

Р. С. МЕЛЬНИК, д. т. н. В. Ю. КРАВЕЦЬ, Л. В. ЛІПНИЦЬКИЙ

Україна, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: kravetz\_kpi@ukr.net

## КРИТИЧНІ ТЕПЛОВІ ПОТОКИ ПРИ КИПІННІ В УМОВАХ КАПІЛЯРНОГО ТРАНСПОРТУ У ДВОФАЗНИХ СИСТЕМАХ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ

*Представлено результати експерименту для низки зразків капілярних структур, виготовлених з мідних волокон діаметром від 10 до 50 мкм, зі значенням пористості в межах 65—85% і товщиною 0,3 і 0,5 мм. Було визначено, що зниження тиску насичення з 0,1 до 0,012 МПа призводить до зменшення граничних значень теплових потоків на 15—40% залежно від ефективного діаметра пор. В ході досліджень з'ясувалося, що максимум значень теплових потоків досягається для зразків з ефективним діаметром пор від 60 до 80 мкм. Також було визначено, що для зразків з товщиною 0,5 мм граничні теплові потоки на 5—20% вище, ніж для зразків з товщиною 0,3 мм.*

*Ключові слова:* критичний тепловий потік, тиск насичення, капілярна структура, кипіння, парова камера.

Розширення робочого діапазону двофазних теплопередавальних систем з часом стає все більш актуальним завданням у зв'язку з підвищенням рівня тепловідділення електронних компонентів при одночасному зменшенні їхніх габаритних розмірів [1]. В [2] показано, що використання капілярних структур, отриманих за допомогою фемтосекундної лазерної обробки поверхонь з неіржавіючої сталі, дозволяє збільшити значення критичних теплових потоків до 2,5 раз у порівнянні з гладкою поверхнею. Автори пов'язують такі результати з будовою пористої структури, а саме з тим, що в наведеній конфігурації розділяються потоки рідини та пари, чого не відбувається у звичайних анізотропних пористих середовищах. Автори [3] показали, що поверхневі пористі структури можуть збільшити значення критичних теплових потоків на 15—35%. Пористу структуру вони виготовляли методом лазерної обробки зразків з неіржавіючої сталі, товщина пористого шару складала від 10 до 45 мкм. Наведені дослідження проводились в умовах кипіння у великому об'ємі й атмосферного тиску, тому ці результати досить складно використовувати для проектування двофазних систем теплопередачі, таких як теплові труби та парові камери, де пористі структури насичені теплоносієм. Експериментальне дослідження [4], проведене за максимально наближених до функціонування парових камер умов, показало, що граничні значення теплових потоків в таких випадках визначаються транспортними характеристиками пористих структур. В [5] досліджували вплив стану поверхні на транспортні характеристики та ефективність тепловіддачі пористих структур, в яких переміщення робочої рідини відбувається в умовах атмосферного тиску за допомогою капілярного ефекту. Результати показали, що при збільшенні на 53%

витрати теплоносія, яку може забезпечити пориста структура, значення критичної густини теплового потоку зростає на 35—40%.

Що ж до металоволокнистих пористих структур (МВКС), то результатів аналогічних досліджень в літературних джерелах не зустрічається, хоча цей тип пористої структури має свої переваги перед іншими, наприклад високі значення коефіцієнтів проникності [6, 7], що знаходяться в межах від 10—11 до 10—9 м<sup>2</sup>. У цього типу пористих структур, на відміну від розповсюджених порошкових, відсутні закриті пори. Крім того, металоволокнисті пористі структури є досить пластичними та не руйнуються у разі механічної зміни геометрії двофазного пристрою [8].

Важливо зазначити, що складність та стохастичність процесів пароутворення в анізотропних пористих середовищах не дозволяють використовувати чисельні методи для отримання точних результатів. Більшість використовуваних моделей базуються на емпіричних залежностях та мають вузький діапазон застосування.

Для кращого розуміння впливу умов функціонування двофазних теплопередавальних пристроїв на їхню ефективність необхідно проводити експериментальні дослідження, в яких враховується вплив тиску насичення. Такий підхід дозволить врахувати чинники, які залежать від тиску насичення, наприклад відкритий діаметр парових бульбашок і зміна теплофізичних властивостей рідини. Визначення граничних значень теплових потоків у процесах пароутворення дозволить визначити межі функціонування двофазних теплопередавальних систем, що використовуються в системах термостабілізації потужних електронних компонентів.

Метою дослідження є визначення впливу параметрів пористих металоволокнистих структур та температури насичення на максимальні теплові потоки в процесі кипіння теплоносія в умовах його транспортування до зони нагріву завдяки капілярному ефекту.

**Експериментальна установка і методика проведення досліджень**

Експериментальна установка (рис. 1) — герметична камера, всередині якої розташовується досліджуваний зразок. Експериментальні зразки являють собою спечені волокнисті структури у вигляді дисків з припеченими мідними підкладками, які монтувались на поверхню нагрівача за допомогою пайки м'яким припоєм Sn60Pb40. Наявність мідної підкладки дозволила запобігти всмоктуванню припою пористою структурою в процесі пайки. Нагрівачем був мідний блок з вмонтованими нагрівальними елементами (сумарна потужність 1200 Вт) та температурними датчиками (термопарами), за допомогою яких визначалась величина відведеного теплового потоку. Розрідження в камері створювалось за допомогою вакуумного насосу.

Для підтримки потрібного тиску під час проведення експериментальних досліджень в корпусі камери передбачено теплообмінник, в якому конденсується пара. Відповідно до підведених теплових потоків в теплообміннику змінювалася витрата та температура охолоджувальної рідини, що дозволяло підтримувати необхідний тиск насичення. Для зменшення втрат тепла корпус експериментальної установки було теплоізолювано.

Експериментальні дослідження проводилися за трьох значень тиску насичення: 0,1, 0,025 і 0,012 МПа з максимальним відхиленням ±5%. Ці величини від-

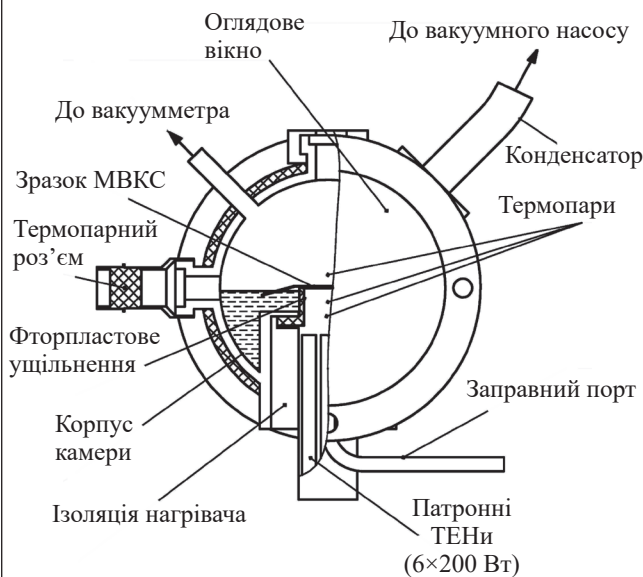


Рис. 1. Схема експериментальної установки для визначення критичних значень теплових потоків

повідують температурам насичення 100, 65 та 50°C, що обиралися з огляду на умови нормального функціонування двофазних систем для охолодження електронного обладнання.

У дослідженнях використовувалися зразки МВКС товщиною 0,3 та 0,5 мм зі значеннями пористості в діапазоні від 65 до 85%, виготовлені з мідних волокон довжиною 3 мм і діаметром  $d_b$  від 10 до 50 мкм. Для покращення змочуваності всі зразки проходили термічне окислення. Робоча рідина, у всіх експериментах це була дистильована вода, поступала до робочої області завдяки капілярному ефекту. У загальному випадку умови експерименту були наближені до умов функціонування парових камер.

**Результати досліджень та їх обговорення**

Після обробки експериментальних даних було отримано графічне представлення залежності коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  від густини теплового потоку. За допомогою цих графіків визначались значення критичних теплових потоків.

Максимальною густиною теплового потоку вважалась та, за якої інтенсивність тепловіддачі була максимальною або близькою до такої. На рис. 2 штриховими лініями вказано області нормального функціонування зразка МВКС для різних значень температури насичення  $t_{нас}$ . Область з різким зменшенням ефективності тепловіддачі позначено суцільною лінією.

У процесі узагальнення експериментальних даних було помічено, що гранична густина теплового потоку  $q_{max}$  залежить від ефективного діаметра пор зразків  $D_{эф}$ . На рис. 3 наведено графіки таких залежностей за температури насичення 100°C для зразків МВКС з волокнами різного діаметра  $d_b$ . Як видно, для зразків товщиною  $h = 0,3$  мм максимальне значення теплового потоку (120—140 Вт/см<sup>2</sup>) досягається при значеннях ефективного діаметра пор  $D_{эф} \approx 80$  мкм, після чого починається різкий спад до

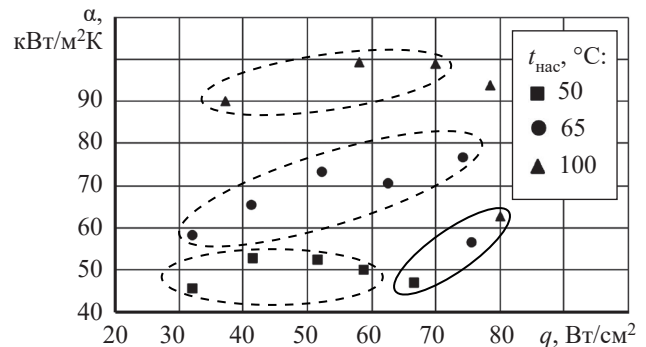


Рис. 2. Типова картина залежності коефіцієнта тепловіддачі від теплового потоку при кипінні в умовах капілярного транспорту за різних значень температури насичення  $t_{нас}$  (суцільною лінією позначено область з різким зменшенням ефективності тепловіддачі)

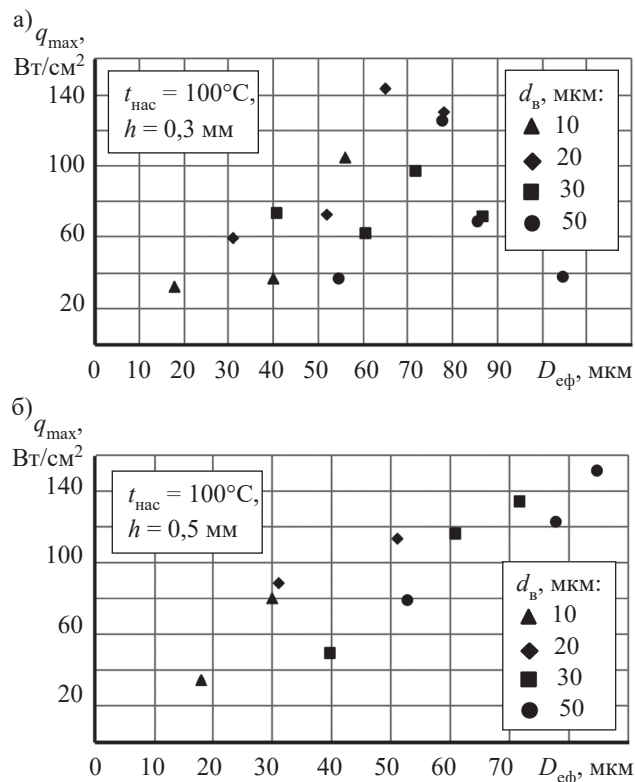


Рис. 3. Залежність максимальних значень густини теплового потоку від ефективного діаметра пор за температури насичення  $100^{\circ}\text{C}$  для зразків МВКС з волокнами різного діаметра товщиною  $0,3$  мм (а) та  $0,5$  мм (б)

$40 \text{ Вт/см}^2$  при  $D_{\text{еф}} \approx 100$  мкм. У діапазоні  $D_{\text{еф}}$  від  $60$  до  $80$  мкм значення  $q_{\text{max}}$  були близькими для зразків товщиною  $0,3$  та  $0,5$  мм, проте в діапазоні  $D_{\text{еф}}$  від  $20$  до  $60$  мкм для зразків більшої товщини значення граничної густини теплового потоку було більше на  $15$ — $20\%$ .

Аналізуючи рис. 3, можна сказати, що загалом картина для зразків з  $h = 0,5$  мм схожа на отриману для зразків з  $h = 0,3$  мм. Проте, як вже зазначалося вище, при збільшенні товщини зразка значення максимальних теплових потоків також зростають через збільшену транспортну здатність пористих структур. Тому не можна стверджувати, що пік значень граничних теплових потоків для них буде знаходитися в тому ж діапазоні  $D_{\text{еф}}$ , оскільки не досліджувалися зразки товщиною  $0,5$  мм з ефективним діаметром пор більше ніж  $80$  мкм. З іншого боку, для таких зразків розкид експериментальних точок є меншим, ніж при  $h = 0,3$  мм. Це може бути пов'язане з нерівномірністю товщини виготовлених зразків, яка знаходилася в межах  $0,01$ — $0,03$  мм: чим більше товщина, тим менше такі відхилення впливають на результати експерименту.

Якісно подібні результати отримано за температури насичення  $65$  та  $50^{\circ}\text{C}$  (рис. 4, 5). Як і в попередньому випадку, для зразків більшої товщини значення граничних теплових потоків були на  $10$ — $15\%$  вищі.

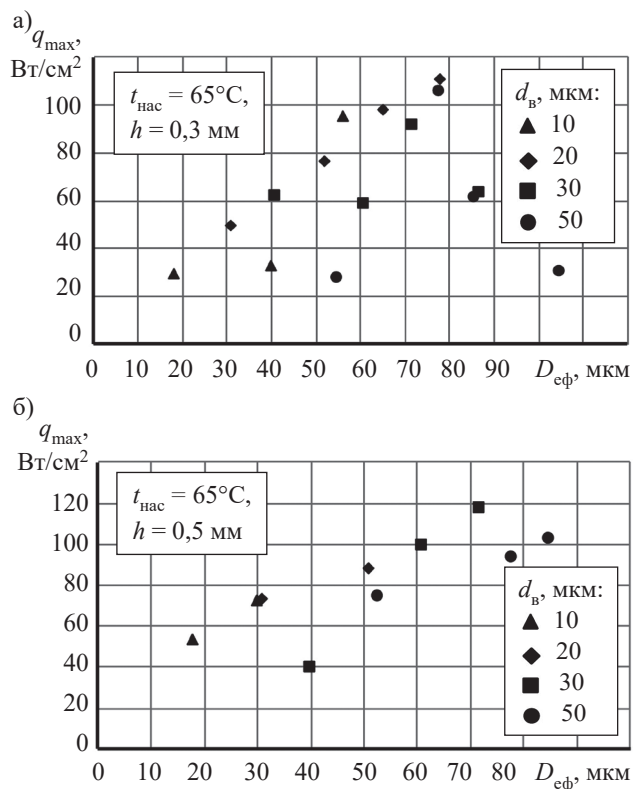


Рис. 4. Залежність максимальних значень густини теплового потоку від ефективного діаметра пор за температури насичення  $65^{\circ}\text{C}$  для зразків МВКС з волокнами різного діаметра товщиною  $0,3$  мм (а) та  $0,5$  мм (б)

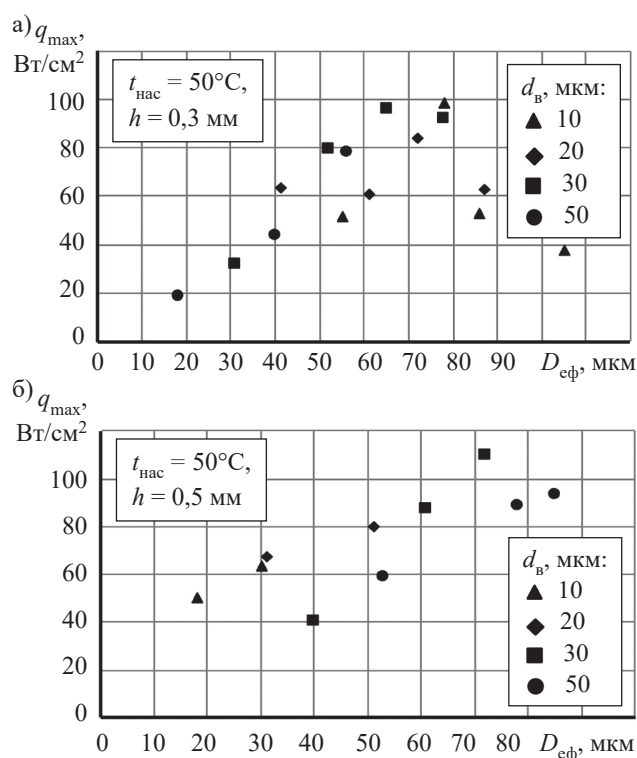


Рис. 5. Залежність максимальних значень густини теплового потоку від ефективного діаметра пор за температури насичення  $50^{\circ}\text{C}$  для зразків МВКС з волокнами різного діаметра товщиною  $0,3$  мм (а) та  $0,5$  мм (б)

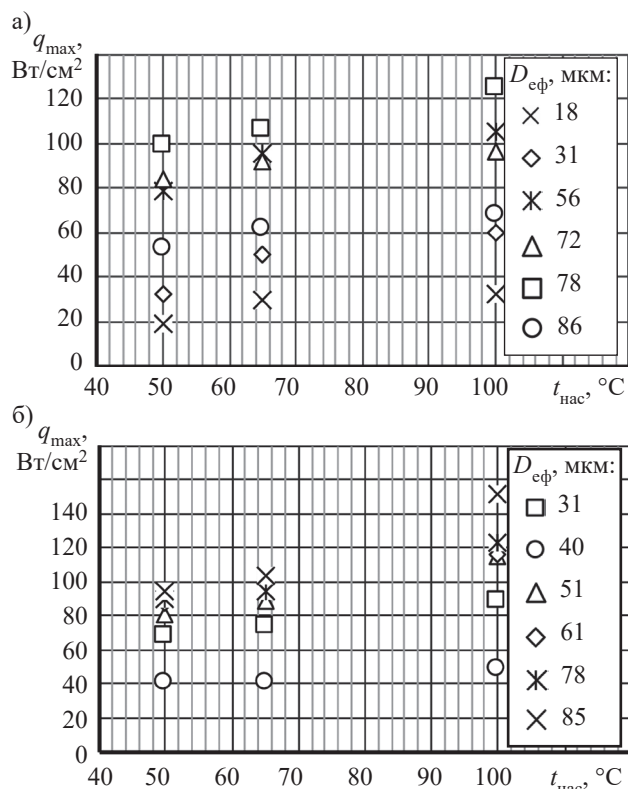


Рис. 6. Залежність максимальних значень густини теплового потоку від температури насичення для зразків МВКС з різним ефективним діаметром пор товщиною 0,3 мм (а) та 0,5 мм (б)

Наявність максимуму величини граничного теплового потоку в діапазоні значень  $D_{\text{еф}} = 60\text{—}80$  мкм можна пояснити оптимальним співвідношенням транспортних характеристик пористої структури, до яких відносяться капілярний напір та коефіцієнт проникності, який характеризує здатність пористої структури пропускати рідини або газу. Разом ці два параметри визначають транспортну здатність пористої структури, яка безпосередньо впливає на граничні значення теплового потоку. Було визначено, що величина  $q_{\text{max}}$  при зниженні температури насичення зі 100 до 50°C теж зменшується на 25—30%. Це, вочевидь, можна пояснити швидшим запарюванням пористої структури через збільшення відривного діаметра парових бульбашок. Крім того, зі зменшенням  $t_{\text{нас}}$  зменшується також і значення питомої теплоти пароутворення. Таким чином, за однакових значень теплового потоку за нижчих температур насичення генерується більша кількість парової фази.

На рис. 6 представлено залежність значень максимальної густини теплового потоку від температури насичення для різних  $D_{\text{еф}}$ . У загальному випадку зменшення  $t_{\text{нас}}$  зі 100 до 50°C призводить до зниження  $q_{\text{max}}$  від 15% (зразок товщиною 0,5 мм з  $D_{\text{еф}} = 40$  мкм) до 50% і більше (зразок товщиною 0,3 мм з  $D_{\text{еф}} = 31$  мкм). Таким чином вплив температури насичення на граничні значення густини те-

плогового потоку є різним за кількісними показниками залежно від ефективного діаметра пор зразка МВКС.

### Висновки

Проведене дослідження показало, що зменшення тиску насичення з 0,1 до 0,012 МПа призводить до зменшення критичних теплових потоків при кипінні рідини на 15—50% залежно від параметрів пористої структури. Незалежно від температури насичення оптимальним з погляду максимальних значень теплового потоку діапазоном величини ефективного діаметра пор є 60—80 мкм. Збільшення товщини зразків з 0,3 до 0,5 мм призводить до зростання величини критичного теплового потоку на 10—15%.

Очевидно, що в процесі проектування та створення ефективних систем охолодження на базі теплових труб та парових камер необхідно вибирати капілярну структуру з оптимальними для конкретної задачі параметрами та враховувати фактори, що можуть підвищити теплопередавальні характеристики таких двофазних систем охолодження.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Mori S., Okuyama K. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, vol. 35, no. 10, p. 946–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003>
- Kruse C.M., Anderson T., Wilson C. et al. Enhanced pool-boiling heat transfer and critical heat flux on femtosecond laser processed stainless steel surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 82, p. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.023>
- Hong F. J., Cheng P., Wu H.Y., Sun Z. Evaporation/boiling heat transfer on capillary feed copper particle sintered porous wick at reduced pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 63, p. 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.086>
- Wen R., Xub Sh., Lee Yu.-Ch., Yangabc R. Capillary-driven liquid film boiling heat transfer on hybrid mesh wicking structures. *Nano Energy*, 2018, vol. 51, p. 373–382. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.06.063>
- Кравец В. Ю., Мельник Р. С., Червонюк А. А., Шевель С. В. Исследование проницаемости металловолоконистых капиллярных структур тепловых труб для охлаждения электроники. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 3–4, с. 47–52. ) <https://doi.org/10.15222/tkea2020.3-4.47>
- Косторнов А. Г. *Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов* : В 2 т. Т. 1. Київ, Наукова думка, 2003, т. 2, 548 с.
- Кравец В. Ю., Кравец Д. В. Механические свойства капиллярных структур применительно к условиям функционирования в тепловых трубах. *Технологічний аудит та резерви виробництва*, 2013, т. 1, № 1(9), с. 24–28.
- Melnyk R. S., Nikolaenko Yu. E., Alekseiik Ye. S., Kravets V. Yu. Heat transfer limitations of heat pipes for a cooling systems of electronic components. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, 2017, p. 692–695. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100316>

Дата надходження рукопису  
до редакції 15.08 2021 р.

CRITICAL HEAT FLUXES DURING BOILING UNDER CAPILLARY TRANSPORT  
CONDITIONS IN TWO-PHASE THERMOSTABILIZATION SYSTEMS

The increase in heat generated by electronic components requires a need to expand the range of two-phase heat exchangers for thermal stabilization of the components. The efficiency of the two-phase systems (heat pipes, steam chambers) can be improved by using metal-fiber capillary-porous structures. Experimental studies for the conditions close to the operating conditions of heat pipes and vapor chambers described in known publications are rather incomplete. The aim of this study is to determine the boundary heat fluxes for water boiling on porous structures under capillary soaking, to investigate the influence of saturation pressure and structural parameters on the boundary heat fluxes, and to determine the optimal structural parameters of porous samples, i.e. such parameters that would allow the highest possible values of critical heat fluxes under given conditions.

The authors investigate 0.3 and 0.5 mm thick capillary structure samples made of copper fibers with a diameter of 10 to 50  $\mu\text{m}$  and a porosity range of 65–85%.

The study has found that reducing the saturation pressure from 0.1 to 0.012 MPa leads to a decrease in the boundary heat flux values by 15–40%, depending on the effective pore diameters. The study allowed establishing that the maximum heat flux values are achieved for the samples with an effective pore diameter of 60 to 80  $\mu\text{m}$ . It was also found that for the 0.5 mm thick samples, the boundary heat fluxes are 5–20% higher than for the 0.3 mm thick samples.

The decrease in saturation pressure has been found to lead to a decrease in the range of two-phase heat exchange systems. For a number of samples, the authors have obtained the optimal effective pore diameters ensuring the highest critical heat flux values in the studied range.

Keywords: critical heat flux, saturation pressure, capillary structure, boiling, heat pipe, vapor chamber.

## REFERENCES

1. Mori S., Okuyama K. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, vol. 35, no. 10, p. 946–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003>
2. Kruse C.M., Anderson T., Wilson C. et al. Enhanced pool-boiling heat transfer and critical heat flux on femtosecond laser processed stainless steel surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 82, p. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.023>
3. Hong F. J., Cheng P., Wu H.Y., Sun Z. Evaporation/boiling heat transfer on capillary feed copper particle sintered porous wick at reduced pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 63, p. 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.086>
4. Wen R., Xub Sh., Lee Yu.-Ch., Yangabc R. Capillary-driven liquid film boiling heat transfer on hybrid mesh wicking structures. *Nano Energy*, 2018, vol. 51, p. 373–382. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.06.063>
5. Kravets V. Y., Melnyk R. S., Chervoniuk A. A., Shevel Ye. V. Investigating permeability of metal felt capillary structures of heat pipes for cooling electronics. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 3–4, pp. 47–52. <https://doi.org/10.15222/tkea2020.3-4.47> (Rus)
6. Kostornov A.G. *Materialovedeniye Dispersnykh i Poristykh Metallov i Splavov* [Materials Science of Dispersed and Porous Metals and Alloys]. Kyiv, Naukova Dumka, 2003, vol. 2, 548 p.
7. Kravets V. Y., Kravets D. V. Capillary structures mechanical properties in respect to functioning conditions in heat pipes. *Technology Audit and Production Reserves*, 2013, vol. 1, no. 1(9), pp. 24–28. (Rus)
8. Melnyk R. S., Nikolaenko Yu. E., Alekseik Ye. S., Kravets V. Yu. Heat transfer limitations of heat pipes for a cooling systems of electronic components. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, 2017, p. 692–695. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100316>

## Опис статті для цитування:

Мельник Р. С., Кравец В. Ю., Ліпницький Л. В. Критичні теплові потоки при кипінні в умовах капілярного транспорту у двофазних системах термостабілізації. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 41–45. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.41>

## Cite the article as:

Melnyk R. S., Kravets V. Yu., Lipnitsky L. V. Critical heat fluxes during boiling under capillary transport conditions in two-phase thermostabilization systems. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 41–45. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.41>