



УДК 536.24:536.423.1

© 2011

А. А. Шаповал

## Інтенсивність теплообміну при кипінні води на пористих поверхнях з волокнистою структурою

(Представлено академіком НАН України А. Г. Косторновим)

*Наведено результати експериментальних досліджень впливу способів приєднання металевих волокнистих структур до суцільних технічних поверхонь на інтенсивність теплообміну при кипінні води. Коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях із притиснутими пористими структурами мають значення, менші за аналогічні для припечених матеріалів, проте вони вищі, порівняно зі значеннями, типовими для гладких поверхонь. Запропоновано емпіричні формули для розрахунків інтенсивності двофазного теплообміну в зонах нагрівання теплових труб і термосифонів із пористими волокнистими структурами.*

**Мета роботи.** Дослідження двофазного теплообміну, зокрема, процесів кипіння на суцільних металевих поверхнях із приєднаними до них пористими капілярними структурами (КС), є актуальними теплофізичними задачами. Металеві пористі покриття і структури [1] мають ряд фізичних характеристик (структурних, геометричних, теплофізичних тощо), які істотно впливають на параметри кипіння (початок закипання рідини, інтенсивність двофазного теплообміну, критичні густини теплового потоку). Особливості впливу характеристик волокнистих структур на теплообмін досліджувалися авторами робіт [2, 3], однак реальний вплив різних умов приєднання КС на інтенсивність теплообміну при кипінні до теперішнього часу ґрунтовно не вивчений. Проблема є актуальною для розробок і конструювання теплових труб і термосифонів — високотеплопровідних пристроїв, перспективних для сучасного теплообмінного обладнання і систем енергозбереження.

**Стан проблеми.** Процеси кипіння на пористих поверхнях істотно відрізняються від аналогічних процесів, типових для гладких технічних поверхонь. Застосування пористих матеріалів у теплових трубах, в яких вони є капілярними структурами, що виконують функції транспортування рідин-теплоносіїв та інтенсифікації двофазного теплообміну, зумовило необхідність експериментального вивчення процесів. Дослідження різних авторів [4–6] підтвердили факт значної інтенсифікації двофазного теплообміну на пористих поверхнях (рис. 1). Високі значення коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні води в умовах віль-

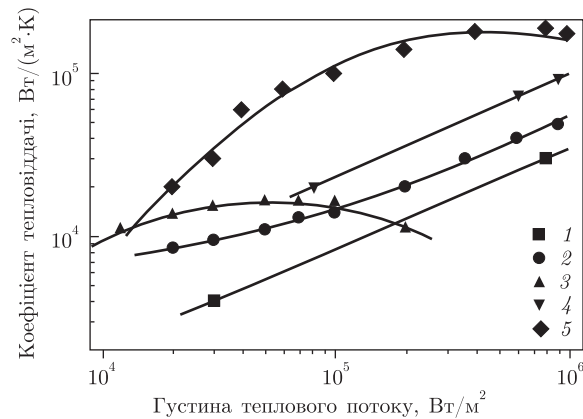


Рис. 1. Інтенсивність теплообміну при кипінні води на поверхнях з пористими структурами різних типів: 1 — кипіння води на гладкій технічній поверхні; 2, 3 — кипіння на поверхнях з сітчастими КС [4, 5]; 4 — мідні порошкові КС [6]; 5 — максимальна інтенсивність теплообміну на поверхнях із волокнистими КС [3]; тиск насичення — атмосферний

ної конвекції забезпечують високотеплопровідні (мідні) волокнисті і порошкові капілярні структури (порівняно із сітчастими КС). Варто відзначити, що більшість авторів не вказують детальні умови приєднання КС до поверхонь нагрівання.

Особливості комплексного впливу основних характеристик КС (пористості  $\Theta$ , теплопровідності  $\lambda$ , товщини  $\delta$ ) в умовах, типових для роботи теплових труб (капілярний транспорт рідини) та роботи термосифонів (вільний рух рідини), ґрунтовно досліджено в [2, 3, 7]. Отримані нами результати для обох умов узагальнено емпіричними формулами, які мають такий вигляд:

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

де розрахунковий параметр  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі; визначальні параметри:  $q$  — густина теплового потоку;  $\Theta$  — пористість КС;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності КС;  $\delta$  — товщина КС;  $D$  — середній діаметр пор;  $K$  — комплекс теплофізичних характеристик рідини ( $K = \lambda_{\text{рід}}^2 / (\nu_{\text{р}} \sigma_{\text{р}} T_{\text{нас}})$ );  $c$  — коефіцієнт пропорційності.

Коефіцієнти та показники ступенів для різних умов двофазного теплообміну такі: 1) для вільного руху рідин (умови, типові для термосифонів)  $c = 2 \cdot 10^4$ ;  $n = 0,15 \delta_{\text{КС}}^{-0,14}$  при  $\delta_{\text{КС}} < 0,8 \cdot 10^{-3}$  м;  $n = 0,05 \delta_{\text{КС}}^{-0,28}$  при  $\delta_{\text{КС}} > 0,8 \cdot 10^{-3}$  м;  $m = 0,5$ ;  $p = 0,6$ ;  $b = 1,0$ ;  $s = 0,15$ ; 2) для капілярного руху рідин (умови, типові для теплових труб):  $c = 200$ ;  $b = 0,65$  при  $0,4 \cdot 10^{-3} < \delta_{\text{КС}} < 1,2 \cdot 10^{-3}$  м;  $c = 0,5$ ;  $b = -0,2$  при  $1,2 \cdot 10^{-3} < \delta_{\text{КС}} < 9,0 \cdot 10^{-3}$  м;  $n = 0,6$ ;  $m = 0,15$ ;  $p = 0,25$ ;  $s = 0,1$ ; значення визначальних параметрів мають бути у системі вимірювань СІ.

Ефект істотного, у ряді випадків, збільшення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  порівняно з гладкими технічними поверхнями деякі автори пояснюють впливом різних чинників. Запропоновано ряд наближених моделей двофазного теплообміну на пористих поверхнях [8, 9], в яких здійснено спроби інтерпретації впливу КС на процеси пароутворення. Проте більшість моделей побудована з використанням невеликих об'ємів експериментальних даних, отриманих у незначних діапазонах зміни визначальних характеристик КС; здебільшого ці моделі мають емпіричний характер.

У наших роботах [10] запропоновано напівемпіричну модель двофазного теплообміну при пароутворенні на поверхнях з пористими КС. Сутність моделі полягає у наступному:

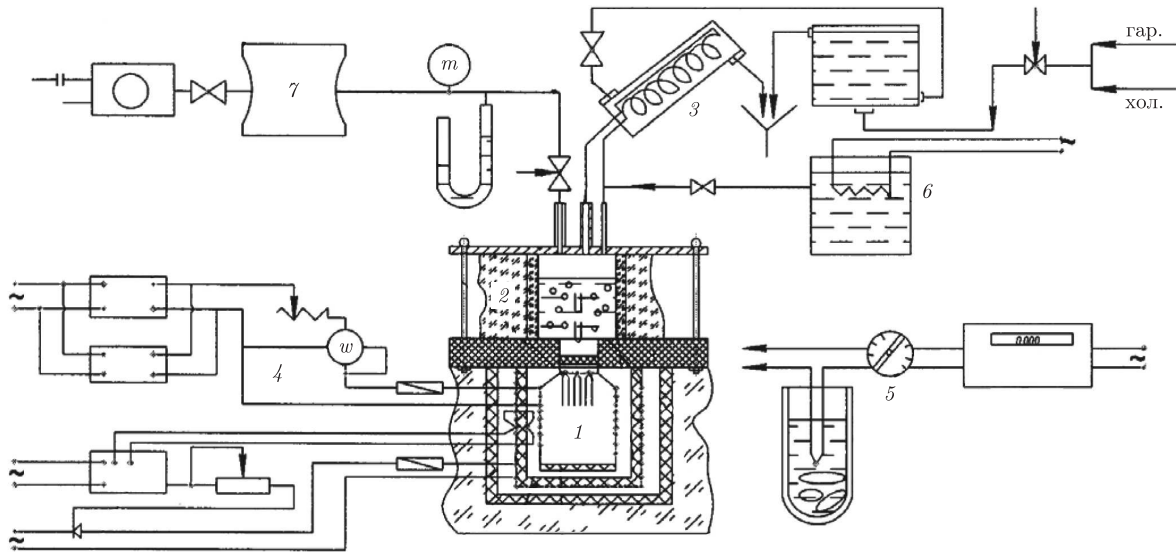


Рис. 2. Схема експериментальної установки для досліджень теплообміну при кипінні на поверхнях з пористими капілярними структурами: 1 — блок підведення тепла до зразка пористої структури; 2 — зона кипіння рідини на поверхні з пористою капілярною структурою; 3 — система конденсації пари; 4 — система підведення, регулювання і вимірювання електричної потужності; 5 — система вимірювання температур; 6 — система охолодження конденсату; 7 — система вакуумування та підтримання тиску

відведення тепла від гладкої поверхні з приєднаною КС здійснюється трьома основними шляхами — 1) конвекцією рідини у порах КС (у цих порах парова фаза відсутня); 2) випаровуванням мікрошару рідини в основі парогенеруючих пор (цей мікрошар є аналогом мікрошару, що знаходиться під зростаючим паровим пухирцем); 3) випаровуванням мікроплівки рідини, яка знаходиться на бокових стінках парогенеруючих пор. Загальний термічний опір зазначених трьох складових опорів залежить як від густини теплового потоку  $q$ , так і від вищезазначених фізичних характеристик КС (див. формулу (1)). Реальні процеси пароутворення у парогенеруючих каналах є дещо складнішими, проте розрахунки, виконані за даною моделлю, підтверджують її дієздатність.

В останній час з'явилися роботи вітчизняних авторів, в яких запропоновано оригінальні підходи до розвитку теорії кипіння (зазначимо, що до теперішнього часу загальноприйнята теорія кипіння відсутня; існують лише певні підходи різних дослідників). Теорія кипіння цих авторів, детально описана в [11], базується на дискретному введенні порцій енергії (пухирцями) в однофазну рідину, що забезпечує інтенсивне відведення тепла від поверхні. Істотну роль при зростанні пухирця відіграють граничні умови теплообміну на його верхній поверхні (власне, різниця температур води у місці виникнення пухирцевого зародку та у верхній точці пухирцевого куполу). Запропонована нами модель пароутворення, за рядом чинників, задовільно корелює з теорією авторів [11].

**Експериментальне обладнання і методика експерименту.** Задачі в нашій роботі розв'язано таким чином: 1) створено експериментальне обладнання для досліджень теплообміну при кипінні на поверхнях з пористими покриттями і структурами (рис. 2) в умовах вільного руху рідини та її капілярного транспорту; 2) розроблено і виготовлено ряд дослідних зразків КС з такими характеристиками: матеріал КС — мідь та корозійностійка сталь 9X18H10T; пористість  $\Theta_{\text{КС}} = 40\text{--}90\%$ ; товщина КС  $\delta = 0,2\text{--}2,0$  мм; 3) для переві-

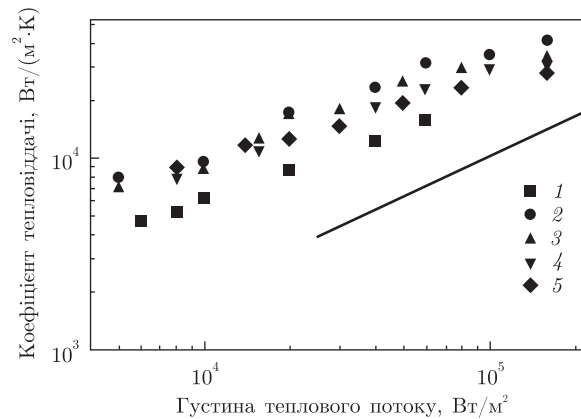


Рис. 3. Вплив умов приєднання волокнистих структур на інтенсивність двофазного теплообміну при кипінні води в умовах її капілярного транспорту: 1 — притиснута мідна волокниста КС ( $\Theta = 40\%$ ;  $\delta = 0,8$  мм); припечені мідні волокнисті КС ( $\Theta = 40\%$ : 2 —  $\delta = 0,8$  мм; 3 —  $\delta = 1,0$  мм; 4 —  $\delta = 2,0$  мм; 5 —  $\delta = 0,4$  мм); крива — інтенсивність кипіння води на гладкій технічній поверхні

ки достовірності експериментальних даних проведено тарування обох експериментальних робочих дільниць (досліджено інтенсивність теплообміну при кипінні води на металевій технічній поверхні).

Методика експериментів полягала у наступному: 1) дослідні зразки із припеченими пористими структурами і мікротермопарами припаювали легкоплавким припоєм до торця мідного клина-нагрівача; 2) заповнювали внутрішній об'єм експериментальної дільниці робочою рідиною-теплоносієм; 3) вмикали систему підведення і регулювання електричної потужності; 4) за допомогою автотрансформатора встановлювали певне значення необхідної густини теплового потоку  $q$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ); 5) після досягнення стаціонарного теплового режиму вимірювали значення температури металеві поверхні та температуру насичення киплячої рідини (з урахуванням необхідних поправок); 6) отримували значення різниць температур несучої поверхні та киплячої рідини, також — значення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ); 7) в подальшому дослідження повторювали з неприпеченими КС за допомогою спеціальних притискуючих (голчастих) пристроїв.

**Результати та узагальнення.** Ряд отриманих експериментальних даних наведено на рис. 3 і 4. Інтенсивність теплообміну при кипінні води на поверхнях із мідними припеченими КС (у діапазоні товщин пористих структур  $\delta_{\text{КС}} = 0,3\text{--}1,5$  мм) є значно (майже на порядок) вищою порівняно із технічними гладкими поверхнями.

В умовах капілярного транспорту води (рис. 3) коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha$  для КС середньої пористості ( $\Theta = 40\%$ ) у 5–8 разів перевищують значення, типові для кипіння на технічних гладких поверхнях. Початок кипіння рідини в крупних порах КС (яке фіксувалося візуально) настає при значно менших значеннях густин теплових потоків  $q$  порівняно з вільним рухом води. Неприпечені (притиснуті) волокнисті структури забезпечували значення коефіцієнтів  $\alpha$  у 3–5 разів менші, порівняно з аналогічними КС, якісно припеченими до гладкої поверхні.

При кипінні рідин в умовах їх вільного руху (“великого об'єму”) показники максимальної інтенсивності теплообміну для аналогічних КС (рис. 4) мають ще більші значення коефіцієнтів тепловіддачі (більші у 9–10 разів для води та у 12–13 разів — для ацетону). Рідина у даних умовах додатково транспортується до центрів пароутворення за рахунок сил граві-

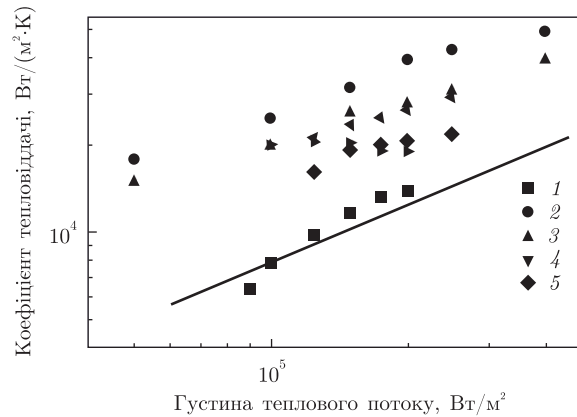


Рис. 4. Вплив умов приєднання волокнистих структур на інтенсивність двофазного теплообміну при кипінні води в умовах її вільного руху: 1 — технічна гладка поверхня; 2 — припечена мідна волокниста КС ( $\Theta = 40\%$ ;  $\delta = 0,8$  мм); 3 — припечена корозійностійка волокниста КС ( $\Theta = 40\%$ ;  $\delta = 0,8$  мм); 4 — притиснута корозійностійка волокниста КС ( $\Theta = 84\%$ ;  $\delta = 0,4$  мм); 5 — притиснута мідна волокниста КС ( $\Theta = 84\%$ ;  $\delta = 0,5$  мм); 6 — притиснута мідна волокниста КС ( $\Theta = 71\%$ ;  $\delta = 1,0$  мм); крива — інтенсивність кипіння води на гладкій технічній поверхні

тації, які значно перевершують капілярні сили (для першого випадку). КС, що притиснуті до гладкої поверхні (рис. 4), також дають менші значення коефіцієнтів  $\alpha$  порівняно з надійно припеченими КС. Проте ці значення значно перевищують величини  $\alpha$ , типові для гладких поверхонь. Важливим результатом експериментальних досліджень є той факт, що інтенсивність теплообміну при кипінні на поверхнях з неприпеченими пористими капілярними структурами залишається досить високою (порівняно з гладкою поверхнею). Тенденція зберігається як для високотеплопровідних мідних КС, так і для низькотеплопровідних структур із корозійностійкої сталі.

Таким чином, для практичних розрахунків інтенсивності теплообміну при кипінні води на технічних поверхнях з металевими волокнистими структурами рекомендовано застосовувати формули типу (1) відповідно до умов кипіння. Для притиснутих КС отримані за розрахунками значення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  потрібно зменшувати на 20–30%, залежно від умов приєднання пористих капілярних структур до суцільної поверхні.

1. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2-х т. — Киев: Наук. думка, 2003. — Т. 2. — 550 с.
2. Шаповал А. А., Зарипов В. К. и др. К расчетам интенсивности теплообмена при кипении на поверхностях с пористыми покрытиями // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1989. — № 3. — С. 63–68.
3. Шаповал А. А., Косторнов А. Г. О влиянии характеристик пористых структур из металловолокон на закипание воды в условиях, характерных для тепловых труб и термосифонов // Тепломассообмен ММФ — 2000. — Т. 5. Тепломассообмен в двухфазных системах. — Минск, 2000. — С. 348–351.
4. Афанасьев Б. А., Смирнов Г. Ф. Исследование теплообмена и предельных тепловых потоков при кипении в капиллярно-пористых структурах // Теплоэнергетика. — 1979. — № 5. — С. 67–69.
5. Ferrell J., Dawis W., Winston H. Heat transfer in heat pipe wicks materials // Proc. Intern. Heat Pipe Conf. — Stuttgart: FRG, 1973. — 64 p.
6. Васильев Л. Л., Конев С. В, Штульц П. и др. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении жидкости в высокотеплопроводных капиллярных структурах // Инж.-физ. журн. — 1982. — 42, № 6. — С. 893–898.
7. Смирнов Г. Ф., Цой А. Д. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах. — Москва: МЭИ, 1999. — 440 с.
8. Ковалев С. А., Соловьев С. Л. Испарение и конденсация в тепловых трубах. — Москва: Наука, 1989. — 112 с.

9. Поляев В. М., Кичатов В. В. Модель кипения жидкости на пористой поверхности // Теплофизика выс. температур. – 1997. – № 5. – С. 500–503.
10. Шаповал А. А. К моделированию процессов теплообмена при кипении на поверхностях с неупорядоченными пористыми структурами // Теплообмен ММФ – 2000. – Т. 5: Теплообмен в двухфазных системах. – Минск, 2000. – С. 198–204.
11. Долинский А. А., Иванюцкий Г. К. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. – Киев: Наук. думка, 2008. – 382 с.

*Институт проблем металловедения  
ім. І. М. Францевича НАН України, Київ*

*Надійшло до редакції 10.05.2011*

**A.A. Shapoval**

### **Intensity of heat transfer at water boiling on porous surfaces with fibrous structure**

*The results of experimental researches in the influence of the connection of the metal fibrous structures to technical smooth surfaces on the intensity of heat transfer at water boiling are presented. The heat transfer coefficients on surfaces with pressed porous structures have values smaller than those for sintered materials. Nevertheless, they are higher than those typical of smooth surfaces. Empirical formulas for calculations of the intensity of two-phase heat transfer in the heating zones of heat pipes and thermosiphons with porous fibrous structures are offered.*