

Р. С. МЕЛЬНИК, Л. В. ЛІПНИЦЬКИЙ, д. т. н. Ю. Є. НІКОЛАСНКО,  
д. т. н. В. Ю. КРАВЕЦЬ, PhD Д. В. ПЕКУР\*

Україна, м Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, \*ІФН ім. В. Є. Лашкарьова НАН України  
E-mail: m.roman.kpi@gmail.com, yunikola@ukr.net, demid.pekur@gmail.com

## ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПАРООУТВОРЕННЯ У ДВОФАЗНОМУ ТЕРМОСИФОНІ ЗА РІЗНОЇ ЙОГО ОРІЄНТАЦІЇ В ПРОСТОРІ

*Досліджено вплив орієнтації в просторі двофазного скляного термосифона, заповненого етанолом, на процеси пароутворення за потужності нагрівача 30 Вт за вихідного коефіцієнта заповнення зони випаровування 100%. Проведено відеозйомку процесів пароутворення з частотою 240 кадрів за секунду з наступним розділенням отриманих даних на окремі кадри. Виявлено, що у разі інтенсивного кипіння за кутів нахилу термосифона 5–45° певна частина теплоносія завжди знаходиться поза межами зони нагріву, що зменшує її фактичний коефіцієнт заповнення. Чим менше кут нахилу, тим ця частина більше, а коли він складає 5°, зона нагріву в певні проміжки часу повністю осушується, що може призводити до передчасних кризових явищ.*

*Ключові слова:* термосифон, орієнтація в просторі, візуалізація, генерація пари.

Забезпечення нормальних теплових режимів електронної апаратури є одним з найважливіших завдань при створенні надійних електронних систем. Використання двофазних пристроїв в конструкціях систем охолодження є досить поширеним методом розв'язання проблеми перегріву електронних компонентів [1–3]. Одними з таких теплопередавальних пристроїв є двофазні замкнені термосифони [4, 5], що мають низькі значення теплового опору та є досить простими у виготовленні на відміну від теплових труб [6] чи парових камер [7].

Термосифони використовуються для охолодження, наприклад, підсилювачів потужності радіочастотних систем [8], електронного обладнання дата-центрів [9], світлодіодних джерел світла [10]. Одним з важливих факторів, що впливає на ефективність функціонування таких систем охолодження, є орієнтація термосифонів в просторі. Велика кількість досліджень, наприклад [11–13], присвячена визначенню впливу орієнтації термосифонів на їхні теплопередавальні характеристики. Для кращого розуміння процесів пароутворення та гідродинаміки багато авторів виконували роботи з візуалізації процесів всередині двофазних термосифонів. Автори [14–16] продемонстрували гідродинамічну картину функціонування термосифонів залежно від підведеного теплового потоку, визначили гідродинамічні закономірності та описали етапи кипіння. В цих роботах розглядалися умови з досить протяжними зонами випаровування. Крім того, в більшості подібних

робіт розглянуто режими функціонування переважно при вертикальній орієнтації термосифонів. У [17] наведено гідродинамічну картину за кутів нахилу від 10 до 90°. В нахиленому термосифоні потоки рідини та пари частково розділяються. Рідина повертається до зони випаровування по нижній твірній, в той час як пара рухається вздовж верхньої твірної. Автори [18] описують процес винесення рідини потоком пари до зони конденсації у випадках зростання підведеного теплового потоку за кута нахилу 10° відносно горизонту. В наведених роботах не розглянуто процеси, що виникають у термосифонах з відносно невеликою довжиною зони нагріву, та ефекти, які можуть виникнути у таких випадках.

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження з візуалізації процесів пароутворення в термосифоні з короткою зоною випаровування за різних кутів його нахилу до горизонту, які можна було б надалі використовувати для аналізу та пояснення процесів теплообміну в термосифонах.

### Експериментальна установка

Для проведення візуалізації процесів, що відбуваються в зоні нагріву у двофазному термосифоні, було виготовлено експериментальну установку (рис. 1). Її робочою ділянкою є прозорий експериментальний зразок скляного термосифона, який закріплювався на лабораторному штативі. Загальна довжина термосифона становила 500 мм, а внутрішній та зовнішній діаметри, відповідно, 9 та 12 мм. Матеріалом корпусу термосифона було обрано кварцове скло C5-1 через його відносно низький коефіцієнт термічного розширення:  $(5–6) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  [19, с. 330], що зменшує ймовірність руйнування термосифона при виникненні кризових явищ.

Автори висловлюють подяку Національному фонду досліджень України за підтримку роботи (проект N 2020.02/0357).

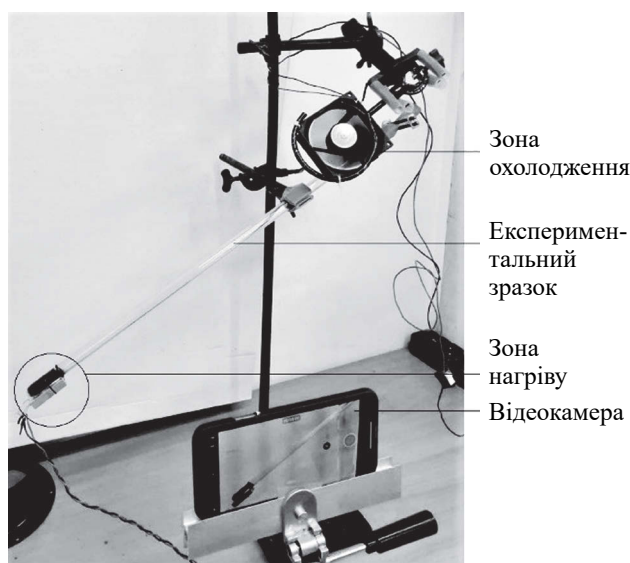


Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки для візуалізації процесів пароутворення в зоні нагріву двофазного термосифона

Експериментальний зразок заповнювали 96%-вим розчином етилового спирту, підфарбованого синім пігментом для збільшення контрастності зображень. Коефіцієнт заповнення, який визначається відношенням об'єму теплоносія до об'єму зони нагріву, становив 100%. Довжина зони нагріву складала 40 мм. Для зручності спостережень на рівні верхньої її межі на термосифон було надіто гумове кільце чорного кольору.

Теплота до зони нагріву підводилася за допомогою електричного нагрівача, закріпленого безпосередньо на експериментальному зразку в області нижньої твірної. Для поліпшення теплового контакту між зразком та нагрівачем використовувалася теплопровідна паста КПТ-8 з коефіцієнтом теплопровідності  $0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Охолодження експериментального зразка термосифона відбувалось примусовою конвекцією повітря за допомогою вентилятора з об'ємною витратою повітря  $47 \text{ м}^3/\text{год}$ , розташованого в зоні охолодження довжиною 60 мм. Температура потоку охолоджувального повітря для всіх досліджень знаходилась в межах  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ .

#### Методика експерименту

Дослідження проводились для широкого діапазону значень кута нахилу  $\alpha$  термосифона — від його вертикального положення ( $\alpha = 90^\circ$ ) до майже горизонтального ( $\alpha = 5^\circ$ ). Тепловий потік, що підводився до зони нагріву, був однаковим і становив 30 Вт.

Перед проведенням експериментальних досліджень було сфотографовано розташування та форму менісків теплоносія всередині термосифона. Після цього термосифон закріплювався на штативі у вертикальному положенні, і до зони нагріву підводив-

ся тепловий потік 30 Вт. Процес пароутворення фіксувався за допомогою відеокамери. З огляду на значну швидкість досліджуваних процесів проводилась швидкісна відеозйомка з частотою 240 кадрів за секунду. Аналогічна фіксація проводилась для всіх інших обраних кутів нахилу ( $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $0^\circ$ ). Для переходу від одного розташування термосифона до іншого нагрівач відключався, і система охолоджувалась до вихідного початкового стану.

Відеофайли оброблялись з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. В результаті було отримано розкадрування процесів пароутворення при різній орієнтації термосифона в просторі.

#### Результати досліджень

На рис. 2 видно, як впливає орієнтація термосифона в просторі на форму та положення поверхні розділу фаз. Так, для  $\alpha = 90\text{—}45^\circ$  поверхня розділу фаз майже не відхиляється від горизонту та від верхньої межі зони нагріву через дію капілярних сил. Суттєве відхилення спостерігається при  $\alpha = 30\text{—}5^\circ$ , при цьому навіть за малих значень кута нахилу в зоні нагріву знаходиться досить велика кількість теплоносія. Важливо зазначити, що поверхня теплоносія не є горизонтальною та пласкою, як це приймалося при моделюванні процесів теплообміну в нахилених термосифонах у [11]. Вона має певний кут нахилу до горизонту, величина якого залежить від коефіцієнта поверхневого натягу рідини та крайового кута змочування. Сама форма поверхні є наближеною до частково усіченого параболаїда обертання, симетрично-

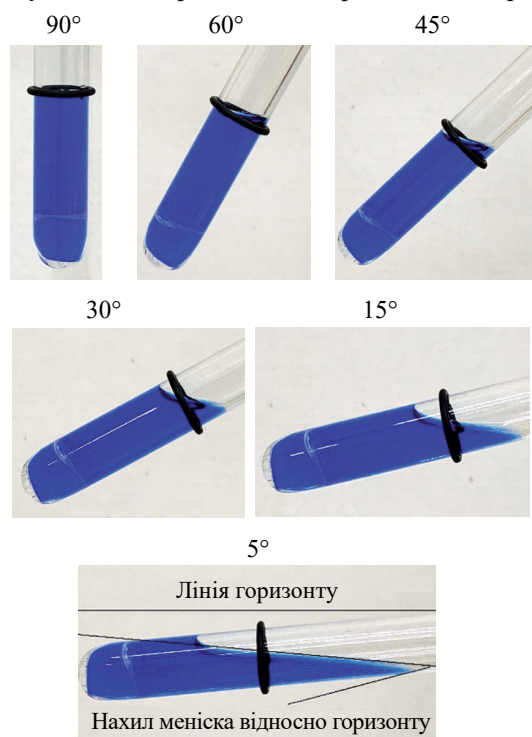


Рис. 2. Вплив орієнтації в просторі двофазного термосифона на форму та положення поверхні розділу фаз

го осі обертання трубки та з вершиною при дні. Все це добре видно на рис. 2 для  $\alpha = 5^\circ$ .

Проведення досліджень за вертикального розташування термосифона дозволило спостерігати вибухоподібне кипіння перегрітої рідини в зоні нагріву, в результаті чого близько 2/3 теплоносія виносилось із зони випаровування на внутрішню стінку термосифона (кадри 1—3 на рис. 3). Одразу після цього через брак часу на повернення теплоносія із зони транспорту та охолодження процес кипіння проходив в умовах частково заповненої зони нагріву (4—6), а потім майже весь теплоносій повертався до зони випаровування (7—9), і цикл повторювався. Спостереження дозволили зробити висновок, що в умовах вертикальної орієнтації досліджуваного термосифона при активному кипінні зона нагріву більшість часу є заповненою на 30—50%.

Частина теплоносія в паровій фазі бере участь в процесі перенесення теплоти від зони нагріву до зони конденсації. Проте більша частина постійно виноситься із зони нагріву паровими бульбашками та залишається на стінках термосифона. Таким чином в зоні випаровування інтенсивність тепловіддачі зростає завдяки кипінню з тонкої плівки. Дослідження впливу товщини плівки рідини на інтенсивність тепловіддачі проводились в [20], де було доведено, що зі зменшенням товщини шару рідини інтенсивність тепловіддачі збільшується.

Після зменшення кута нахилу від  $90^\circ$  до  $60^\circ$  кількість теплоносія, що виноситься із зони нагріву, майже не змінилась. Парова бульбашка з нижньої твірної піднімається до верхньої та виносить частину

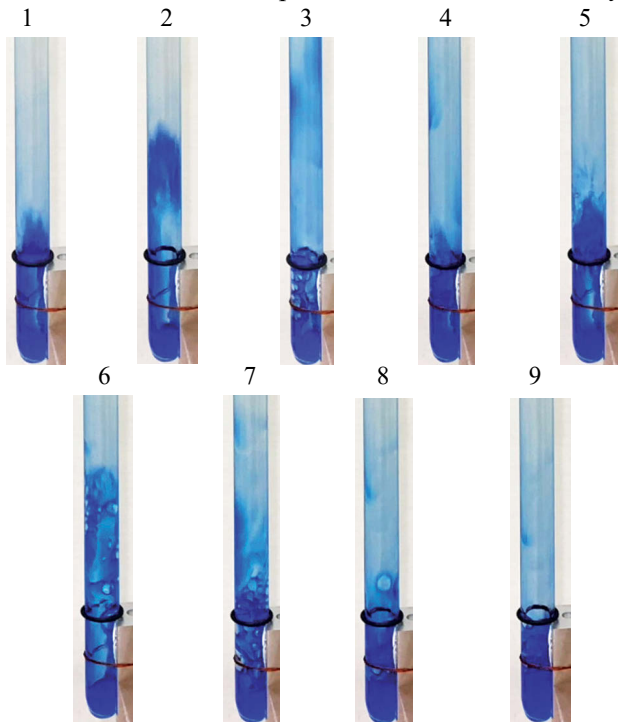


Рис. 3. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: вертикальна орієнтація в просторі

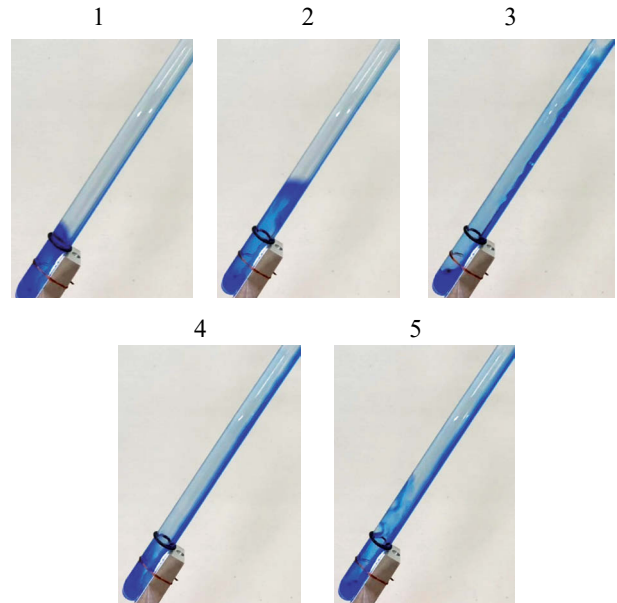


Рис. 4. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу  $60^\circ$

теплоносія до зони транспорту (кадри 1, 2 на рис. 4). Потім спостерігається розрив тонкої залишкової плівки та вихід парової бульбашки у паровий простір термосифона з частковим винесенням порції теплоносія до зони транспорту (3), після чого теплоносій повертається в зону нагріву під дією гравітаційних сил. Одночасно з цим в зоні нагріву продовжується кипіння в умовах зменшеної кількості теплоносія (4, 5) з винесенням деякої кількості теплоносія до зони транспорту.

При зменшенні кута нахилу до  $45^\circ$  процеси, описані для  $\alpha = 60^\circ$ , стають більш вираженими (рис. 5). Крім того, проявляються певні особливості — наприклад, утворення вихорів під час виходу парової бульбашки. Після вибухового закипання та виходу парової бульбашки з виносом частини теплоносія (1, 2) за нею слідує наступна бульбашка (3). Винесена частина теплоносія під дією гравітаційних сил повертається до зони нагріву по нижній твірній. В той самий час вздовж верхньої твірної відбувається вихід пари. Завдяки силам тертя пара захоплює верхні шари теплоносія та змінює напрям їхнього руху. За верхніми шарами захоплюються нижні шари, що призводить до утворення вихорів при стіканні теплоносія (4, 5). Такий процес сповільнює повернення теплоносія до зони випаровування. В певний проміжок часу між активаціями центрів пароутворення теплоносій повністю повертається до зони нагріву, а при наступній активації весь описаний процес повторюється.

Аналогічна ситуація спостерігається для кута нахилу  $30^\circ$  (рис. 6). Процеси виносу рідини паровими бульбашками стають більш вираженими, а кількість винесеної рідини стає дедалі більшою. Також через зменшення кута нахилу зменшується і швидкість по-

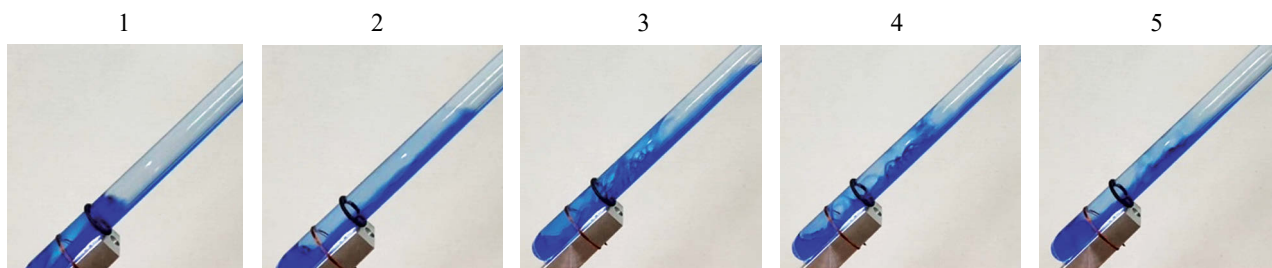


Рис. 5. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 45°

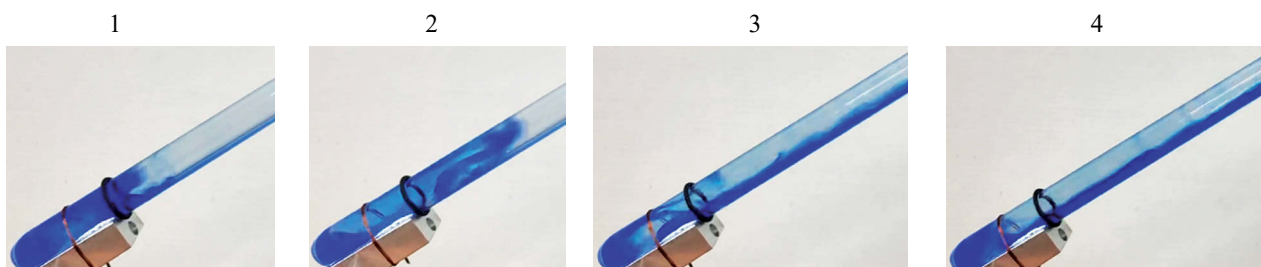


Рис. 6. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 30°

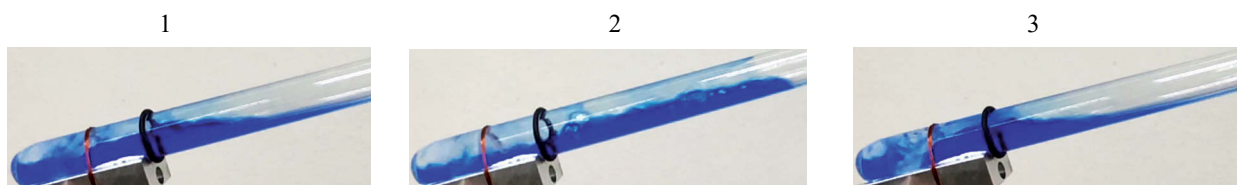


Рис. 7. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 15°

вернення рідини до зони випаровування. В результаті поруч із зоною випаровування з'являється застійна зона, в якій майже весь час знаходиться частина теплоносія.

За кута нахилу 15° картина процесів пароутворення зберігається (рис. 7), але у порівнянні з  $\alpha = 30^\circ$  зростає кількість теплоносія, який знаходиться поза зоною нагріву. Крім того, в певні короткі проміжки часу денце термосифона майже повністю осушується. Очевидно, що в умовах високих значень теплового потоку така ситуація може призвести до виникнення кризових явищ та виходу з ладу системи охолодження. Вихори поза зоною нагріву, спричинені виходом парових бульбашок, стають більш помітними та суттєво уповільнюють процес повернення теплоносія до зони нагріву. З іншого боку, постійне винесення рідини із зони нагріву спричинює утворення тонкої плівки рідини на верхній твірній термосифона, що у свою чергу може призводити до інтенсифікації теплообміну при кипінні.

Зменшення кута нахилу до 5° призводить до того, що в певні проміжки часу зона нагріву майже повністю осушується, і навіть за підведеної потужності 30 Вт залишається лише тонка плівка теплоносія, з якої і відбувається процес кипіння (рис. 8).

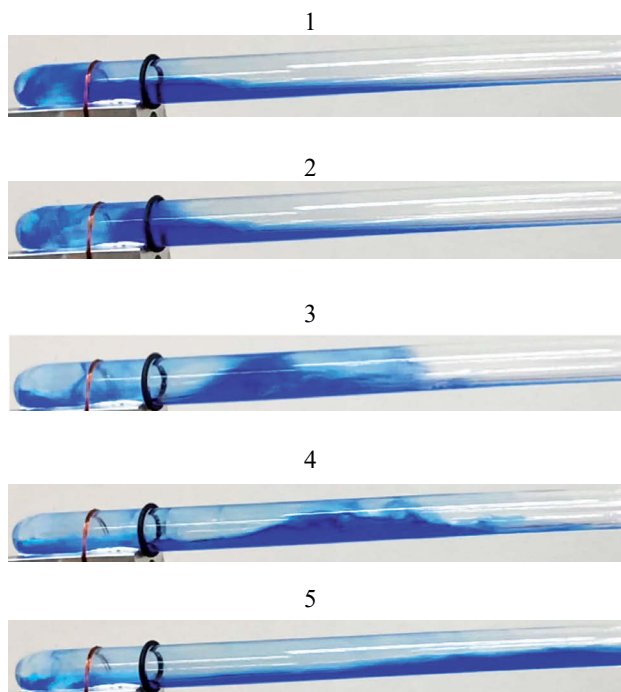


Рис. 8. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 5°

Подібні явища пояснюють, чому саме термосифони та подібні конструкції не використовують для створення систем охолодження при орієнтації в просторі, близькій до горизонту. З іншого боку, в умовах низьких значень теплового потоку подібні конфігурації мають певну перевагу через наявність тонкої плівки рідини майже у всьому перерізі зони випаровування, що призводить до інтенсифікації процесів фазового переходу і, як наслідок, до зменшення термічного опору системи.

### Висновки

Дослідження показали, що коефіцієнт заповнення, який визначається відношенням об'єму теплоносія до об'єму зони випаровування, в стані спокою суттєво відрізняється від коефіцієнта заповнення в режимі активного функціонування термосифона з короткою зоною нагріву. Так, за вертикальної орієнтації термосифона з вихідним коефіцієнтом заповнення 100% при активному кипінні теплоносія зона нагріву більшість часу фактично заповнена лише на 30–50%. Достатньо велика частина теплоносія не бере участь у пароутворенні, а просто виноситься паровими бульбашками до транспортної зони, створюючи тим самим додатковий опір. Зі зменшенням кута нахилу зростає частка теплоносія, що знаходиться поза зоною нагріву, і може виникати явище, яке призводить до затримки повернення частини теплоносія через вихід парових бульбашок та утворення вихорів. За кута нахилу 30° поруч із зоною випаровування в зоні транспорту з'являється застійна зона, де майже весь час знаходиться частина теплоносія. Якщо ж кут нахилу дорівнює 5°, у певні проміжки часу зона нагріву практично повністю осушується, що може призводити до передчасних кризових явищ.

Отримані результати можуть бути використані в подальших дослідженнях при аналізі та поясненні особливостей перебігу процесів теплообміну у двофазних термосифонах з короткою зоною випаровування.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2001, vol. 24, iss. 2, pp. 122–141. <https://doi.org/10.1109/6144.926375>
2. Aranzabal I., Alegria I.M., Delmonte N. et al. Comparison of the heat transfer capabilities of conventional single-phase and two-phase cooling systems for electric vehicle IGBT power module. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, iss. 5, pp. 4185–4194. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2862943>
3. Nikolaenko Y.E., Aleksei E.S., Kozak D.V., Nikolaienko T.Y. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, pp. 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>
4. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. Киев, Факт, 2005, 704 с.
5. Кравець В.Ю. Теплообмін в мініатюрних випарувально-конденсаційних системах охолодження. Автореф. дис. ...

д.т.н., спец. 05.14.06, Київ, 2016, 41 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/18462>

6. Kravets V., Aleksei Ye., Aleksei O. et al. Heat pipes with variable thermal conductance property developed for space applications. *Joint 18<sup>th</sup> IHPC and 12<sup>th</sup> IHPS*, Jeju, Korea, 2016, pp. 103–110. <https://www.researchgate.net/publication/312017754>
7. Xie D., Sun Y., Wang G. et al. Significant factors affecting heat transfer performance of vapor chamber and strategies to promote it: A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 175, art. no. 121132. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121132>
8. Siedel S., Robinson A.J., Kempers R., Kerslake S. Development of a naturally aspired thermosiphon for power amplifier cooling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 525, no. 1, art. no. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/525/1/012007>
9. Nadjahi C., Louahia-Gualous H., Le Masson S. Experimental study and analytical modeling of thermosiphon loop for cooling data center racks. *Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 56, pp. 121–142. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02695-x>
10. Li J., Tian W., Lv, L. A thermosiphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling. *Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 52, pp. 1541–1548. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1679-z>
11. Wu Y., Zhang Z., Li W., Xu D. Effect of the inclination angle on the steady-state heat transfer performance of a thermosiphon. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, art. no.3324. <https://doi.org/10.3390/app9163324>
12. Alammari A.A., Al-Dadah R.K., Mahmoud S.M. Numerical investigation of effect of fill ratio and inclination angle on a thermosiphon heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 108, pp. 1055–1065. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.163>
13. Payakaruk T., Terdtoon P., Ritthidech S. Correlations to predict heat transfer characteristics of an inclined closed two-phase thermosiphon at normal operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2000, vol. 20, iss. 9, pp. 781–790. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00047-2)
14. Smith K., Robinson A. J., Kempers R. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosiphons Part B: heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 120, pp.1241–1254. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.046>
15. Smith K., Kempers R., Robinson A.J. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosiphons Part A: flow regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 119, pp. 907–921. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.049>
16. Sichamnan S., Chompookham T., Parametthanuwat T. A case study on internal flow patterns of the two-phase closed thermosiphon (TPCT). *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, vol. 18, pp. 100586. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100586>
17. Shiraishi M., Terdtoon P., Murakami M. Visual study on flow behavior in an inclined two-phase closed thermosiphon. *Heat Transfer Engineering*, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 53–59. URL: <https://doi.org/10.1080/01457639508939845>
18. 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>
19. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. Москва, Атомиздат, 1976, 1008 с.
20. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Кривешко А.А., Островский Ю.Н. Подавление пузырькового кипения в неподвижной пленке жидкости. *Теплофизика высоких температур*, 1977, т. 15, № 4, с. 822–827.

Дата надходження рукопису  
до редакції 21.09 2021 р.

Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»,  
\*V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine  
E-mail: m.roman.kpi@gmail.com,  
yunikola@ukr.net, demid.pekur@gmail.com

## VISUALIZATION OF VAPORIZATION EVENTS IN TWO-PHASE THERMOSYPHONS OPERATING IN DIFFERENT ORIENTATIONS

Currently, thermosyphons are used to cool such devices as power amplifiers of radio frequency systems, data center hardware, LED light sources, etc. One of the important factors affecting the efficiency of such cooling systems is the orientation of the thermosyphons in space.

This paper is dedicated to research and visualization of vaporization events in two-phase thermosyphons, primarily focusing on investigating and visualizing the influence of orientation in space on vaporization. The studies were performed for 100% fill ratio. Vaporization was video recorded at 240 frames per second, whereupon the obtained footage was converted into image sequence. The analysis of the obtained materials has shown that at intensive boiling for tilt angle range of 5–45°, a part of the working fluid is always outside the evaporator. When the angle is decreased, the portion of the working fluid outside the evaporator increases. Moreover, for the 5° tilt angle, the evaporator can be completely drained at certain time intervals. It is proposed that the thermal resistance at low heat flux values for smaller tilt angles can be lower than for vertical orientation because of thin liquid films. Evaporation is more effective in thin liquid films than in large volumes. This prompts the conclusion that smaller angles will allow obtaining lower thermal resistance for the same filling ratio. On the other hand, maximum heat transfer ability decreases dramatically for the angle range of 0–10°.

The obtained results can be used in further studies to analyze and explain the aspects of heat transfer in two-phase thermosyphons with a short evaporator.

Keywords: thermosyphon, orientation in space, visualization, vaporization.

### REFERENCES

- Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2001, vol. 24, iss. 2, pp. 122–141. <https://doi.org/10.1109/6144.926375>
- Aranzabal I., Alegria I.M., Delmonte N. et al. Comparison of the heat transfer capabilities of conventional single-phase and two-phase cooling systems for electric vehicle IGBT power module. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, iss. 5, pp. 4185–4194. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2862943>
- Nikolaenko Yu. E., Alekseik E.S., Kozak D.V., Nikolaienko T.Yu. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, pp. 418–425, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>
- Bezrodnyy M.K., Pioro I.L., Kostyuk T.O. *Protsessy perenosu v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh. Teoriya i praktika*. [Transfer processes in two-phase thermosiphon systems. Theory and practice]. Kiyev, Fakt, 2005, 704 p. (Rus)
- Kravets' V. Yu. *Teploobmin v miniatyurnykh vyparoval'no-kondensatsiynykh sistemakh okholodzhennya* [Heat transfer in miniature evaporation-condensation cooling systems] Dr. tech. sci. diss. abstr., Kyiv, 2016, 41 p. (Ukr) <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/18462>
- Kravets V., Alekseik Ye., Alekseik O. et al. Heat pipes with variable thermal conductance property developed for space applications. *Joint 18<sup>th</sup> IHPC and 12<sup>th</sup> IHPS*, Jeju, Korea, 2016, pp. 103–110. <https://www.researchgate.net/publication/312017754>
- Xie D., Sun Y., Wang G. et al. Significant factors affecting heat transfer performance of vapor chamber and strategies to promote it: A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 175, art. no. 121132. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121132>
- Siedel S., Robinson A.J., Kempers R., Kerslake S. Development of a naturally aspirated thermosyphon for power amplifier cooling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 525, no. 1, art. no. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/525/1/012007>
- Nadjahi C., Louahlia-Gualous H., Le Masson S. Experimental study and analytical modeling of thermosyphon loop for cooling data center racks. *Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 56, pp. 121–142. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02695-x>
- Li J., Tian W., Lv L. A thermosyphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling. *Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 52, pp. 1541–1548. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1679-z>
- Wu Y., Zhang Z., Li W., Xu D. Effect of the inclination angle on the steady-state heat transfer performance of a thermosyphon. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, art. no. 3324. <https://doi.org/10.3390/app9163324>
- Alammar A.A., Al-Dadah R.K., Mahmoud S.M. Numerical investigation of effect of fill ratio and inclination angle on a thermosiphon heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 108, pp. 1055–1065. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.163>
- Payakaruk T., Terdtoon P., Ritthidech S. Correlations to predict heat transfer characteristics of an inclined closed two-phase thermosyphon at normal operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2000, vol. 20, iss. 9, pp. 781–790. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00047-2)
- Smith K., Robinson A. J., Kempers R. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosyphons

Part B: heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 120, pp.1241–1254. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.046>

15. Smith K., Kempers R., Robinson A.J. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosyphons Part A: flow regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 119, pp. 907–921. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.049>

16. Sichamnan S., Chompookham T., Parametthanuwat T. A case study on internal flow patterns of the two-phase closed thermosyphon (TPCT). *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, vol. 18, pp. 100586. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100586>

17. Shiraishi M., Terdtoon P., Murakami M. Visual study on flow behavior in an inclined two-phase closed thermosyphon. *Heat*

*Transfer Engineering*, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 53–59. URL: <https://doi.org/10.1080/01457639508939845>

18. 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>

19. *Tablitsy fizicheskikh velichin: Spravochnik* [Tables of physical quantities: a handbook]. Ed by I.K. Kikoin. Moscow, Atomizdat, 1976, 1008 p. (Rus)

20. Tolubinskiy V.I., Antonenko V.A., Kriveshko A.A., Ostrovskiy Yu.N. [Suppression of nucleate boiling in a stationary liquid film]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1977, vol. 15, no 4, pp. 822–827. (Rus)

#### Опис статті для цитування:

Мельник Р. С., Липницький Л. В., Николаєнко Ю. Є., Кравець В. Ю., Пекур Д. В. Візуалізація процесів пароутворення у двофазному термосифоні за різної його орієнтації в просторі. *Технологія и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 5–6, с. 46–52. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.46>

#### Cite the article as:

Melnyk R. S., Lipnitskyi L. V., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu., Pekur D. V. Visualization of vaporization events in two-phase thermosyphons operating in different orientations. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 46–52. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.46>

#### РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

*Добровольський Юрій Георгійович*, докт. техн. наук, доцент, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, м. Чернівці

*Єфіменко Анатолій Афанасійович*, докт. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

*Карушкін Микола Федорович*, канд. техн. наук, керівник відділу, НДІ «Оріон», м. Київ

*Ковалюк Захар Дмитрович*, докт. фіз.-мат. наук, професор, Чернівецьке відділення Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, м. Чернівці

*Кукла Олександр Леонідович*, докт. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова, м. Київ

*Николаєнко Юрій Єгорович*, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

*Степенко Сергій Анатолійович*, канд. техн. наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів

*Трофімов Володимир Євгенович*, канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса