; II – авторів, для мідних МПКМ

Рис. 2 – Вплив пористості МПКМ на температурний напір при закипанні на пористих поверхнях (вільний рух води)

крупних парових каналів. Під час руху пари в таких каналах утворюються специфічні парові струмені. Для високопористих МПКМ характерною є наявність відносно великої кількості «крупних» пор, в яких капілярні сили Лапласа є слабшими, аніж у «дрібних» порах. Дія капілярних сил істотно впливає на утворення парових бульбашок і рух пари в парових каналах. Одночасно на пароутворення й вихід пари крізь «канали» («стволу»), окрім капілярних сил і гідравлічних опорів впливають теплофізичні характеристики

Аналіз та узагальнення результатів.

Під час кипіння «догрітої» до температури насичення води на гладких технічних поверхнях (за умов вільної конвекції) температурні напори $\Delta T = T_{\text{пов}} - T_{\text{нас}}$, необхідні для початку закипання, становлять

7...10 °C [3, 6, 8]. За умов наявності на технічних поверхнях пористих покриттів-структур механізми підведення теплоти до рідин і зростаючих парових бульбашок змінюються. Важливу роль у фізиці та, відповідно, теоріях закипання відіграють процеси перенесення теплоти крізь «мікрошар» рідини, що перебуває безпосередньо під бульбашкою.

Фракції пористих покриттів-структур, маючи різні коефіцієнти теплопровідності λ , здатні суттєво впливати на геометричні параметри мікрошарів рідин у порах МПКМ. Як свідчать результати багатьох експериментів (у тому числі – авторів), за відносно невеликої щільності теплового потоку на поверхні з дослідним зразком МПКМ «активуються» лише декілька

МПКМ (насамперед, теплопровідність λ_k). Із зростанням щільності теплового потоку кількість парових стволів збільшується.

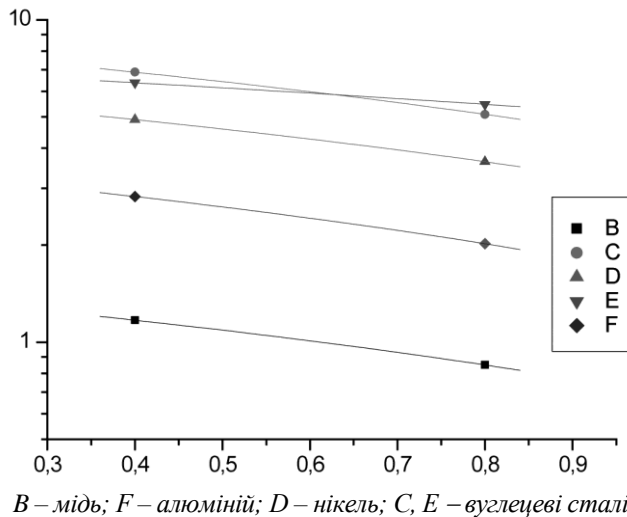


Рис. 3 – Розрахункові температурні напори початку закипання води за її вільного руху на пористих поверхнях, утворених припиканням капілярних структур

Результати теоретичних розрахунків початку закипання води, виконані авторами праці [6], узагальнені у вигляді кривої I на рис. 2, свідчать, що зі збільшенням пористості волокнистих МПКМ температурні напори початку закипання зменшуються. Як свідчать отримані авторами експериментальні дані (крива II), вплив пористості волокнистих МПКМ на температурні напори закипання є аналогічним. Проте наші результати демонструють, що ступінь впливу пористості МПКМ є суттєво меншим, порівняно з результатами, наведеними в праці [6].

Експериментальні дані узагальнено у вигляді емпіричної формули, що дозволяє визначати температурні напори закипання води за її вільної конвекції (функціонування термосифонів) на поверхнях із волокнистими МПКМ за атмосферного тиску повітря:

$$\Delta T_3 = 0,25k\Delta T_3^{гп}\Theta^{0,25}\lambda_k^{0,25}D_{эф}^{0,15},$$

де $T_3^{гп}$ – температурний напір початку закипання води на технічних гладких поверхнях (визначається за формулами, відомими з літературних джерел); k – коефіцієнт, що залежить від теплопровідності металів, з яких виготовлено волокнисті фракції МПКМ, і розраховується за формулою $k = 2,15 - 0,003\lambda_{мет}$.

Результати розрахунків ΔT_3 для МПКМ, виготовлених із різних металів, наведено на рис. 3.

Аналіз експериментальних даних і результатів розрахунків дає підстави стверджувати, що визначальними факторами впливу на початок закипання рідин на пористих поверхнях є пористість і теплопровідність МПКМ. Для МПКМ різної пористості, виготовлених із різних металів (або сплавів), температурні напори зростають із зменшенням пористості. При цьому вони залишаються меншими, ніж одержані за умов закипання води на гладких технічних поверхнях.

Для визначення температурних напорів закипання води за умов її капілярного транспорту (робота теплових труб) пропонується формула (для мідних КМ):

$$\Delta T_3 = 0,15\Delta T_3^{гп}\Theta^{0,15}\lambda_k^{0,2}D_{эф}^{0,1}.$$

Вплив теплопровідності волокон, одержаних з інших металів (окрім міді), на початок закипання за обох зазначених умов руху рідини має досліджуватися експериментально. Розрахункові параметри в наведених формулах мають відповідати системі СІ.

Висновки. Одержані результати дозволяють кількісно оцінити вплив характеристик і параметрів металевих волокнистих пористих матеріалів на початок закипання води за умов, типових для функціонування зон нагрівання двофазних теплопередавальних пристроїв – теплових труб і термосифонів, і здійснювати розрахунок температурних напорів у цих перспективних теплообмінних пристроях.

Список використаної літератури

1. Белов С. В. Пористые материалы в машиностроении / С. В. Белов. – М. : Машиностроение, 1981. – 352 с.
2. Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы / А. Г. Косторнов. – К. : Техніка, 1983. – 128 с.
3. Чи С. Тепловые трубы. Теория и практика / С. Чи. – М. : Машиностроение, 1981. – 208 с.
4. Васильев Л. Л. Теплообменники на тепловых трубах / Л. Л. Васильев. – Мн : Наука и техника, 1981. – 144 с.
5. Гершуни А. Н. Системы теплопередачи испарительно-конденсационного типа для атомных энерго-технологий / А. Н. Гершуни, А. П. Нишик, Е. Н. Письменный. – К. : Наук. думка, 2012. – 223 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. // Хім. 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. – 2000. – Т. 5. – С. 198–204.
9. 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. – Vol. 19 (1). – P. 43–52.

Надійшла до редакції 09.10.2015