

Володимир КРАВЕЦЬ, Віталій ЧИКАЛО, Євген ШЕВЕЛЬ

Україна, м. Київ, КПІ імені Ігоря Сікорського

E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

ПРОЦЕСИ ПАРООУТВОРЕННЯ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ МІНІАТЮРНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Проведено експериментальні дослідження процесу виникнення та зростання парової бульбашки при кипінні у великому об'ємі на поверхні малого розміру діаметром від 0,4 до 5,0 мм. Показано, що основним фактором підвищення інтенсифікації тепловіддачі є випаровування мікрошару рідини під паровою бульбашкою. Отримано залежність пульсації температури поверхні від значень відривного діаметра парових бульбашок.

Ключові слова: тепловіддача, мікрошар рідини, поверхня малого розміру, парова бульбашка, процес пароутворення, кипіння.

Поширення нових технологій сприяє стрімкому розвитку різних галузей техніки як у бік підвищення функціональних можливостей систем і обладнання, так і у бік зниження масогабаритних характеристик окремих вузлів і пристроїв в цілому. Особливо яскраво це проявляється в радіoeлектроніці й, зокрема, в комп'ютерній техніці.

Одним з провідних напрямків розвитку радіoeлектроніки є мініатюризація та підвищення потужності мікронапівпровідникових приладів. Згідно із законом Гордона Мура кількість напівпровідникових елементів у мікросхемах подвоюється кожні два роки. І хоча таке експоненціальне зростання може зіткнутися з обмеженнями у найближчому майбутньому, наразі цей показник вже сягнув сотен мільярдів транзисторних елементів у мікросхемах. Масове впровадження напівпровідникових приладів у всіх галузях техніки робить актуальною проблему забезпечення надійного функціонування таких пристроїв, що значною мірою залежить від температурного режиму. Це вимагає розроблення нових ефективних систем відведення теплоти від елементів (і від окремих напівпровідникових кристалів, і від мікросхем в цілому), які виділяють значні питомі теплові потоки — на рівні 100 Вт/см² і вище. Наприклад, напівпровідниковий НВЧ-прилад — діод Ганна, кристал діаметром приблизно 0,3 мм, на високих частотах може виділяти всього 2 Вт, але питомі теплові навантаження можуть при цьому сягати 3000 Вт/см². Для відведення таких значних теплових потоків у сучасному обладнанні широко застосовуються як процеси пароутворення на кристалі напівпровідника, так і автономні теплопередавальні пристрої з використанням випарно-конденсаційного циклу.

Організація процесу кипіння безпосередньо на поверхні кристала напівпровідникового приладу, зануреного у рідину, дозволяє істотно знизити тер-

мічний опір між p - n -переходом і середовищем, що забезпечує надійну роботу приладу за підвищеної потужності розсіювання теплоти. При цьому розміри кристалів напівпровідникових приладів, як правило, сумірні з основними лінійними характеристиками локальних фізичних явищ, що визначають інтенсивність процесів тепло- і масопереносу. Наприклад, при кипінні рідини лінійні розміри кристалів близькі до відривних діаметрів парових бульбашок.

Формування теплового пограничного шару в процесі кипіння на поверхні малого розміру суттєво відрізняється від пароутворення на протяжних ізотермічних поверхнях теплообміну: сам шар має істотно меншу товщину, що залежить від лінійних розмірів поверхні нагріву, а бульбашкове кипіння виникає при більших температурних напорах. Також при кипінні поверхня малого розміру піддається температурним коливанням, які пов'язані з періодичною дією на неї центрів пароутворення.

Прагнення до детального вивчення локальних характеристик при кипінні рідин дало поштовх до конструювання таких експериментальних ділянок, які дозволяли б фіксувати температурні коливання поверхні теплообміну в зоні дії поодиноких центрів пароутворення. Одними з перших у цьому напрямку були роботи [1, 2], в яких для вимірювання температури поверхні застосовувалася спеціальна термopара діаметром 0,127 мм (рис. 1). Для нагрівання пластини через неї пропускали постійний електричний струм з напругою 12 В. При підведенні теплового потоку на непокриту епоксидною смолою металевій поверхні виникали центри пароутворення. Частина з них активувалася на торці термopари, і коливання температури фіксувалися на екрані осцилографа. Таким чином конструкція експериментальної ділянки дозволяла виявляти пульсації температури під центром пароутворення, що стало переконливим підтвердженням

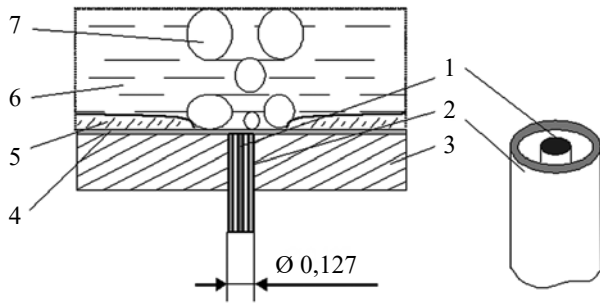


Рис. 1. Схема вимірювання локальних значень температури поверхні при кипінні рідини [1]:

1 — алюмінієвий провід; 2 — хромелева трубка; 3 — ніхромова металева пластина; 4 — осаджений нікелевий шар товщиною $1,27 \cdot 10^{-3}$ мм; 5 — епоксидна смола; 6 — рідина; 7 — парові бульбашки

гіпотези про існування мікрошару рідини в основі парової бульбашки, що зростає (рис. 2).

Подальші дослідження були спрямовані на одночасну фіксацію пульсацій температури та визначення інтенсивності теплообміну в зоні центру пароутворення. Так, у роботі [3] конструкція експериментальної ділянки, що представлена на рис. 3, дозволяла визначити величину теплового потоку, що підводився до локальної ділянки теплообміну. Мініатюрна поверхня теплообміну являла собою торець копелевого стрижня 2 (діаметр від 0,5 до 2,5 мм), привареного точковим зварюванням до тонкої (0,07 мм) пермалоевої мембрани 1. Нижній кінець стрижня приварювався до пермалоевої пластини 3.

За показаннями пермалой-копелевих термодатчиків визначали тепловий потік, що підводився до поверхні теплообміну, та розраховували інтенсивність тепловіддачі при кипінні рідини. Одночасно фіксувалася пульсація температури поверхні під час виникнення, зростання й відриву парової бульбашки. Було показано, що при збільшенні густини теплового потоку частота появи та розміри парових бульбашок теж збільшувалися. Також зростала амплітуда пульсацій температури поверхні теплообміну.

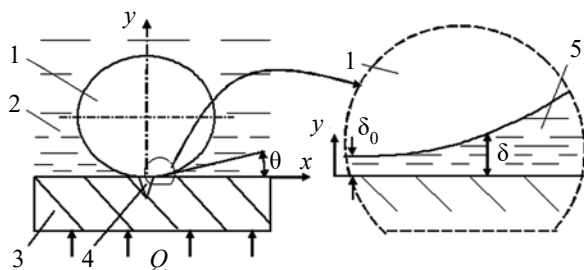
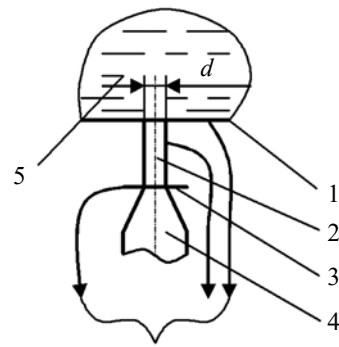


Рис. 2. Зростання парової бульбашки на поверхні теплообміну:

1 — пара; 2 — рідина; 3 — поверхня теплообміну; 4 — запалювальна свічка; 5 — мікрошар рідини під основою парової бульбашки, який розтікається



До вимірювального пристрою

Рис. 3. Схема елемента для дослідження процесу кипіння на окремих центрах пароутворення [3, с. 85]:

1 — пермалоева мембрана; 2 — копелевий стрижень (теплопровід довжиною 2,2 мм); 3 — пермалоева пластина; 4 — мідний циліндр з ніхромовим нагрівачем; 5 — рідина

Великі значення коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні пов'язують з інтенсивним випаровуванням мікрошару рідини під паровою бульбашкою, що зростає. Причому амплітуда пульсації температури поверхні, а також товщина мікрошару залежать від величини відривного діаметра парових бульбашок. Свій вплив тут також має теплова та гідродинамічна обстановка навколо центра пароутворення.

Товщина мікрошару, яка може визначатися як безпосередніми вимірюваннями [4, 5], так і непрямыми шляхом [6, 7], залежить від роду рідини. Так, у роботі [5] при тиску $0,07 \cdot 10^5$ Па товщина мікрошару залежно від радіуса основи парової бульбашки коливалася від 4 до 30 мкм для толуолу, а для ізопропілового спирту — від 15 до 70 мкм.

У [8] показано, що теплопередача через мікрошар робить важливий внесок у процес бульбашкового кипіння. Тому розрахунок початкової товщини мікрошару можна використати для приблизного кількісного аналізу механізму процесу кипіння на поверхнях великого розміру.

Подальші комплексні дослідження [9, 10] із застосуванням математичного моделювання показали, що при зростанні парової бульбашки до її відриву від поверхні нагріву товщина мікрошару збільшується й залежить від багатьох факторів. Серед них — теплофізичні властивості як поверхні теплообміну, так і виду рідини, а також розміри поверхні, на якій відбувається процес бульбашкового кипіння.

Товщину мікрошару вимірювали у роботі [11] для води та етанолу за допомогою спеціально розробленої вимірювальної системи, яка використовує метод лазерної екстинкції. Початкова структура мікрошару для етанолу була подібною до структури води, але його товщина була приблизно вдвічі більшою. Однак температурні пульсації поверхні нагріву, які пов'язані з інтенсивним випаровуванням мікрошару рідини під паровою бульбашкою, в цій роботі не розглядалися.

У теоретичних роботах [12, 13] на підставі чисельного моделювання зародження бульбашок при кипінні проаналізовано утворення та випаровування мікрошару, а також показано основні фізичні механізми цього явища.

Всі ці дослідження вказують на те, що відведення теплових потоків великої густини при зменшенні поверхонь теплообміну пов'язано з великою кількістю чинників, серед яких вагому роль відіграє пульсація температури поверхні під час бульбашкового кипіння. При цьому серед публікацій з цієї тематики присутні в основному теоретичні дослідження, і вкрай мало експериментальних.

Метою цієї роботи було експериментальне дослідження особливостей бульбашкового кипіння на поверхнях малого розміру для подальшого застосування отриманих даних при створенні систем охолодження мініатюрних електронних пристроїв.

Схема робочого елемента та методика проведення досліджень

Дослідження проводилися за методикою, наведеною у [14]. Дослідний елемент (рис. 4) дозволяв визначати тепловий потік Q_{Π} , що підводиться до локальної ділянки теплообміну, а також пульсації температури під центром пароутворення. Концентратором теплового потоку слугував мідний теплопровідний стрижень, а процес бульбашкового кипіння було організовано на його торцевій поверхні.

Експерименти проводилися зі стрижнями різного діаметра d_c : від 0,4 до 5,0 мм. У поверхню теплообміну було впаяно на срібному припої ПСр-40 константановий дріт 1 діаметром 0,16 мм. На деякій відстані від торця стрижня 2 у просвердлений отвір

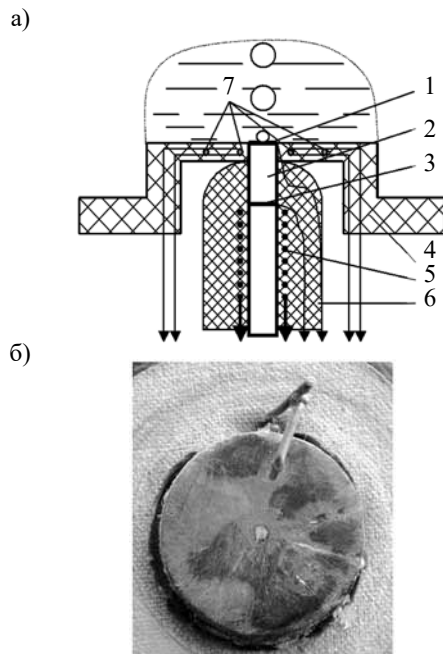


Рис. 4. Схема (а) та фото (б) робочого елемента для дослідження процесу пароутворення під час кипіння на поверхнях малого розміру:

1, 3 — константановий дріт; 2 — мідний стрижень; 4 — скловолокниста опорна стінка; 5 — ніхромовий нагрівач; 6 — теплоізоляція; 7 — термопари для вимірювання кількості теплоти, що розтікається в опорну стінку

впаяювався ще один константановий дріт 3. Отримана таким чином диференціальна мідь-константанова термопара дозволяла вимірювати тепловий потік, що підводиться до мікроповерхні, а також середню температуру поверхні на торці мідного стрижня. Нижче константанового дроту 3 на стрижень 2 намотувався ніхромовий нагрівач, який покривався теплоізоляцією 6. Для визначення кількості теплоти Q_p , що розтікається в опорну стінку 4, у ній на різних відстанях від центру (радіусах) R було закладено чотири мідь-константанові термопари 7 ($T_1 \dots T_4$) (рис. 5). Отримане за їхньою допомогою температурне поле в опорній стінці дозволяло шляхом розв'язування оберненої задачі теплопровідності розрахувати тепловий потік Q_B , що відводиться безпосередньо від поверхні до рідини.

Величина потоку, що розтікався в опорну стінку Q_p , а в результаті й відведеного теплового потоку Q_B , залежала від густини теплового потоку Q_{Π} , що підводився до теплообмінної поверхні. Для опорної стінки товщиною 1,8 мм при $Q_{\Pi} \approx 10$ Вт/см² величина Q_p сягала до 50% Q_{Π} , а при $Q_{\Pi} \approx 400$ Вт/см² вона зменшувалася до 7%.

Оскільки форма поверхонь малих розмірів (діаметр поверхні порівняний з діаметром впаяного в стрижень константанового дроту) відрізнялася від ідеально круглої (рис. 6, а), їхня площа визначалася скануванням за допомогою інструментального мікроскопа, після чого знаходили еквівалентний діаметр поверхні $d_{екв} = d_c$. Форма поверхонь великих розмірів була практично круглою. Так, на рис. 6, б представлено зображення торця поверхні діаметром 5,0 мм.

Шорсткість поверхонь визначалася шляхом порівняння з еталонними зразками. Вимірювання показали, що вона була приблизно однаковою для всіх досліджуваних зразків і становила 4–8 мкм.

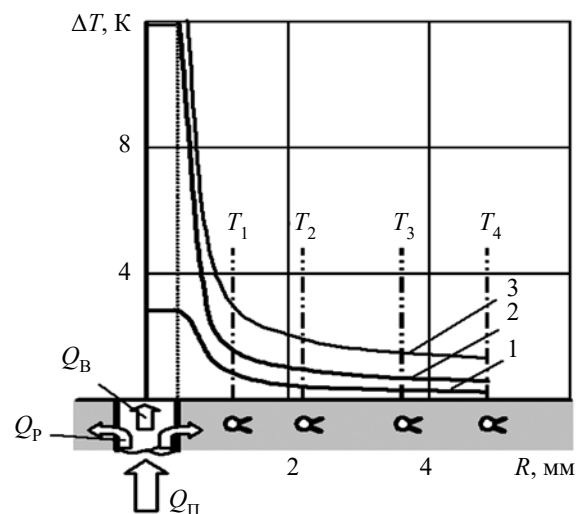


Рис. 5. Температурне поле в опорній стінці при $d_c = 0,87$ мм за різних значень підведеного теплового потоку Q_B (у Вт/см²): 1 — 5; 2 — 17; 3 — 380

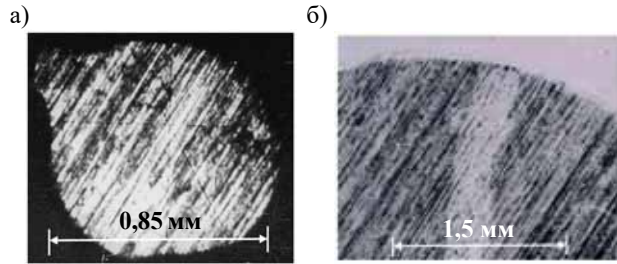


Рис. 6. Зображення поверхонь малого розміру, отримане за допомогою інструментального мікроскопа:

$a - d_{\text{екв}} = 0,87 \text{ мм}$; $b - d_{\text{екв}} = 5,0 \text{ мм}$

В рамках експерименту проводилося швидкісне фільмування процесу кипіння дистильованої води за атмосферного тиску з одночасною фіксацією пульсацій температури поверхні малого розміру на екрані двопроменевого осцилографа під час зростання парової бульбашки. Сигнал термопар з поверхні теплообміну синхронізували з візуальною картиною бульбашкового кипіння, поєднуючи на кіноплівці зображення з робочої камери та з екрана осцилографа (рис. 7): на кадрі кіноплівки одночасно фіксувалися розмір парової бульбашки (отримувався за допомогою оптичних променів та системою дзеркал) і викликане їй дією відхилення температури поверхні від середнього значення. Змінний сигнал термопар I (рис. 4) через підсилювач подавався на один із каналів двопроменевого осцилографа. На іншому каналі встановлювалося середнє значення температури поверхні.

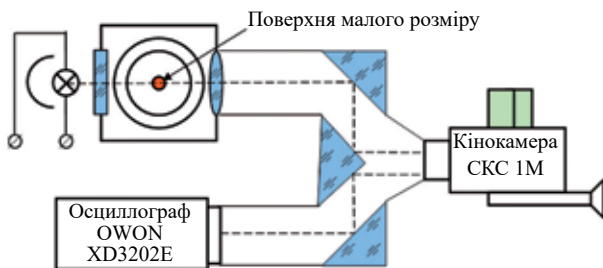


Рис. 7. Схема поєднання двох променів за допомогою швидкісної кінокамери

Швидкість фільмування змінювалася від 800 до 4000 кадрів за секунду. Оскільки амплітуда сигналу пульсацій температури і частота були порівнянними з частотою і рівнем промислових завад, всю установку з вимірювальною апаратурою поміщали в заводозахищений бокс і заземлювали. Тарували термопар зразковою платино-платинородієвою термопарою в діапазоні температури від 20 до 400 °C.

Результати дослідження

В результаті швидкісного фільмування процесу еволюції парової бульбашки (рис. 8) з одночасною фіксацією локальної температури $T_{\text{лок}}$ поверхні у зоні центру пароутворення були отримані дані, які свідчать, що поява бульбашки призводить до різкого зменшення температури поверхні.

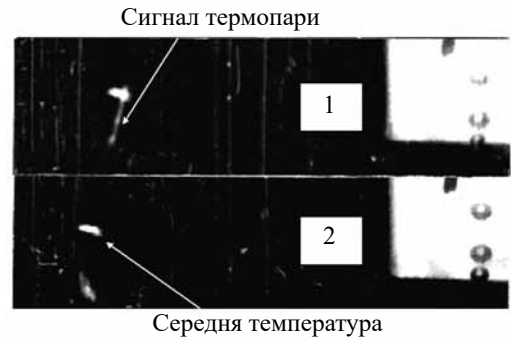


Рис. 8. Кадри зростання парової бульбашки води та пульсацій температури на екрані осцилографа (поверхня діаметром 0,87 мм, тиск $P = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, швидкість фільмування 950 кадр/с)

За короткий проміжок часу, приблизно 0,7 мс (кадр 1 на рис. 8), температура поверхні понизилася на 4°C, що спостерігалось на екрані осцилографа. При цьому видиме зображення парової бульбашки значно перевищувало критичний зародок. Таке зниження температури обумовлене, вочевидь, інтенсивним випаровуванням мікрошару рідини в основі бульбашки. Подальше зростання парової бульбашки не вносило якихось істотних змін у процес зміни температури, і температура під активним центром пароутворення монотонно зростала до деякого середнього значення (рис. 8, кадр 2).

Результати фільмування показали, що на поверхні малого розміру виникають великі парові бульбашки, що мають форму еліпсоїда з вертикальною віссю симетрії (рис. 9). Еквівалентний радіус $r_{\text{екв}}$ сфери однакового з еліпсоїдом об'єму визначався за залежністю [3]

$$r_{\text{екв}} = (A^2 B)^{1/3}, \quad (1)$$

де A, B — лінійні розміри бульбашки по горизонтальній та вертикальній осях.

Для напівсферичної парової бульбашки відстань h від поверхні до її центру симетрії не перевищує еквівалентного радіусу $r_{\text{екв}}$ бульбашки протягом всього часу її зростання, й лише перед самим відривом, коли форма парової бульбашки наближається до сферичної, вони стають однаковими (рис. 10).

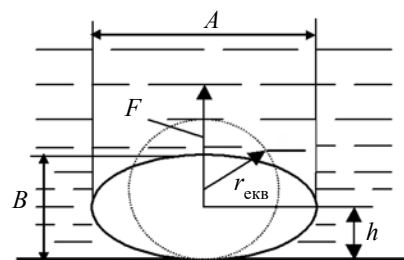


Рис. 9. Схема бульбашки, що зростає на поверхні нагріву: h — відстань до центру симетрії бульбашки; $r_{\text{екв}}$ — радіус еквівалентної сфери; F — рівнодійна сила, прикладена до центру інерції бульбашки

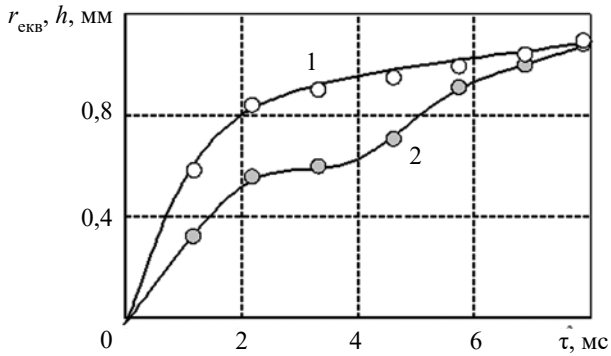


Рис. 10. Зміна еквівалентного радіуса бульбашки (1) і відстані h до її центру симетрії (2) при кипінні води на поверхні діаметром 0,87 мм

В процесі зростання парова бульбашка змінює свою форму. Приблизно до 4 мс вона має вигляд еліпсоїда, а потім горизонтальний розмір починає зменшуватися, а вертикальний збільшуватися. Це пов'язано із розподілом сил у цьому процесі: через зростання об'єму бульбашки сили Архімеда збільшуються й у певний момент починають перевищувати сили спротиву рідини. Таким чином форма бульбашки починає наближатися до сферичної. Це спостерігається у період від 4 до 8 мс, а потім вона відривається від поверхні нагріву.

Під час кипіння поява першої бульбашки викликає зміну температури поверхні під нею на величину $\Delta T_{\text{лок}}$. На рис. 11 наведено часові залежності $\Delta T_{\text{лок}}$, еквівалентного радіуса бульбашки $r_{\text{екв}}$ та відстані до її центру симетрії h для двох значень теплового потоку. Різка падіння температури в початковий момент зростання бульбашки можна пояснити лише випаровуванням мікрошару рідини під нею. Парова бульбашка в момент свого виникнення відтісняє тепловий прикордонний шар рідини від поверхні нагріву.

Після випаровування мікрошару рідини (повністю або частково) температура поверхні в зоні активного центру пароутворення починає підвищуватися, а одночасно з цим зростання бульбашки відбувається як завдяки підведенню теплової енергії безпосередньо від поверхні до пари, так і через випаровування витісненого перегрітого пристінного шару по твірній парової бульбашки. Як видно з рис. 11, відрив бульбашки від поверхні (момент позначено кружечком на кривій $\Delta T_{\text{лок}} = f(\tau)$) практично не вносить змін у монотонний характер зростання температури під центром пароутворення. Це може бути наслідком того, що протягом всього часу зростання парової бульбашки під нею знаходиться мікрошар рідини, який поступово потовщується, що призводить до підвищення термічного опору та температури поверхні.

Після відриву парової бульбашки холодніша рідина не дістається поверхні нагріву, і температура під центром пароутворення продовжує зростати, асимптотично наближаючись до деякої постійної величини. Відбувається формування перегрітого шару для створення умов активації наступної парової бульбашки.

Як видно з аналізу геометричних характеристик на рис. 11, чим більшою стає бульбашка, тим більше її форма відрізняється від сферичної. При цьому спостереження процесу бульбашкового кипіння показало, що немає залежності відривного діаметра d_v парових бульбашок від густини теплового потоку, тобто за будь-якого значення Q утворюються бульбашки випадкової величини. А ось падіння температури поверхні залежить від d_v , оскільки на появу бульбашок витрачається певна кількість енергії — очевидно, що тим більша, чим більшою є бульбашка. Тому очевидно, що існує залежність величини $\Delta T_{\text{лок}}$ від діаметра d_v , про що було сказано у [8]. Це припущення було підтверджено нами експериментально завдяки спо-

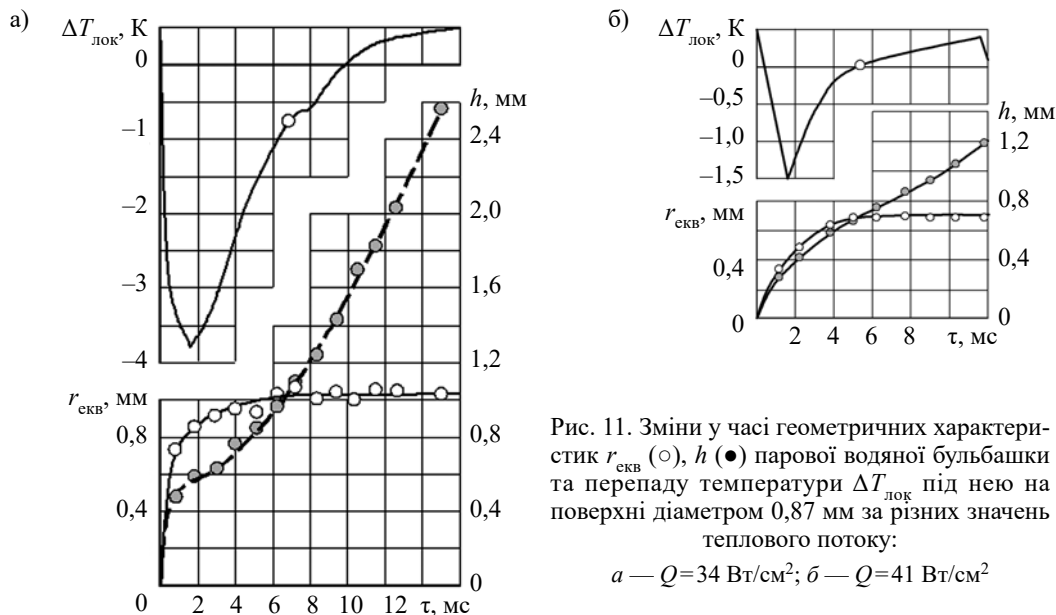


Рис. 11. Зміни у часі геометричних характеристик $r_{\text{екв}}$ (○), h (●) парової водяної бульбашки та перепаду температури $\Delta T_{\text{лок}}$ під нею на поверхні діаметром 0,87 мм за різних значень теплового потоку:

$a — Q=34 \text{ Вт/см}^2$; $b — Q=41 \text{ Вт/см}^2$

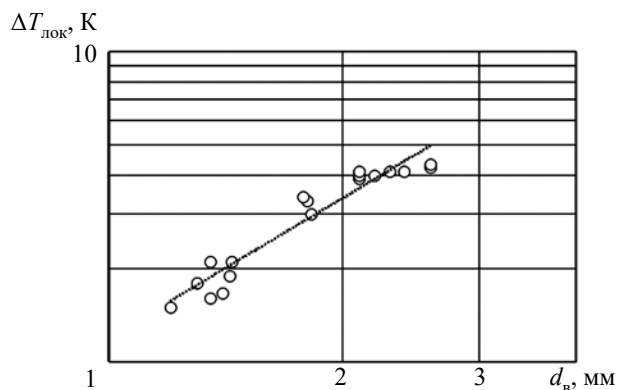


Рис. 12. Залежність величини пульсації температури при кипінні води на мідній поверхні діаметром 0,87 мм у великому об'ємі за атмосферного тиску

стереженню за процесом бульбашкового кипіння з одночасною фіксацією падіння температури поверхні. На рис. 12 показано отримані експериментальні дані, які з точністю до 10% апроксимуються функцією

$$\Delta T_{\text{лок}} = 3,6 \cdot 10^4 \cdot d_{\text{в}}^{1,5}. \quad (2)$$

Висновки

Таким чином, проведене дослідження експериментально показало, що у процесі бульбашкового кипіння поверхня теплообміну зазнає температурних пульсацій. Це потрібно враховувати при використанні систем охолодження на основі бульбашкового кипіння для підтримання температурного режиму електронних приладів, оскільки такі пульсації можуть впливати на їхні робочі характеристики. Подальші дослідження потрібно спрямувати на визначення пульсацій температури при кипінні діелектричних рідин на поверхнях малого розміру за теплових потоків великої густини (до 400 Вт/см²), а також при субатмосферних величинах тиску.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Moore F. D., Mesler R. B. The measurement of rapid surface fluctuations during nucleate boiling of water, *AIChE Journal*, 1961, no. 7, iss. 5, pp. 620–624. <https://doi.org/10.1002/aic.690070418>

2. Rogers T.F., Mesler R.B. An experimental study of surface cooling by bubbles during nucleate boiling of water. *AIChE Journal*, 1964, vol. 10, iss. 5, pp. 656–660. <https://doi.org/10.1002/aic.690100516>.

3. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. Киев: Наук. думка, 1980. 316 с.

4. Katto Y., Takahashi S., Yokoya S. Law of micro-liquid-layer formation between a growing bubble and a solid surface with a special reference to nucleate boiling. *Bulletin of the JSME*, 1973, vol. 16, iss. 97, pp. 1066–1074. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.16.1066>

5. Jawurek H.H. Simultaneous determination of microlayer geometry and bubble growth in nucleate boiling. *Int. Journal Heat and Mass Transfer*, 1969, vol. 12, no. 8, pp. 843–848. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90151-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90151-3)

6. Cooper M.G. The microlayer and bubble growth in nucleate pool boiling. *Int. Journal Heat and Mass Transfer*, 1969, vol. 12, iss. 8, pp. 914–917. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90155-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90155-0)

7. Cooper M.G., Lloyd A.J.P. The microlayer in nucleate pool boiling. *Int. Journal Heat and Mass Transfer*, 1969, vol. 12, iss. 8, pp. 895–913. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90154-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90154-9)

8. Smirnov G.F. Calculation of the ‘initial’ thickness of the ‘microlayer’ during bubble boiling. *J. Engng Phys.*, 1975, vol. 28, no. 3, pp. 369–374. <https://doi.org/10.1007/BF00862021>

9. Zhang Xi., El Mellas Is., Andreini N., Magnini M. The microlayer and force balance of bubbles growing on solid in nucleate boiling. *International Journal of Multiphase Flow*, 2025, vol. 183, 105049. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.105049>

10. Zhang Xi., El Mellas Is., Magnini M. Predicting initial microlayer thickness in nucleate boiling using Landau–Levich theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, vol. 997, A44. <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2024.559>

11. Utaka Y., Kashiwabara Y., Ozaki M. Microlayer structure in nucleate boiling of water and ethanol at atmospheric pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 57, pp. 222–230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.031>

12. Zhang X., Nikolayev V. S. Dewetting acceleration by evaporation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, vol. 948, A49. <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.725>

13. Urbano A., Tanguy S., Huber G., Colin C. Direct numerical simulation of nucleate boiling in micro-layer regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 123, pp. 1128–1137. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.104>

14. Kravets V.Yu. *Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems*. Kyiv: Interservice, 2023. 204 p. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6711>

Дата надходження рукопису
до редакції 10.05 2025 р.

VAPORIZATION PROCESSES DURING COOLING
OF MINIATURE ELECTRONIC DEVICES

The widespread introduction of new technologies contributes to the rapid development of various fields of technology, both in terms of increasing the functionality of systems and equipment and reducing the weight and size characteristics of individual components and devices in general. This is especially evident in radio electronics, particularly in computer technology, where the heat flux densities emitted by individual electronic components can be very high. In such a case, the temperature of the chips increases and may exceed the maximum permissible values. To ensure the specified operating temperatures of electronic equipment, the bubble boiling process is used. The highest intensity of heat transfer is observed during boiling. This is due to the evaporation of a thin micro-layer of liquid under the growing steam bubble.

This paper describes an experimental study of the peculiarities of the bubble boiling process on small surfaces. The experiment's unique feature was the visual observation of the combined appearance and growth of a steam bubble, as well as the temperature pulsation of the surface beneath it. The process of bubble boiling occurred in a large volume at atmospheric pressure on small copper surfaces with a diameter of 0.4 to 5.0 mm. The surface temperature was recorded using a specially designed thermocouple. The signal from the thermocouple was fed through an amplifier to a two-beam oscilloscope. Using a system of mirrors, the process of evolution of the vapor bubble and surface temperature fluctuations were recorded on the film of a high-speed movie camera. The film speed varied from 800 to 4000 frames per second.

Experimental results have shown that both spherical and hemispherical vapor bubbles grow on the surface during boiling. Moreover, the surface temperature fluctuation depends on the size of such bubbles at the moment of their detachment. The larger the bubble bursting diameter, the greater the amplitude of the surface temperature fluctuations. It is shown that the main factor in increasing the intensification of heat transfer is the evaporation of a microlayer of liquid under the vapor bubble. The dependence of the surface temperature fluctuation on the values of the detachable diameters of the steam bubbles is obtained.

Thus, if bubble-boiling cooling systems are used to maintain the temperature regime of electronic devices, it is necessary to take into account the temperature fluctuations of the heat transfer surface, as they can affect the operating characteristics of the devices.

Keywords: heat transfer; boiling; liquid microlayer; temperature fluctuation; small surface; steam bubble.

REFERENCES

1. Moore F. D., Mesler R. B. The measurement of rapid surface fluctuations during nucleate boiling of water, *AIChE Journal*, 1961, no. 7, iss. 5, pp. 620–624. <https://doi.org/10.1002/aic.690070418>
2. Rogers T.F., Mesler R.B. An experimental study of surface cooling by bubbles during nucleate boiling of water. *AIChE Journal*, 1964, vol. 10, iss. 5, pp. 656–660. <https://doi.org/10.1002/aic.690100516>.
3. Tolubinskiy V.I. *Теплообмен при кипении* [Heat exchange during boiling]. Kyiv: Nauk. Dumka, 1980. 316 p. (Rus)
4. Katto Y., Takahashi S., Yokoya S. Law of micro-liquid-layer formation between a growing bubble and a solid surface with a special reference to nucleate boiling. *Bulletin of the JSME*, 1973, vol. 16, iss. 97, pp. 1066–1074. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.16.1066>
5. Jawurek H.H. Simultaneous determination of microlayer geometry and bubble growth in nucleate boiling. *Int. Journal Heat and Mass Transfer*, 1969, vol. 12, no. 8, pp. 843–848. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90151-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90151-3)
6. Cooper M.G. The microlayer and bubble growth in nucleate pool boiling. *Int. Journal Heat and Mass Transfer*, 1969, vol. 12, iss. 8, pp. 914–917. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90155-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90155-0)
7. Cooper M.G., Lloyd A.J.P. The microlayer in nucleate pool boiling. *Int. Journal Heat and Mass Transfer*, 1969, vol. 12, iss. 8, pp. 895–913. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90154-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90154-9)
8. Smirnov G.F. Calculation of the ‘initial’ thickness of the ‘microlayer’ during bubble boiling. *J. Engng Phys.*, 1975, vol. 28, no. 3, pp. 369–374. <https://doi.org/10.1007/BF00862021>
9. Zhang Xi., El Mellas Is., Andreini N., Magnini M. The microlayer and force balance of bubbles growing on solid in nucleate boiling. *International Journal of Multiphase Flow*, 2025, vol. 183, 105049. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.105049>
10. Zhang Xi., El Mellas Is., Magnini M. Predicting initial microlayer thickness in nucleate boiling using Landau–Levich theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, vol. 997, A44. <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2024.559>
11. Utaka Y., Kashiwabara Y., Ozaki M. Microlayer structure in nucleate boiling of water and ethanol at atmospheric pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 57, pp. 222–230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.031>
12. Zhang X., Nikolayev V. S. Dewetting acceleration by evaporation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, vol. 948, A49. <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.725>
13. Urbano A., Tanguy S., Huber G., Colin C. Direct numerical simulation of nucleate boiling in micro-layer regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 123, pp. 1128–1137. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.104>
14. Kravets V.Yu. *Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems*. Kyiv: Interservice, 2023. 204 p. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6711>



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).