

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

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського
E-mail: yunikola@ukr.net; m.roman.kpi@gmail.com

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПАРОУТВОРЕННЯ ТА ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОЇ ПЛОСКОЇ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ З РІЗЬБОВИМ ВИПАРНИКОМ

Досліджувалися процеси випаровування та кипіння в тонкій плоскій гравітаційній тепловій трубі з різьбовим випарником в діапазоні теплових потоків від 5 до 55 Вт при різних кутах її нахилу до горизонту (0–90°). Основним завданням було візуальне виявлення закономірностей процесу пароутворення в умовах щілиноподібного парового каналу та подальше їх зіставлення з отриманими тепловими характеристиками. Показано взаємозв'язок між візуально виявленими особливостями протікання процесу пароутворення та тепловими характеристиками теплової труби — тепловим опором та середнім значенням температури в зоні нагріву.

Ключові слова: теплообмін, тепла труба, пароутворення, кипіння, тепловий опір.

Збільшення потужності електронних компонентів та питомих теплових потоків в комп'ютерних чипах до 2,0–4,5 МВт/м² з локальними гарячими точками (12–45 МВт/м²) [1] призводить до необхідності підвищення ефективності систем охолодження. Одним зі шляхів підвищення ефективності повітряних систем охолодження є використання в них теплових труб (ТТ) та термосифонів, теплопровідність яких на порядок перевищує теплопровідність міді [2–4], що дозволяє розосередити локальний тепловий потік на більшу поверхню теплообміну та знизити температуру електронних компонентів.

На сьогодні існують різноманітні конструкції теплових труб та термосифонів, які постійно поповнюються новими, проводяться дослідження з вивчення особливостей процесів теплообміну та гідродинаміки в них. З цією метою широко використовуються методи візуалізації внутрішніх процесів в теплових трубах. Так, в роботі [4] за допомогою ІЧ-візуалізації оцінювалась ефективність застосування термосифонів для повітряного охолодження підсилювачів потужності телекомунікаційного обладнання. Показано, що при потужності електронних компонентів 140 Вт застосування термосифона дозволило знизити загальний тепловий опір між основним підсилювачем потужності та навколишнім повітрям на 25%. В роботі [5] наводяться результати візуалізації процесів кипіння в скляному термосифоні з внутрішнім діаметром 20 мм з локальним джерелом підведення теплоти. Робоча рідина — вода. В результаті досліджень визначено основні закономірності протікання процесів залежно від висоти стовпа рідини над джере-

лом теплоти, картину градієнта тиску під час зародження, формування та відриву парових бульбашок. Автори [6] отримали картину протікання процесів кипіння фреону R134a та води в петлевому термосифоні. Через відносно великі розміри парового простору та коефіцієнту заповнення отримані візуальні зображення процесів кипіння мало відрізняються від попереднього дослідження для малих значень теплового потоку. В роботі [7] наводяться результати візуальних досліджень плоского багатоканального термосифона довжиною 144 мм з прямокутними каналами з поперечним перерізом 2×2 мм з різними робочими рідинами (етанол, ацетон, фреон R141b). Зміна коефіцієнту заповнення в широкому діапазоні (від 11,8 до 66%) дозволила спостерігати особливості процесів кипіння та знаходити між ними відмінності, зазначені у висновках роботи. Автори [8, 9] візуально спостерігали процеси активного кипіння та конденсації на мідних поверхнях, спеціальною обробкою яких досягались різні параметри змочування робочими рідинами (ацетон, етанол). Як і в попередніх роботах, тут наводиться розкадрування швидкісного фільмування. В роботі [10] відображено гідродинамічні процеси в термосифоні з внутрішнім діаметром 25 мм при куті нахилу до горизонту 10°. Наведено кількісну характеристику впливу орієнтації в просторі на тепловий опір експериментального зразка в широкому діапазоні значень коефіцієнтів заповнення. Автори [11] представляють картини кипіння, отримані для низки теплоносіїв (вода, ацетон, HFE7100) в умовах вертикальної орієнтації термосифона. Встановлено, що візуально процес активного пароутворення схожий до наведеного у [8].

Аналіз представлених в літературі робіт вказує на те, що більшість з них висвітлює питання процесів

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2020.02/0357).

пароутворення в двофазних системах з відносно великим діаметром парового простору та в умовах відносно довгої зони нагріву, яка дозволяє формуватися паровим снарядам. Разом з тим, у низці практичних застосувань ефективним було б використання тонких плоских гравітаційних теплових труб (ГРТТ) з різьбовою капілярною структурою [12, 13] з короткою зоною нагріву.

Метою цієї роботи було проведення експериментальних досліджень, які дозволяють візуально спостерігати процеси пароутворення у тонкій плоскій ГРТТ з різьбовою капілярною структурою в умовах щілиноподібного парового каналу з відносно короткою зоною випаровування і невеликою кількістю робочої рідини. Одночасно з візуальним спостереженням процесів пароутворення вивчався і вплив теплового навантаження та кута нахилу на основні теплові характеристики ГРТТ — тепловий опір та температуру в зоні нагріву.

Експериментальна установка та конструкція експериментального зразка ГРТТ

Для досягнення поставленої мети було створено експериментальну установку (рис. 1), яка дозволяла спостерігати за процесами пароутворення в ГРТТ при різній орієнтації в просторі та визначати її теплові характеристики.

Основним елементом робочої ділянки є експериментальний зразок тонкої плоскої ГРТТ з різьбовою капілярною структурою в зоні випаровування (рис. 2), тобто з різьбовим випарником. Експериментальний зразок ГРТТ являє собою мідну трубку прямокутного поперечного перерізу розмірами 15,5×4,0 мм довжиною 245 мм, виготовлену шляхом пресування циліндричної заготовки діаметром 12 мм з товщиною стінки 1 мм. У циліндричній заготовці на довжині 30 мм з одного кінця по-

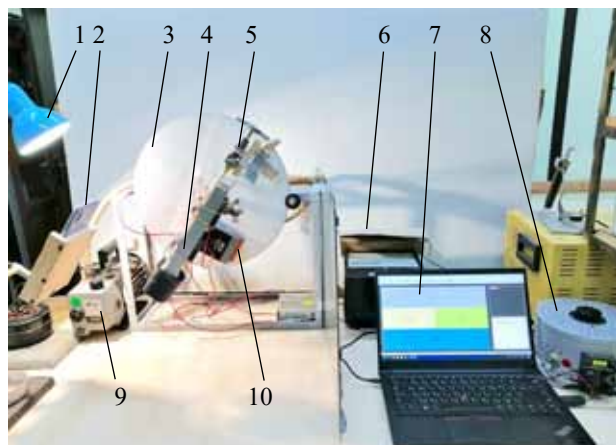


Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки: 1 — джерело світла; 2 — швидкісна камера; 3 — поворотний пристрій; 4 — експериментальний зразок ГРТТ з радіатором; 5 — голковий вентиль; 6 — ватметр; 7 — персональний комп'ютер; 8 — лабораторний автотрансформатор; 9 — вакуумний насос; 10 — модуль збору даних

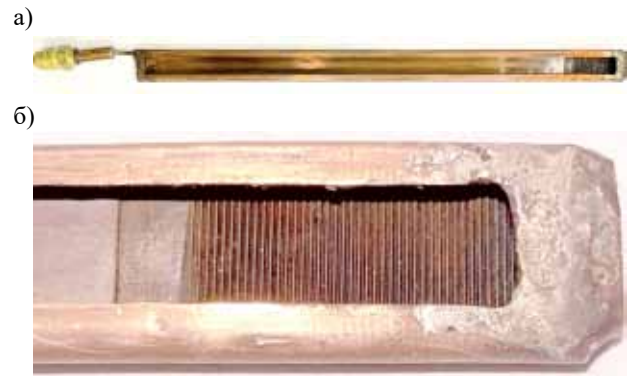


Рис. 2. Зовнішній вигляд експериментального зразка плоскої ГРТТ до установки прозорої скляної вставки (а) та різьбової капілярної структури в зоні випаровування у збільшеному масштабі (б)

передньо було нарізано внутрішню метричну різьбу М11 з дрібним кроком 0,5 мм. У верхній основі спресованої труби прямокутного поперечного перерізу шляхом фрезерування було виконано прямокутний паз розмірами 9,5×240 мм (рис. 2, а). З протилежної до різьбової частини сторони було впаяно клапан Шредера з капілярною трубкою, яка запобігала накопиченню робочої рідини в об'ємі клапана. За процесами пароутворення спостерігали через оглядове скло, герметично приєднане до корпусу за допомогою силіконового герметика. Робочою рідиною було обрано 96%-й розчин етилового спирту.

Імітатор теплового потоку довжиною 40 мм монтували на корпус ГРТТ через теплопровідну графітову прокладку. Зона нагріву (ЗН) була теплоізольована для зменшення втрат теплоти. Теплота відводилася радіатором розмірами 200×42×26 мм з п'ятьма ребрами охолодження висотою 20 мм, виконаних з кроком 10 мм на основі товщиною 6 мм. Товщина ребра біля основи — 2,4 мм, на вершині — 1,2 мм. Відведення теплоти від радіатора відбувалось вимушеною конвекцією навколишнього повітря за допомогою двох вентиляторів типу Gembird D40SM-12A. При цьому скляна вставка охолоджувалась вільною конвекцією навколишнього повітря.

Дослідження проводились для різних положень ГРТТ — від горизонтального до вертикального, а саме при кутах нахилу до горизонту 0°, 15°, 30°, 60° та 90°. Ці значення обирались з огляду на практичне застосування в системах охолодження електроніки. Зазначимо, що кут нахилу ГРТТ до горизонту визначався як кут нахилу до горизонту її грані розміром 15,5×245,0 мм (площини ГРТТ).

Методика проведення досліджень з отриманням візуальних даних

Перед початком кожної серії дослідів експериментальний зразок ГРТТ встановлювався та фіксувався під певним кутом нахилу за допомогою поворотного механізму 3 (див. рис. 1). За допомогою вакуумного насоса 9 типу ITE МК-50-DS видалявся несконден-

сований газ. Вмикалась система збору та передачі даних на основі персонального комп'ютера 7 зі спеціалізованим програмним забезпеченням та модуля збору даних 10 типу ICP CON M-7018-16. До модуля збору даних було під'єднано десять мідь-константових термопар (Т-типу), шість з яких вимірювали температуру в зонах випаровування, конденсації та транспорту, по дві в кожній зоні.

Вмикались вентилятори та імітатор теплового потоку. Тепловий потік підводили та контролювали за допомогою лабораторного автотрансформатора 8 типу ЛАТР 2.5-И та ватметра 6 типу Д5016. Фільмування починалось після встановлення стаціонарного теплового режиму роботи на певному значенні теплової потужності. При цьому джерело світла 1 спрямовувалось на робочу область експериментального зразка ГРТТ 4. За допомогою швидкісної камери 2 знімалися гідродинамічні процеси при пароутворенні в зоні випаровування зі швидкістю знімання 240 кадрів на секунду.

Така відеофіксація процесу пароутворення проводилася для фіксованих значень теплового потоку в діапазоні від 5 до 55 Вт, які охоплювали два режими роботи ГРТТ: режим випаровування та режим кипіння. Максимальне значення теплового потоку в ЗН обмежувалося температурними умовами надійної роботи макета без його розгерметизації під дією внутрішнього тиску. Максимальним значенням температури в зоні нагріву було обрано 80°C, що відповідає тиску насиченої пари етилового спирту 1,086 бар.

Перед кожною наступною серією досліджень експериментальний зразок ГРТТ охолоджувався, встановлювався в нове положення, після чого всі наведені вище дії повторювались. Зазначимо, що при зміні орієнтації ГРТТ позиція швидкісної камери налаштовувалась таким чином, щоб площини об'єктива та оглядового скла зразка були паралельні між собою.

В результаті обробки отриманих відеофайлів були створені картини протікання процесів пароутворення в зоні випаровування.

Результати досліджень експериментального зразка ГРТТ

Динаміка процесів пароутворення у ГРТТ в умовах її фіксованого положення у просторі та зміні теплового потоку

На **рис. 3** показано, як змінюється характер процесів пароутворення у ГРТТ при збільшенні теплового потоку Q в зоні нагріву від 20 до 45 Вт в умовах вертикальної орієнтації теплової труби в просторі. Зображення процесів для $Q < 20$ Вт тут не наводяться, оскільки за таких умов ГРТТ функціонує в режимі випаровування.

При $Q = 20$ Вт (рис. 3, а) спостерігається активація поодинокого центру пароутворення, що призводить до вибухоподібного кипіння, спричиненого пе-

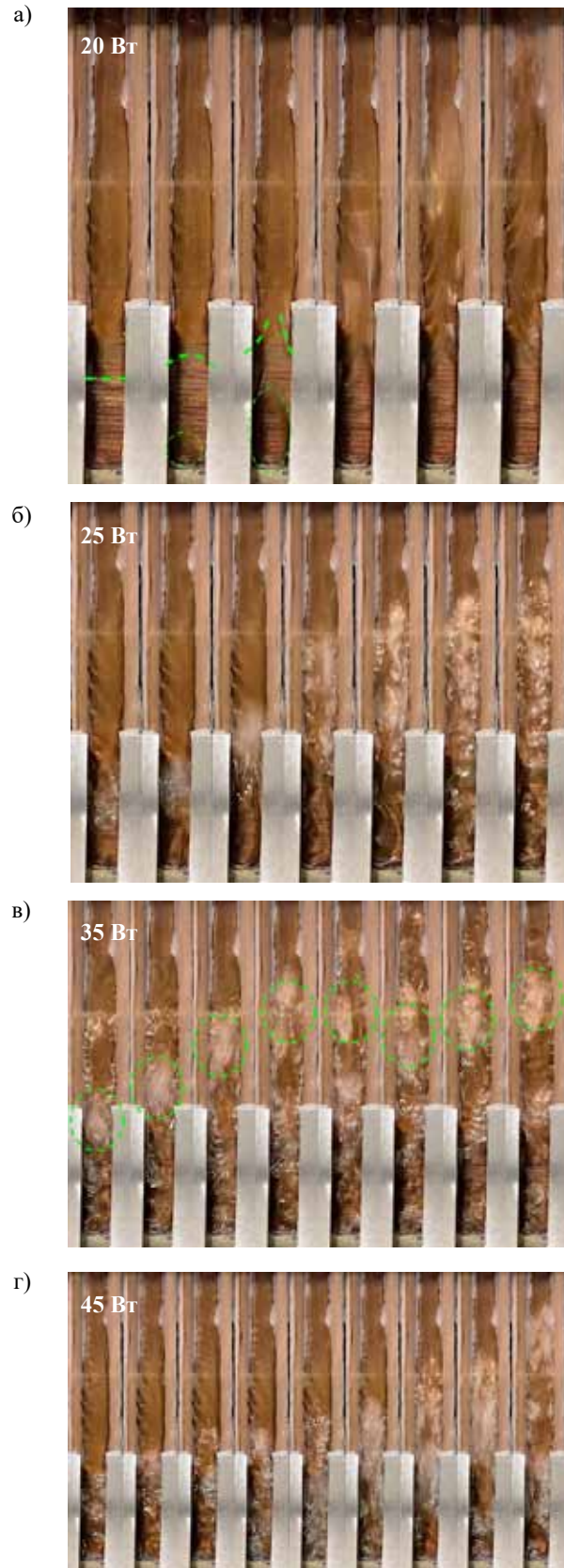


Рис. 3. Моменти процесу пароутворення у вертикально орієнтованій ГРТТ, представлені з часовим кроком 8 мс, для різних значень теплового потоку (у Вт):

а — 20; б — 25; в — 35; г — 45

регрітою рідиною в примезовому шарі, яке характеризується швидким зростанням та відривом парової бульбашки. За такого режиму функціонування велика частина теплоносія виноситься далеко за межі зони нагріву. Збільшення потужності до 25 Вт призводить до активації додаткових центрів пароутворення (рис. 3, б), внаслідок цього робоча рідина виноситься з різною швидкістю за межі ЗН частинами, що призводить до утворення складної хаотичної гідродинамічної картини процесу. Це явище призводить до зменшення довжини, на яку виноситься робоча рідина за межі ЗН. З іншого боку, в таких умовах починає створюватись певна зона постійного знаходження робочої рідини поза ЗН. Формування такої зони стає більш очевидним при підвищенні теплового потоку до 35 Вт (рис. 3, в), коли спостерігається процес активного пароутворення із залученням великої кількості центрів пароутворення. Частина теплоносія постійно знаходиться за межами ЗН. Візуально спостерігається певне ядро паро-рідинної суміші, що рухається коливально (обведено пунктиром). Такий рух обумовлюється нерівномірною генерацією пари в часі та неоднаковістю формування паро-рідинного фронту. Також слід зауважити, що ядро не складається лише з теплоносія в рідкій фазі, а являє собою паро-рідинну суміш складної хаотичної форми, що змінюється з часом.

Підвищення теплового потоку до 45 Вт (рис. 3, г) виводить систему із описаної рівноваги, й розпочинається процес, візуально наближений до зображеного на рис. 3, а. Проте у цьому випадку винесення робочої рідини обумовлюється не поодинокими паровими бульбашками, що утворюються при майже одночасній активації центрів пароутворення, а їх скупченнями, які виникають при активації великої кількості близько розташованих центрів пароутворення.

Збільшення теплової потужності до 55 Вт в загальному випадку картину процесу не змінює, спостерігається лише більша його інтенсивність, а подальше підвищення теплової потужності унеможливується температурним обмеженням функціонування експериментального зразка ГРТТ.

Динаміка процесів пароутворення у ГРТТ в умовах фіксованого значення теплового потоку в зоні нагріву та зміні її кута нахилу

Розглянемо вплив орієнтації ГРТТ в просторі на протікання процесів пароутворення в зоні випаровування.

Перехід від режиму випаровування до режиму малорозвиненого кипіння досліджувався за різної орієнтації ГРТТ в просторі при фіксованій величині підведеного теплового потоку 20 Вт. Картина процесів при кутах нахилу 60° та 30° (рис. 4) аналогічна тій, що спостерігалась при вертикальному положенні, а саме — при активації поодиноких центрів пароутворення із зони нагріву паровими бульбашками вино-

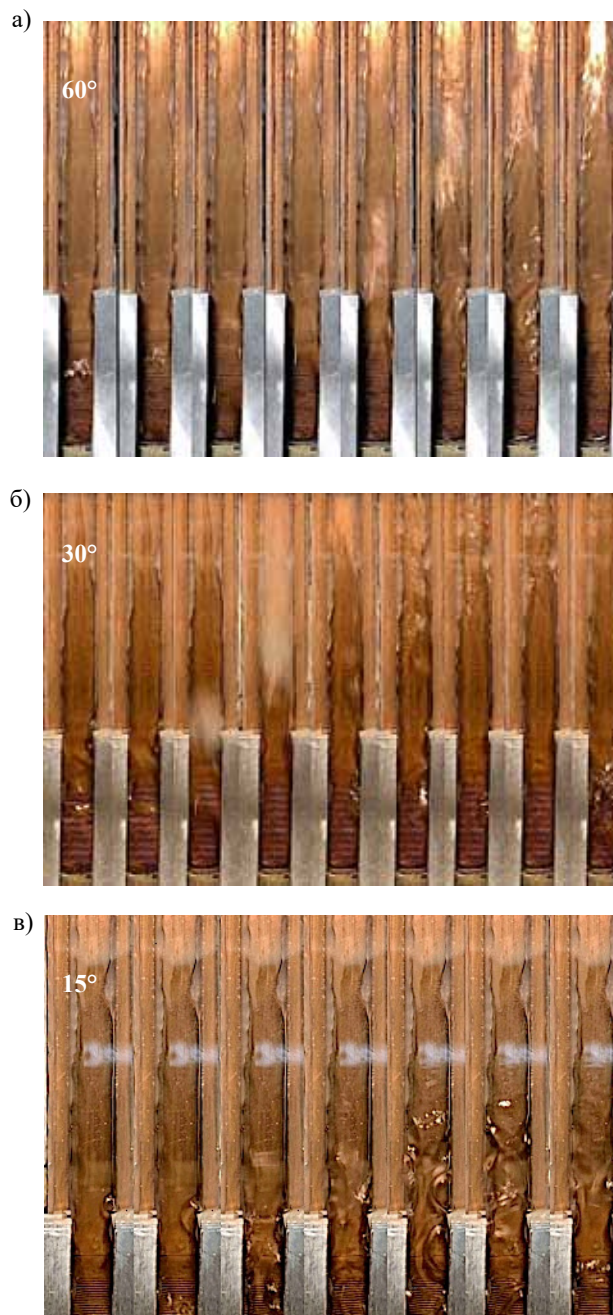


Рис. 4. Моменти процесу пароутворення у ГРТТ, представлені з часовим кроком 8 мс, при $Q = 20$ Вт для різних значень кута нахилу:
а — 60°; б — 30°; в — 15°

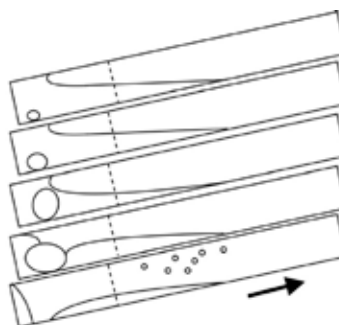


Рис. 5. Схематичне зображення процесу кипіння в умовах малого кута нахилу ГРТТ (напрямок руху пари показано стрілкою, а межі ЗН — пунктирною лінією)

ситься велика кількість робочої рідини (інколи навіть до повного осушення) з подальшим поверненням рідини до ЗН під дією сили гравітації. Зменшення кута нахилу призводило до збільшення часу повернення рідини до ЗН. Спостерігався також процес кипіння з тонких плівок після викидання основної маси робочої рідини за межі зони нагріву.

Особливий характер має картина кипіння при куті нахилу 15° (рис. 4, *в*), коли при активації поодиноких центрів пароутворення майже не відбувається вибухового кипіння, а робоча рідина не виноситься з зони нагріву. Очевидно, це відбувається через те, що при малому куті нахилу парова бульбашка майже одразу потрапляє через тонку плівку рідини у паровий простір, після чого потік пари практично без перешкод рухається до зони конденсації. Схематичне зображення цього процесу показано на **рис. 5**.

При підвищенні величини теплового потоку до 30 Вт активізуються додаткові центри пароутворення, що призводить до зміни візуальної картини. Як і при вертикальному положенні, при куті нахилу 60° (**рис. 6, а**) також відбувається утворення області поза зоною нагріву, в якій постійно знаходиться частина робочої рідини. В умовах більш пологого розташування ГРТТ (рис. 6, *б, в*) спостерігається часткове винесення парою теплоносія у рідкому стані. Особливістю процесу кипіння при куті нахилу 15° є постійне знаходження суттєвої частини робочої рідини поза межами зони нагріву.

Подальше збільшення підведеного теплового потоку до 40–50 Вт мало змінює картину процесів окрім їхньої інтенсивності.

Також спостерігали за особливостями процесів пароутворення при горизонтальному положенні ГРТТ. На **рис. 7** наведено результати візуалізації лише для значень теплового потоку 5 та 10 Вт, оскільки конфігурація ГРТТ та коефіцієнт заповнення не дозволили передати більший тепловий потік. За такої геометрії корпусу в горизонтальному положенні ГРТТ робоча рідина рівномірно розподілюється вздовж всієї

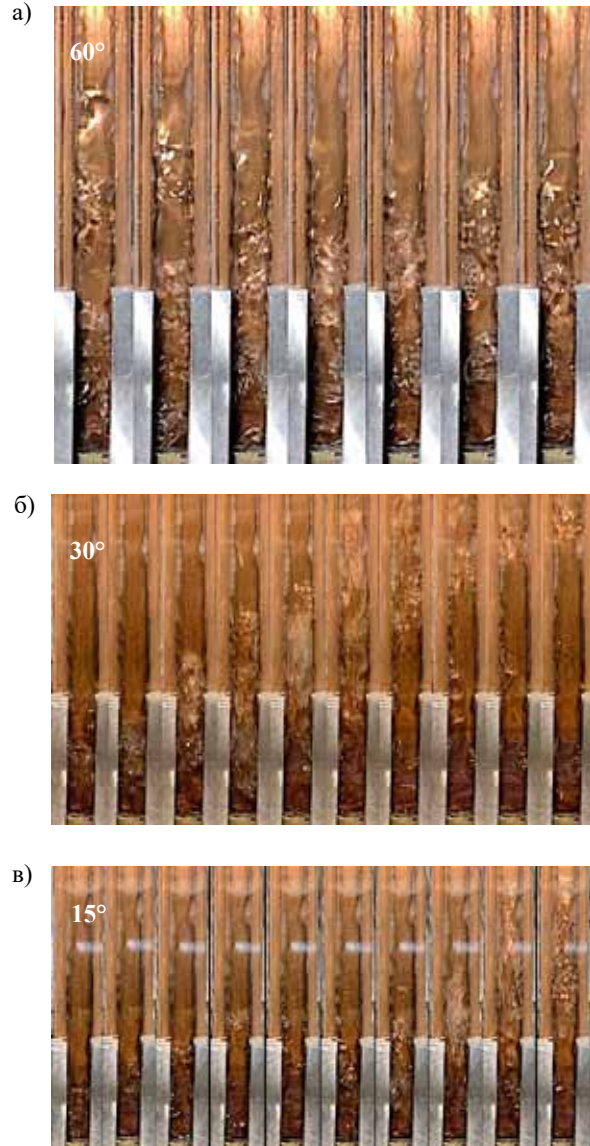


Рис. 6. Моменти процесу пароутворення у ГРТТ, представлені з часовим кроком 17 мс, при $Q = 30$ Вт для різних значень кута нахилу:

a — 60° ; *б* — 30° ; *в* — 15°

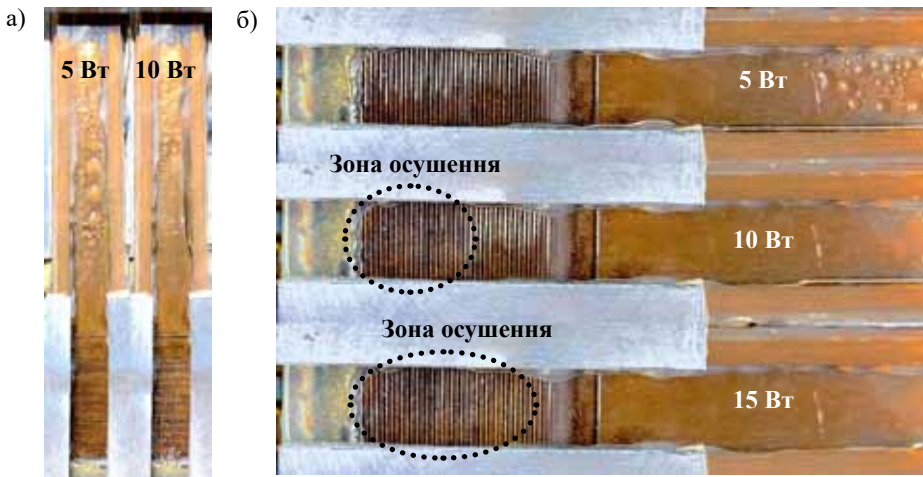


Рис. 7. Візуалізація особливостей процесу пароутворення при горизонтальному положенні площини ГРТТ (*a*) та бічному горизонтальному положенні ГРТТ (*б*)

нижньої площини. На рис. 7, а видно зміну відтінку різьбової частини випарника, яка відбувається при збільшенні потужності підведеного теплового потоку від 5 до 10 Вт. Таким чином, можна зазначити, що в горизонтальному положенні ГРТТ при потужності 10 Вт відбувається осушення зони нагріву попри наявність різьбової структури. При цьому значна частина робочої рідини у вигляді крапель конденсату знаходиться на оглядовому склі. Крім осушення зони нагріву також спостерігається зміщення фронту конденсату далі від зони нагріву.

Для візуальної перевірки ефективності різьбової капілярної структури було проведено спеціальне дослідження при горизонтальній орієнтації експериментального зразка, повернутого на бік, тобто на грань розміром 4×245 мм (рис. 7, б), тоді площа ГРТТ розташовувалася перпендикулярно до поверхні землі. При цьому збільшувався рівень теплоносія в нижній частині ГРТТ, що дозволяло більш активно жити зону випаровування робочою рідиною. У цьому випадку осушення зони випаровування відбувалось при більшому значенні теплового потоку, а саме при 15 Вт. Крім цього було виявлено особливий характер осушення різьбової капілярної структури, яке відбувалось не зверху вниз, а від початку зони випаровування (на рисунку — зліва направо), що може свідчити про ефективність функціонування різьбової капілярної структури з точки зору капілярного живлення.

Теплові характеристики ГРТТ з різьбовою капілярною структурою

Розглянемо результати досліджень теплових характеристик ГРТТ — теплового опору та середнього значення температури в зоні нагріву, які проводились одночасно з візуальним спостереженням гідродинаміки процесів пароутворення.

На рис. 8, де наведено залежності теплового опору R досліджуваної ГРТТ від підведеного теплового потоку, видно, що для всіх значень кута нахилу теплової труби при збільшенні Q від 15 до 20 Вт різко падає R , як це відбувається при переході від режиму випаровування до режиму кипіння. Ці резуль-

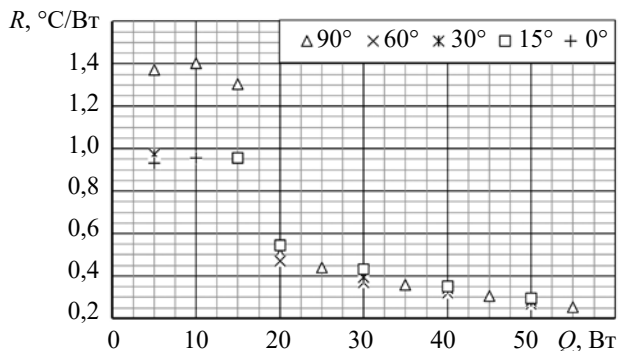


Рис. 8. Залежність теплового опору ГРТТ від теплового потоку за її різної орієнтації в просторі

тати збігаються з візуальними спостереженнями: як зазначалось вище, саме при $Q=20$ Вт розпочинався процес активації поодиноких центрів пароутворення з вибухоподібним кипінням. Тобто рисунок можна умовно розділити на дві області, які відповідають основним режимам функціонування двофазної системи — випаровування (5–15 Вт) та активного кипіння (20–55 Вт).

Як видно з рис. 8, за вертикальної орієнтації ГРТТ у випарному режимі функціонування теплової опір на 25–30% вищий, ніж за інших кутів нахилу, оскільки у цьому випадку площа поверхні випаровування є найменшою. Слід зауважити, що зміна орієнтації в діапазоні кутів нахилу 60–0° майже не впливає на теплові характеристики ГРТТ у випарному режимі, вочевидь, через обмежену здатність процесу випаровування з поверхні віддавати теплоту. На користь цього також свідчить той факт, що при горизонтальній орієнтації, тобто в умовах максимальної площі пароутворення, тепловий опір майже такий самий, як і при кутах нахилу 15° та 30°. Тобто, можна говорити про певне обмеження теплопередавальних характеристик ГРТТ типом процесу пароутворення. Таким чином, розробка систем, в яких можливий процес активного кипіння при малих значеннях теплових потоків, є перспективним завданням, бо це дозволить зменшити ймовірність відмов апаратури в умовах так званого холодного старту.

На рис. 9, де у збільшеному масштабі показано діапазон значень теплового опору ГРТТ в режимі активного кипіння, видно, що найнижчі значення теплового опору для теплових потоків від 20 до 55 Вт були отримані при куті нахилу 60°. Зменшення кута нахилу призводить до незначного погіршення функціонування ГРТТ, а саме зростання теплового опору в межах 5–13% залежно від величини Q . З іншого боку, зі збільшенням теплового потоку тепловий опір ГРТТ все менше залежить від її орієнтації в просторі: при $Q=20$ Вт тепловий опір для кута нахилу 60° (мінімальне значення) був на 13% нижчий, ніж для кута 15°, а при $Q=50$ Вт ця різниця зменшилася до 9%.

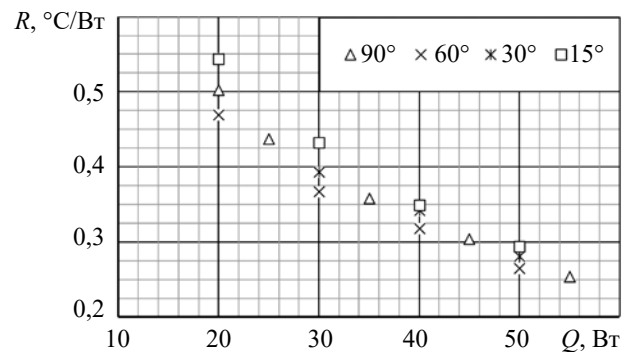


Рис. 9. Залежність теплового опору ГРТТ від теплового потоку за її різної орієнтації в просторі в умовах активного кипіння

Мінімальне значення теплового опору при куті нахилу 60° досягається завдяки декільком факторам. По-перше, інтенсивність тепловіддачі при кипінні залежить не лише від кількості центрів пароутворення, а й від умов формування та відриву парових бульбашок. Інтенсивність тепловіддачі при кипінні в тонких плівках рідини є вищою, ніж при кипінні у великому об'ємі, тому при зменшенні кута нахилу ГРТТ вона збільшується через спрощення умов формування тонких плівок теплоносія на робочих поверхнях, яке відбувається завдяки зменшенню швидкості повернення теплоносія із зони охолодження. З іншого боку, зменшення швидкості повернення робочої рідини до зони нагріву призводить до зростання товщини плівки конденсату в зоні охолодження, через що знижується інтенсивність процесу конденсації. Слід зазначити, що в цьому дослідженні не розглядався процес конденсації по всій поверхні зони конденсації, а тільки на нижній та бокових поверхнях, що обумовлено конструкцією експериментального зразка. Тобто, це дослідження слід розглядати як окремий випадок функціонування двофазних систем в умовах, коли підведення та відведення теплового потоку відбувається з нижньої та частково бічних стінок ГРТТ. Крім того, брак теплоносія в зоні нагріву може призводити до локальних осушень і, як наслідок, до зростання теплового опору.

Якщо ж збільшувати кут нахилу, то картина буде дещо іншою. Інтенсивність конденсації зростатиме через зменшення товщини плівки конденсату. Щодо коефіцієнтів тепловіддачі в зоні випаровування, то вони будуть зменшуватись через описані вище причини.

Розглянемо залежності середнього значення температури в зоні нагріву $T_{\text{ЗН}}$ від величини теплового навантаження, наведені для різних кутів нахилу ГРТТ на **рис. 10**. В діапазоні теплового потоку від 5 до 15 Вт включно, що відповідає випарному режиму роботи ГРТТ, спостерігається залежність $T_{\text{ЗН}}$ від орієнтації труби у просторі. За мінімального значення теплового потоку 5 Вт максимальна різниця між $T_{\text{ЗН}}$

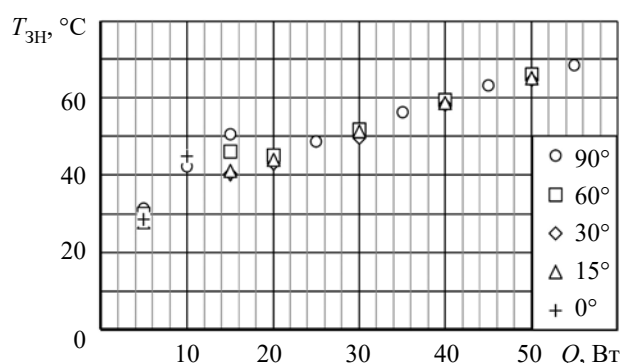


Рис. 10. Залежність середнього значення температури в зоні нагріву ГРТТ від теплового потоку за її різної орієнтації в просторі

становить $\Delta T_{\text{ЗН}} = 11\%$ (найвище значення $T_{\text{ЗН}}$ — при 90° , найнижче — при 15° та 30°). Ця різниця досить легко пояснюється зростанням площі випаровування при зміні орієнтації ГРТТ в просторі, як це було описано вище. Підвищення теплового потоку до 15 Вт змінює картину процесу випаровування тільки кількісно, а зростання $\Delta T_{\text{ЗН}}$ до 20% опосередковано вказує на різницю в інтенсивності тепловіддачі в процесі пароутворення.

В діапазоні теплових потоків від 20 до 55 Вт, що відповідає режиму кипіння, орієнтація ГРТТ в просторі суттєво не впливає на величину $T_{\text{ЗН}}$. Максимальне значення $T_{\text{ЗН}}$ спостерігалось за потужності 55 Вт і становило менше 70°C . Найбільша різниця між значеннями температури при різній орієнтації в просторі не перевищує 4%, що спостерігається при $Q = 20$ Вт. При збільшенні потужності, що призводить до активації процесу кипіння, така різниця зменшується до 2%. Тобто, в умовах активного функціонування експериментального зразка ГРТТ (в режимі кипіння) середні значення температури в зоні нагріву майже не залежать від її орієнтації в просторі в межах умов проведення експериментального дослідження.

Висновки

Таким чином, проведені дослідження показали, що підвищення ефективності функціонування двофазних систем теплопередачі є комплексною задачею, де необхідно одночасно враховувати декілька факторів. У цьому випадку можна говорити, що технічні рішення, спрямовані на збільшення ефективності теплопередачі в одній із секцій ГРТТ, можуть призвести до погіршення в іншій, внаслідок чого за певного збігу параметрів (значень кута нахилу та теплового потоку) ефективність не зміниться чи навіть може погіршитись. Так, наявність різьбової капілярної структури в секції випаровування ГРТТ не впливає на процеси теплообміну в зоні конденсації та гідродинаміку повернення теплоносія в зону нагріву, але порівняно з класичним термосифоном з гладким випарником підвищує ефективність випаровування завдяки збільшенню центрів пароутворення. Підсумовуючи всі вищевказані спостереження, можна стверджувати, що найбільша ефективність плоскої ГРТТ з різьбовою капілярною структурою з точки зору теплового опору досягається при куті нахилу 60° . Щодо температури в зоні нагріву, то за фіксованого теплового потоку її значення було мінімальним для кутів нахилу 15° та 30° незалежно від режиму функціонування ГРТТ.

Крім того, хочемо звернути увагу на те, що при оптимізації конструкції ГРТТ з різьбовою капілярною структурою в напрямку збільшення ефективності повернення теплоносія можна враховувати збільшення граничних теплових потоків, які вона може перенести, в горизонтальному бічному положенні.

Отримані результати можуть бути корисними при виборі режимних параметрів тонких плоских ГРТТ з різьбовою капілярною структурою для різних систем охолодження електронної апаратури на їх основі.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Karayiannis T. G., Mahmoud M. M. Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 115, pp. 1372–1397. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063>.
2. Shu S., Hou G., Wang L. et al. Heat dissipation in high-power semiconductor lasers with heat pipe cooling system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, iss. 6, pp. 2607–2612. DOI 10.1007/s12206-017-0502-9.
3. Хайрнасов С. М. Применение тепловых труб в системах обеспечения тепловых режимов РЭА: современное состояние и перспективы. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2015, № 2–3, с. 19–33. <https://doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.19>
4. Siedel S., Robinson A. J., Kempers R., Kerslake S. Development of a naturally aspired thermosiphon for power amplifier cooling. *J. Phys. Conf. Ser.* 525, 2014, article 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/525/1/012007>
5. Londoño Pabón N. Y., Florez Mera J. P., Serafin Couto Vieira G., Barbosa Henriques Mantelli M. Visualization and experimental analysis of Geysier boiling phenomena in two-phase thermosiphons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 141, pp. 876–890. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.052>
6. Kloczko S., Faghri A. Experimental investigation on loop thermosiphon thermal performance with flow visualization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 150, article 119312. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119312>
7. Yu W., Gao D., Wang G. et al. A visualization study on flat plate heat pipe (FPHP). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2012, vol. 235, iss. 7, pp. 1759–1769. <https://doi.org/10.1177/0957650921990221>
8. Seo D., Shim J., Shin D. H. et al. Dropwise condensation of acetone and ethanol for a high-performance lubricant-impregnated thermosiphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 181, article 121871. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121871>.
9. Seo D., Park J., Shim J. et al. Effects and limitations of superhydrophobic surfaces on the heat transfer performance of a two-phase closed thermosiphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 176, article 121446. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121446>.
10. Kim Y., Shin D. H., Kim J. S. et al. Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosiphon with various filling ratios. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 145, pp. 328–342. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.037>
11. Kim J. S., Kim Y., Shin D. H. et al. Heat transfer and flow visualization of a two-phase closed thermosiphon using water, acetone, and HFE7100. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 187, article 116571. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116571>.
12. Nikolaenko Yu. E., Pekur D. V., Kravets V. Yu. et al. Study on the performance of the low-cost cooling system for transmit/receive module and broadening the exploitative capabilities of the system using gravity heat pipes. *ASME. Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2022, vol. 14, iss. 12, article 121001. <https://doi.org/10.1115/1.4054812>
13. Nikolaenko Yu. E., Pis'mennyi E. N., Pekur D. V. et al. The efficiency of using simple heat pipes with a relatively low thermal conductivity for cooling transmit/receive modules. *Applied Thermal Engineering*, 2023, article 121512. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121512>

Дата надходження рукопису
до редакції 24.09 2023 р.

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.65
UDC 536.248.2

R. S. MELNYK, L. V. LIPNITSKYI, Yu. E. NIKOLAENKO, V. Yu. KRAVETS

Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
E-mail: yunikola@ukr.net; m.roman.kpi@gmail.com

VISUALIZATION OF VAPORIZATION PROCESSES AND THERMAL CHARACTERISTICS OF A THIN FLAT GRAVITY HEAT PIPE WITH A THREADED EVAPORATOR

The paper presents research on the visualization of boiling processes in a flat gravitational heat pipe within a range of thermal fluxes from 5 to 55 W. The main objective of the study is to identify visual patterns during boiling and correlate them with thermal characteristics obtained during research conducted with visual observations. Due to the high-speed nature of the processes, observations were made using a high-speed camera. Temperature values on the heat pipe's surface were also recorded using thermocouples and measurement systems. To obtain a comprehensive picture of the study, experiments were conducted at various inclination angles of the experimental heat pipe sample to the horizon, ranging from 0° to 90°. Visual schemes of boiling and evaporation were obtained and explained simultaneously with thermal performance of experimental sample. The study allowed discovering that, in terms of thermal resistance, 60° is the optimal inclination angle. On the other hand, the lowest evaporator temperature was obtained for 15° and 30° angles. Additionally, it was observed that the experimental sample is able to operate when positioned horizontally. Maximal transferred heat fluxes were extremely low compared to other angles. Nevertheless, even at horizontal orientation, thermal resistance was lower than for vertical position.

Key words: heat transfer, heat pipe, boiling, vapor generation, thermal resistance.

REFERENCES

1. Karayiannis T. G., Mahmoud M. M. Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 115, pp. 1372–1397. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063>.
2. Shu S., Hou G., Wang L. et al. Heat dissipation in high-power semiconductor lasers with heat pipe cooling system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, iss. 6, pp. 2607–2612. DOI 10.1007/s12206-017-0502-9.
3. Khairnasov S. M. The use of heat pipes in thermal control system for electronics: current situation and prospects. *Technology and design in electronic equipment*, 2015, no. 2–3, pp. 19–33. <https://doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.19> (Rus)
4. Siedel S., Robinson A. J., Kempers R., Kerslake S. Development of a naturally aspired thermosyphon for power amplifier cooling. *J. Phys. Conf. Ser.* 525, 2014, article 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/525/1/012007>
5. Londoño Pabón N. Y., Florez Mera J. P., Serafin Couto Vieira G., Barbosa Henriques Mantelli M. Visualization and experimental analysis of Geyser boiling phenomena in two-phase thermosyphons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 141, pp. 876–890. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.052>
6. Kloczko S., Faghri A. Experimental investigation on loop thermosyphon thermal performance with flow visualization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 150, article 119312. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119312>
7. Yu W., Gao D., Wang G. et al. A visualization study on flat plate heat pipe (FPHP). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2012, vol. 235, iss. 7, pp. 1759–1769. <https://doi.org/10.1177/0957650921990221>
8. Seo D., Shim J., Shin D. H. et al. Dropwise condensation of acetone and ethanol for a high-performance lubricant-impregnated thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 181, article 121871. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121871>.
9. Seo D., Park J., Shim J. et al. Effects and limitations of superhydrophobic surfaces on the heat transfer performance of a two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 176, article 121446. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121446>.
10. Kim Y., Shin D. H., Kim J. S. et al. Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 145, pp. 328–342. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.037>
11. Kim J. S., Kim Y., Shin D. H. et al. Heat transfer and flow visualization of a two-phase closed thermosyphon using water, acetone, and HFE7100. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 187, article 116571. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116571>.
12. Nikolaenko Yu. E., Pekur D. V., Kravets V. Yu. et al. Study on the performance of the low-cost cooling system for transmit/receive module and broadening the exploitative capabilities of the system using gravity heat pipes. *ASME. Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2022, vol. 14, iss. 12, article 121001. <https://doi.org/10.1115/1.4054812>
13. Nikolaenko Yu. E., Pis'mennyi E. N., Pekur D. V. et al. The efficiency of using simple heat pipes with a relatively low thermal conductivity for cooling transmit/receive modules. *Applied Thermal Engineering*, 2023, article 121512. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121512>

Опис статті для цитування:

Мельник Р. С., Ліпницький І. В., Ніколаєнко Ю. Є., Кравець В. Ю. Візуалізація процесів пароутворення та теплові характеристики тонкої плоскої гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 3–4, с. 65–73. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.65>

Cite the article as:

Melnyk R. S., Lipnitskyi I. V., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu. Visualization of vaporization processes and thermal characteristics of a thin flat gravity heat pipe with a threaded evaporator. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 3–4, pp. 65–73. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.65>