

УДК 532.536

ПЛІВКОВЕ КИПІННЯ РІДИНИ БІЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ПЛАСТИНИ В ПОРИСТОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Авраменко А.О., член-кореспондент НАН України, Ковецька М.М., канд. техн. наук,
Тирінов А.І., докт. техн. наук, Кондратьєва О.О., канд. техн. наук, Олійник Л.В.



Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст 2а, м. Київ 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.1>

Наведено результати моделювання теплообміну при плівковому кипінні рідини в пористому середовищі на вертикальній нагрітій стінці. Аналітичне рішення задачі отримане з використанням моделі пористого середовища в наближенні Дарсі-Брінкмана.

The paper presents results of the modeling of heat transfer at film boiling of a liquid in a porous medium on a vertical heated wall. An analytical solution was obtained for the problem using the porous medium model in the Darcy-Brinkman

Бібл. 17, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: теплообмін, плівкове кипіння рідини, пористе середовище.

c_p – теплоємність при постійному тиску;

g – гравітаційне прискорення;

G – масова витрата;

k – теплопровідність;

K – проникність;

L_b – теплота пароутворення;

p – тиск;

q – тепловий потік;

T – температура;

u – x -компонента швидкості;

μ – динамічна в'язкість пари;

ρ – густина пари;

$\Delta\rho$ – різниця густини рідини і пари;

ϕ – пористість;

x, y – декартові координати;

δ – товщина плівки;

η – безрозмірна змінна;

Ja – число Якоба;

Nu – число Нуссельта;

Ra – число Релея;

Re – число Рейнольдса.

Індекси нижні:

eff – ефективний;

s – пористе тіло;

w – стінка;

∞ – за межами плівки пари;

0 – відсутність пористого середовища.

Використання в теплообмінному обладнанні пористих матеріалів є одним з ефективних засобів інтенсифікації теплообміну в системах охолодження теплообмінного обладнання енергетичних установок, радіоелектронних приладів. Велика кількість робіт присвячена дослідженням процесів переносу в каналах з пористими структурами з примусовою конвекцією теплоносія [1]. Особлива увага приділяється використанню пористих матеріалів як інтенсифікаторів теплообміну при кипінні в теплообмінному обладнанні атомної енергетики і системах охолодження на основі теплових труб [2,3]. У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу різних параметрів пористого середовища на процеси кипіння і конденсації. В роботі [3] представлені результати досліджень процесів кипіння і конденсації в пористому середовищі теплової труби на основі математичної моделі двофазної суміші. Визначе-

но вплив параметрів пористого тіла на теплообмінні процеси. Результати чисельного моделювання тепломасопереносу при кипінні в пористому середовищі на основі моделі двофазної суміші з урахуванням і без врахування локальної термічної нерівноважності представлені в роботах [4,5]. Проаналізовано вплив параметрів процесу на розподіл температури і насичення. Показано, що тепловий потік, число Рейнольдса і теплопровідність твердої фази сильно впливають на початок і завершення процесу фазового переходу, в той час як вплив пористості незначний. В роботі [6] показано, що враховувати термічну нерівноважність при моделюванні теплообміну в двофазних потоках в пористому середовищі необхідно при високих теплових потоках і високих швидкостях. Результати моделювання процесів тепломасопереносу при плівковому кипінні рідини біля стінки, що нагрівається, надано в роботах [7-9].

Розгінна течія в мікроканалах проаналізована в [10,11], теплообмін при течії теплоносія в криволінійному пористому каналі розглянуто в роботі [12]. Показано вплив параметрів пористого тіла та умов проковзування на стінках на інтенсивність теплообміну в мікроканалах.

Метою роботи є отримання аналітичного рішення задачі течії та теплообміну при плівковому кипінні рідини в пористому середовищі, що межує з нагрітою твердою стінкою; дослідження впливу різних температурних граничних умов на стінці та параметрів пористого середовища на теплообмін. Отримання аналітичного рішення задачі дає можливість аналізу особливостей теплообміну при кипінні в пористих середовищах, вказує на фізичні тенденції та полегшує параметричні дослідження.

Математична модель

Розглядається стаціонарний процес кипіння рідини біля вертикальної нагрітої стінки, що занурена в пористе середовище. Плівка пари, що утворюється біля стінки, рухається вгору в напрямку осі x (рис. 1). Товщина парової плівки δ мала порівняно з довжиною, що дозволяє моделювання плівки як прикордонного шару. Температура пари і рідини на зовнішній границі плівки T_∞ , тобто для $y = \delta$, дорівнює температурі насичення при даному тиску. Температура стінки вища, ніж температура рідини $T_w > T_\infty$. Приймається рівність температур теплоносія і пористої матриці. Теплопровідність і конвективний теплообмін в паровій плівці в потоковому напрямку є незначними, в порівнянні з теплопередачею в напрямку, ортогональному до стінки.

Стаціонарний процес течії і теплообміну в плівці біля нагрітої стінки в пористому середовищі в наближенні пограничного шару описується за допомогою модифікованої моделі Дарсі-Брінкмана-Форхаймера [13] у вигляді

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} - \mu \frac{u}{K} - \frac{c_F \rho}{\sqrt{K}} u^2 = -g \Delta \rho \tag{1}$$

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = 0, \tag{2}$$

де c_F - безрозмірна константа Форхаймера.

Ця модель використовується при високих масових швидкостях теплоносія для чисел Рейнольда $Re_K > 1$, що визначені на основі середньої швидкості та проникності $Re_K = u_{av} \rho \sqrt{K} / \mu$. [13]. Така задача розглянута в роботі [14]. Розглянемо задачу у випадку малої масової швидкості теплоносія для $Re_K < 1$. За даними роботи [15], у діапазоні $Re_K < 1$ квадратичний опір (третій член) у правій частині рівняння (1) набагато менше лінійного

опору (другий член). Таким чином, рівняння руху (1) можна записати у наступній формі

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} - \mu \frac{u}{K} = -g \Delta \rho, \tag{3}$$

що відповідає підходу Дарсі-Брінкмана.

Граничні умови, що розглядаються, описують стан нерухомої рідини на зовнішній межі парової плівки [16]: для постійної температури стінки

$$u = 0, \quad T = T_w \quad \text{при} \quad y = 0 \tag{4}$$

$$u = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{при} \quad y = \delta \tag{5}$$

для постійного теплового потоку на стінці

$$u = 0, \quad \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{q_w}{k_{eff}}, \quad \text{при} \quad y = 0 \tag{6}$$

$$u = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{при} \quad y = \delta \tag{7}$$

Для випадку нерухомої рідини в роботі [16] запропоновано наступне рівняння балансу маси у вигляді

$$q_w = L_v G_l, \tag{8}$$

де

$$\int_0^x G_l dx = \int_0^\delta \rho u dy, \tag{9}$$

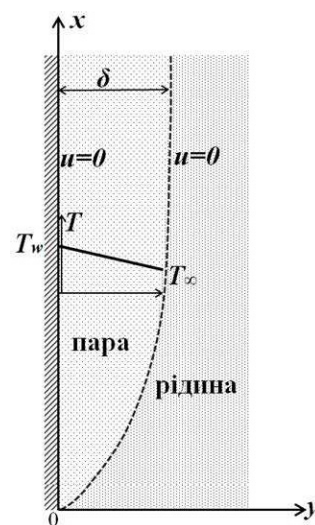


Рис. 1. Схема плівкового кипіння на вертикальній пластині

є масовою витратою теплоносія через плівку на одиницю довжини поверхні.

Загальний вигляд рішення однорідного рівняння (3) є таким

$$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} + C_1 \cosh\left(\frac{y}{\sqrt{K}}\right) + C_2 \sinh\left(\frac{y}{\sqrt{K}}\right). \quad (10)$$

У випадку нерухомої рідини з граничними умовами (4) – (7) рівняння (10) перетворюється на наступне

$$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{\delta-2y}{2\sqrt{K}}\right)}{\cosh\left(\frac{\delta}{2\sqrt{K}}\right)} \right) = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}(1-2\eta)\right)}{\cosh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}\right)} \right), \quad (11)$$

де $Da = \frac{K}{\delta^2}$ – число Дарсі, $\eta=y/\delta$ – безрозмірна координата.

У цьому випадку масова витрата теплоносія становить

$$G = \int_0^\delta \rho u dy = \frac{g\rho K\Delta\rho \left(\delta - 2\sqrt{K} \tanh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}\right) \right)}{\mu}. \quad (12)$$

Розглянемо окремо дві граничні умови на стінці: $T_w = \text{const}$ і $q_w = \text{const}$.

Гранична умова $T_w = \text{const}$

Використовуючи рівняння (8), (9) та (12), можна отримати наступне рівняння для товщини плівки пари

$$\delta^2 - 2\delta\sqrt{K} \tanh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}\right) = \frac{k_{eff} \Delta T \mu x}{g L_v K \rho \Delta \rho}, \quad (13)$$

де $k_{eff} = (1-\phi)k_s + \phi k$, k_s – теплопровідність пористого середовища.

Лінійний профіль температури, якій задовольняє рівняння (2), дає число Нуссельта у вигляді $Nu=x/\delta$, що дозволяє отримати таке трансцендентне рівняння

$$\frac{1}{Nu^2} - \frac{2\sqrt{Da_x}}{Nu} \tanh\left(\frac{1}{2Nu\sqrt{Da_x}}\right) = \frac{1}{Da_x Ra Ja} = \frac{1}{Ra_v Ja}, \quad (14)$$

або

$$\frac{1}{S^2} - \frac{2}{S} \tanh\left(\frac{S^{-1}}{2}\right) = \frac{1}{12Da_x^2 Nu_0^4}, \quad (15)$$

де

$$Ra_v = Ra Da_x, \quad S = Nu\sqrt{Da_x}.$$

Таким чином, ми маємо трансцендентне рівняння для числа Нуссельта як функції від місцевого числа Дарсі Da_x та числа Нуссельта Nu_0 , яке отримане для випадку відсутності пористого середовища [17], а саме

$$Nu_0 = \sqrt[4]{\frac{1}{12} Ra Ja}. \quad (16)$$

Іншою формою трансцендентного рівняння (14) є рівняння

$$\frac{1}{N^2} - \frac{2M}{N} \tanh\left(\frac{1}{2MN}\right) = \frac{1}{Ja}. \quad (17)$$

де

$$M = Da_x \sqrt{Ra_v}, \quad N = Nu / \sqrt{Ra_v}.$$

Розглянемо крайні випадки малої $Da \rightarrow 0$ і великої $Da \rightarrow \infty$ проникності пористого середовища, коли можна отримати рішення рівняння (13) в замкненій формі.

Крайній випадок $Da \rightarrow 0$

Розкладення лівої частини рівняння (13) в ряд Макларена при $K \rightarrow 0$ дає

$$\delta = \sqrt{\frac{k_{eff} \Delta T \mu x}{g L_v K \rho \Delta \rho}}. \quad (18)$$

У свою чергу, рівняння (18) дає змогу отримати наступне рішення для числа Нуссельта

$$Nu = \sqrt{Ra_v Ja}. \quad (19)$$

Нарешті, можна визначити відносне число Нуссельта у вигляді

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt{12Da_0} = \sqrt[4]{12Da}. \quad (20)$$

Крайній випадок $Da \rightarrow \infty$

Розкладення лівої частини рівняння (13) у ряд Макларена при $K \rightarrow \infty$ дає

$$\delta^4 - \frac{\delta^6}{10K} = \frac{12k_{eff} \mu \Delta T x}{g L_v \rho \Delta \rho} = \delta_0^4. \quad (21)$$

Зробимо заміну $\delta^2/\delta_0^2 = z$ в рівнянні (21), отримаємо

$$z^2 - \frac{z^3}{10\text{Da}_0} = 1. \quad (22)$$

Фізично значущим рішенням цього рівняння є

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[4]{1 - \frac{1}{10\text{Da}}}} \quad (23)$$

Що дозволяє отримати наближене рішення для чисел Нуссельта у вигляді

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} = \sqrt[4]{1 - \frac{1}{10\text{Da}}}. \quad (24)$$

В роботі [17] отримано рішення для чисел Нуссельта у випадку, коли рідина на зовнішній межі плівки пари рухається, у вигляді

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} = \sqrt[4]{1 - \frac{4}{9\text{Da}}} \quad (25)$$

На рис. 2 представлено порівняння значення чисел Нуссельта, що отримані за рівнянням (24) для випадку нерухокої рідини та за рівнянням (25) у випадку рухокої рідини на межі плівки пари

У випадку нерухокої рідини, як і у випадку з рухокою рідиною, нормовані числа Нуссельта зменшуються із зменшенням числа Дарсі. Однак у випадку нерухокої рідини це зменшення слабше.

Гранична умова $q_w = const$

На основі рівнянь (8), (9) можна отримати наступне рівняння для товщині плівки пари

$$\frac{g\rho K\Delta\rho}{\mu x} \left(\delta - 2\sqrt{K} \tanh\left(\frac{\text{Da}^{-1/2}}{2}\right) \right) = \frac{q_w}{L_0}, \quad (26)$$

або

$$\delta^2 - 2\delta\sqrt{K} \tanh\left(\frac{\text{Da}^{-1/2}}{2}\right) = \frac{k_{eff}\Delta T\mu x}{gL_0 K\rho\Delta\rho}. \quad (27)$$

Рівняння (27) дає можливість отримати трансцендентне рівняння для числа Нуссельта у вигляді

$$\frac{1}{\text{Nu}^2} - \frac{2\sqrt{\text{Da}_x}}{\text{Nu}} \tanh\left(\frac{1}{2\text{Nu}\sqrt{\text{Da}_x}}\right) = \frac{1}{\text{Ra}_v \text{Ja}} \quad (28)$$

Це рівняння також можна переписати у наступній формі

$$\frac{1}{S^2} - \frac{2}{S} \tanh\left(\frac{S^{-1}}{2}\right) = \frac{1}{12\text{Da}_x^2 \text{Nu}_0^4}, \quad (29)$$

або

$$\frac{1}{N^2} - \frac{2M}{N} \tanh\left(\frac{1}{2MN}\right) = \frac{1}{\text{Ja}}. \quad (30)$$

Розглянемо два крайні випадки для малих та великих значень проникності, що дозволяють отримати рішення рівняння (30) в замкненій формі.

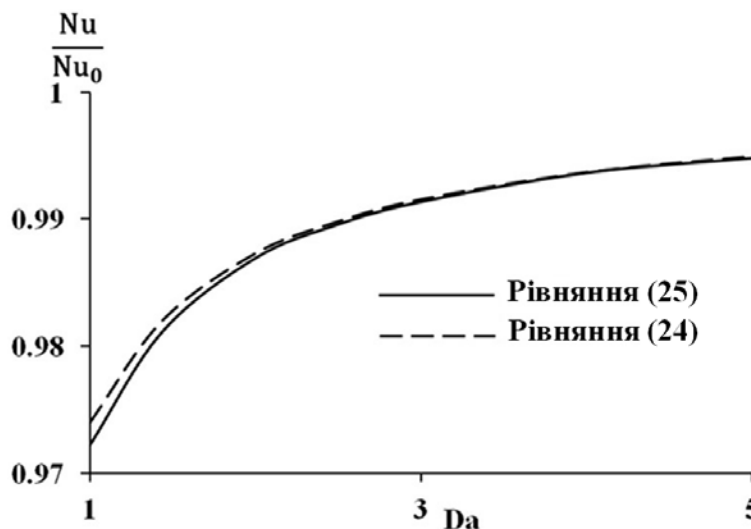


Рис. 2. Залежність нормованого числа Нуссельта від числа Дарсі

Крайній випадок $Da \rightarrow 0$

Використовуючи рівняння для товщини плівки (18) та рівняння (19) для числа Нуссельта, можна отримати вираз

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{144Da_0} = \sqrt[3]{12^{2/3}Da} \quad (31)$$

Крайній випадок $Da \rightarrow \infty$

Рівняння для товщини плівки у цьому випадку виглядає так

$$\delta^3 - \frac{\delta^5}{10K} = \delta_0^3 \quad (32)$$

Дійсний корінь рівняння (32)

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[3]{1 - \frac{1}{10Da}}}$$

дає можливість отримати наступне рівняння для відносного числа Нуссельта

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{1 - \frac{1}{10Da}} \quad (33)$$

Аналітичне рішення задачі теплообміну при плівковому кипінні рідини в пористому середовищі, що отримане в рамках підходу Дарсі – Брінкмана, представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Величина		Нерухома рідина	
		$T_w = \text{const}$	$q_w = \text{const}$
Граничні умови на стінці		$T = T_w$ $u = 0$	$\left(\frac{dT}{dy}\right)_{y=0} = -\frac{q_w}{k_{eff}}$ $u = 0$
Граничні умови на границі парового шару		$T = T_\infty$ $u = 0$	$T = T_\infty$ $u = 0$
Профіль швидкості		$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{\delta-2y}{2\sqrt{K}}\right)}{\cosh\left(\frac{\delta}{2\sqrt{K}}\right)} \right)$	
Трансцендентне рівняння для товщини плівки		$\delta^2 - 2\delta\sqrt{K} \tanh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}\right) = \frac{k_{eff}\Delta T\mu x}{gL_v K\rho\Delta\rho}$	
Товщина плівки для окремих випадків	$Da \rightarrow 0$	$\delta = \sqrt{\frac{k_{eff}\Delta T\mu x}{gL_v K\rho\Delta\rho}}$	$\delta = \frac{q_w\mu x}{gKL_v\rho\Delta\rho}$
	$Da \rightarrow \infty$	$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[4]{1 - \frac{1}{10Da}}}$	$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[3]{1 - \frac{1}{10Da}}}$
Число Нуссельта	$Da \rightarrow 0$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt{12Da_0} = \sqrt[4]{12Da}$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{144Da_0} = \sqrt[3]{12^{2/3}Da}$
	$Da \rightarrow \infty$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[4]{1 - \frac{1}{10Da}}$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{1 - \frac{1}{10Da}}$

Висновки

Дана робота присвячена дослідженню тепловіддачі при кипінні рідини на вертикальній стінці, зануреній у пористе середовище, за умов зміни параметрів пористості та умов нагрівання стінки. Для малих чисел Рейнольдса $Re_k < 1$ отримано аналітичне рішення задачі за допомогою моделі пористого середовища в наближенні Дарсі–Брінкмана.

Показано, що інтенсивність теплообміну під час плівкового кипіння в пористому середовищі слабша, в порівнянні з теплообміном при відсутності пористості і зменшується зі зменшенням проникності пористого середовища. Визначено, що вплив різних теплових граничних умов на стінці на тепловіддачу є незначним.

Робота виконана за фінансової підтримки програми наукових досліджень НАН України 6541230 «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок», 2022 – 2023 р. Проект 7/1/2 «Розроблення наукових засад процесів тепломасопереносу і горіння для вдосконалення технологій отримання та використання відновлюваних видів палива з метою декарбонізації енергетики України»

ЛІТЕРАТУРА

1. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография/ под ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий. 2007. 240 с.
2. Singh H., Myong R.S. Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Application in the Energy Sector. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 1. P.1–31
3. Hari R., Jolly T., Muraleedharan C. Analysis of Two-Phase Flow in the Capillary Wick Structure of Flat Heat Pipe with Different Orientation. *International Journal of Thermal Technologies*. 2015. Vol.5. No.1. P.63–69
4. Alomar O.R., Trimis D., Mendes M., Ray S. Numerical simulation of complete liquid-vapor phase change process inside porous media: A comparison between local thermal equilibrium and non-equilibrium models. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 112. P. 222 – 241.
5. Alomar O.R., Mendes M.A.A., Ray S. Trimis D. Numerical investigation of complete evaporation process inside porous evaporator using staggered and non-staggered grid arrangements. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 129. P.56 – 72.
6. Yuki K, Abei J, Hashizume H, Toda S. Numerical investigation of thermo fluid flow characteristics with phase change against high heat flux in porous media. *J Heat Trans. T ASME*. 2008. Vol.130(1). P.012602 (1–12)
7. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Abdallah S., Blinov D.G., Harmand S., Tyrinov A.I. Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. *Journal of Molecular Liquids*. 2016. V. 223. P. 156–164
8. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Harmand S., Tyrinov A.I. Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. V.91. P.77–88
9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The onset of bio-thermal convection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a fluid layer with an inclined temperature gradient. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2010. V. 20(1). P. 111–129
10. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. Start-up slip flow in a microchannel with a rectangular cross section. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2015. V.29(5). P.351–371
11. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. An analytical and numerical study on the start-up flow of slightly rarefied gases in a parallel-plate channel and a pipe. *Physics of Fluids*. 2015. V.27(4). 042001
12. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section. *Journal of Porous Media*. 2008. V.11(3). P. 241–246
13. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. - 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640 p.
14. Авраменко А.О., Ковецька М.М., Дмитренко Н.П., Ковецька Ю.Ю. Вплив пористого середовища на теплообмін при плівковому кипінні рідини. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2021. т.43, №3. С. 7–15.
15. Avramenko, A.A., Tyrinov, A.I., Shevchuk, I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V. Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 106. P. 1164–1173
16. Ellion, M.E. A Study of the mechanism of Boiling heat transfer. *Jet Prop. Lab. Memo, CIT*. 1954. 20, P. 1– 88.
17. Авраменко А.О., Ковецька М.М., Кондратьєва О.О., Сорокіна Т.В. Теплообмін при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагріває мій стінці в пористому середовищі. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2021. т.43, №1. С. 20–29.

FILM BOILING OF A LIQUID ON A VERTICAL PLATE IN A POROUS MEDIUM

Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I., Kondratieva E.A., Oliinyk L.V.

Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.1>

The paper presents results of the modeling of heat transfer at film boiling of a liquid in a porous medium on a vertical heated wall. Such processes are observed at cooling of high-temperature surfaces of heat pipes, microstructural radiators etc. Heating conditions at the wall were the constant wall temperature or heat flux.

An analytical solution was obtained for the problem of fluid flow and heat transfer using the Darcy-Brinkman porous medium model. It was shown that heat transfer at film boiling in a porous medium was less intensive than in the absence of a porous medium and further decreased with the decreasing permeability of the porous medium. A sharp decrease in heat transfer was observed for the Darcy numbers lower than five. Effects of different thermal boundary conditions on the heated wall on the heat transfer are insignificant.

References 17, figures 2, tables 1.

Key words: heat transfer, film boiling of liquid, porous medium.

1. Popov I.A. *Gidrodinamika i teploobmen v poristyh teploobmennyyh elementah i apparatah. Intensifikaciya teploobmena* [Hydrodynamics and heat transfer in porous heat exchange elements and apparatuses. Heat transfer intensification], Monografiya [Monograph], Kazan: Center for Innovative Technologies. 2007. 240 p. (in Rus)

2. Singh H., Myong R.S. *Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Application in the Energy Sector. Advances in Materials Science and Engineering.* 2018. Vol. 1. P.1–31

3. Hari R., Jolly T., Muraleedharan C. *Analysis of Two-Phase Flow in the Capillary Wick Structure of Flat Heat Pipe with Different Orientation. International Journal of Thermal Technologies.* 2015. Vol.5. No.1. P.63–69

4. Alomar O.R., Trimis D., Mendes M., Ray S. *Numerical simulation of complete liquid-vapor phase change process inside porous media: A comparison between local thermal equilibrium and non-equilibrium models. Int. J. of Thermal Sciences.* 2017. Vol. 112. P. 222 – 241.

5. Alomar O.R., Mendes M.A.A., Ray S. Trimis D. *Numerical investigation of complete evaporation process*

inside porous evaporator using staggered and non-staggered grid arrangements. *Int. J. of Thermal Sciences.* 2018. Vol. 129. P.56 – 72.

6. Yuki K, Abei J, Hashizume H, Toda S. *Numerical investigation of thermo fluid flow characteristics with phase change against high heat flux in porous media. J Heat Trans. T ASME.* 2008. Vol.130(1). P.012602 (1–12)

7. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Abdallah S., Blinov D.G., Harmand S., Tyrinov A.I. *Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. Journal of Molecular Liquids.* 2016. V. 223. P. 156–164.

8. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Harmand S., Tyrinov A.I. *Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film. International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2015. V.91. P.77–88.

9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. *The onset of bio-thermal convection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a fluid layer with an inclined temperature gradient. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow.* 2010. V. 20(1). P111-129.

10. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. *Start-up slip flow in a microchannel with a rectangular cross section. Theoretical and Computational Fluid Dynamics.* 2015. V.29(5). P.351–371

11. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. *An analytical and numerical study on the start-up flow of slightly rarefied gases in a parallel-plate channel and a pipe. Physics of Fluids.* 2015. V.27(4). 042001

12. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. *Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section. Journal of Porous Media.* 2008. V.11(3). P.241-246.

13. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media.* - 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640 p.

14. Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Dmitrenko N.P., Kovetska Yu.Yu. *[Influence of porous medium on heat exchange during film boiling of liquid], Теплофізика та теплоенергетика [Thermophysics and thermal power engineering].* 2021. V.43, №3. P. 7–15 (in Ukr)

15. Avramenko, A.A., Tyrinov, A.I., Shevchuk, I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V. *Mixed convection in a vertical flat microchannel. International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2017. Vol. 106. P. 1164–1173

16. Ellion, M.E. *A Study of the mechanism of Boiling heat transfer. Jet Prop. Lab. Memo, CIT.* 1954. 20, P. 1– 88.

17. Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Kondratieva E.A., Sorokina T.V. *[Heat transfer at film boiling of liquid on vertical heated wall in the porous environment], Теплофізика та теплоенергетика [Thermophysics and thermal power engineering].* 2021. V.43, №1. P. 20–29 (in Ukr)

Отримано 02.02.2022

Received 02.02.2022