

## BOILING IN MICRO I MACROCHANNELS (STATE-OF-THE-ART REVIEW). PART 2.

V.R. Kulinchenko

National University of Food Technologies

---

**Key words:**

micro channel,  
macro channel,  
boiling is heat emission, bubble,  
boiling modes, thermal stream.

**Article history:**

Received 20.05.2015  
Received in revised form  
14.09.2015  
Accepted 25.09.2015

**Corresponding author:**

ingmex@ukr.net

---

**ABSTRACT**

Consideration exothermic process of transmission of heat in mini or macro channel which contains a boiling liquid and can take into account any of the followings cases or any combination of these cases: process of the partial boiling in a micro channel with a chemical reaction in a contiguous reactionary chamber; process of the partial boiling in a micro channel with a chemical reaction in a contiguous reactionary chamber, whereby the temperature of catalyst rises less than on 10 °C, 5 °C, 3 °C on along length of reactionary chamber, and time of reactionary contact makes less than 300 μs; process of the partial boiling in a micro channel together with the process of change of phase in a contiguous technological chamber, by virtue of what extension temperatures in a technological chamber makes less 10 °C; process of the partial boiling in a micro channel together with the process of mixing in a contiguous technological chamber, by virtue of what extension temperatures in the chamber of mixing makes less 5 °C; process of the partial boiling in a micro channel together with the process of fermentation in a contiguous technological chamber.

---

## КИПІННЯ В МІКРО- І МАКРОКАНАЛАХ (АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД). ЧАСТИНА 2.

В.Р. Кулінченко, д-р техн. наук

Національний університет харчових технологій

*Розглянутий екзотермічний процес передачі тепла в мікро або макроканал, який містить киплячу рідину і може враховувати будь-який з наступних випадків або будь-яку комбінацію цих випадків: процес часткового кипіння в мікроканалі з хімічною реакцією в суміжній реакційній камері; процес часткового кипіння в мікроканалі з хімічною реакцією в суміжному реакційному мікроканалі; процес часткового кипіння в мікроканалі з хімічною реакцією в суміжній реакційній камері, за допомогою чого температура каталізатора підвищується менш 10, 5, 3 °C на довжині реакційної камери, а час реакційного контакту складає менше 300 мс.*

**Ключові слова:** мікроканал, макроканал, кипіння, тепловіддача, бульбашка, режими кипіння, тепловий потік.

**Теорія часткового кипіння (продовження).** Що стосується матриці вирівняних мікроканалів, де локальний тепловий потік змінюється від каналу до каналу, то утруднення, які були розглянуті вище, ще складніші. Можливі одиничні випадки, які мали б змінний профіль теплового потоку над матрицею сполучних каналів, включають, але не обмежені наступним: екзотермічні хімічні реакції, каталітичні або однорідні, тепловідвід з дистиляційної колони, етап десорбції в системі абсорбції або адсорбції, процеси екзотермічного змішування і так далі. Це може відбутися, якщо мікроканали вирівняні уперек наряду інших каналів. Що стосується ситуації із змінним потоком в каналі, то для підтримки конвективного кипіння, може виникнути необхідність в більшій кількості потоку в каналах із більшими тепловими потоками і з меншими потоками для каналів з меншими тепловими потоками.

В опублікованій літературі не відбивається єдиної думки відносно експлуатаційних характеристик кипіння в мікроканалах.

**Режим кипіння і механізми теплопередачі.** З одного боку, деякі дослідники говорять про те, що кипіння в мікроканалах є унікальним і володіє потенційними перевагами в порівнянні з макромасштабними аналогами. Наприклад, в роботі [5] приводиться критичний аналіз кипіння в потоці в каналах з гідравлічним діаметром менше 3 мм. На підставі цього аналізу, були зроблені наступні висновки:

- Під час кипіння потоку в мікроканалах зазвичай мають місце три режими потоку: окрема (ізольована) бульбашка, замкнута бульбашка або пробка, і кільцевий режим потоку (рис. 2).

- При визначенні кінцевого режиму киплячого потоку важливим чинником є вплив граничного поверхневого натягу між фазами. Підтверджується існування маленьких зародкових бульбашок до 10—20 мікрон.

Слід зазначити, що з погляду продуктивності теплообміну, ізольовані бульбашки є найбільш бажаними. У роботі [6] автори посилаються на дані і попередній теоретичний аналіз, який підтримує теорію про те, що утворення бульбашок і явище виділення в мікроканалах істотно відрізняються від аналогічних явищ у великих каналах. При кипінні з недогріванням градієнти швидкості і температури біля стінок мікроканалів можуть бути дуже великими, і ті бульбашки, які з'явилися в результаті кипіння з недогріванням або кипіння у фазі насичення, можуть бути дуже маленькими. Виникнення дуже маленьких бульбашок істотно впливає на різні процеси кипіння з недогріванням, включаючи початок бульбашкового кипіння (ПБК), початок значущої порожнини (ПЗП) і відхилення від бульбашкового кипіння, наприклад, плівкове кипіння.

Ці ж автори висувають також гіпотезу про те, що початок кипіння в мікроканалах можна регулювати термокапілярними силами, які прагнуть подавити утворення мікробульбашок на порожнинах стінки. Якщо це дійсно так, то можна припустити, що теплопередача в мікроканалах, яка значно збільшується бульбашковим кипінням завдяки прихованій теплоті паротворення, буде, насправді, виконуватися гірше, ніж в каналах звичайного розміру. У їх дослідженнях мовиться про те, що макромасштабні моделі і кореляції для тепловіддачі при кипінні, видна недооцінка при прогнозуванні теплових потоків, які необхідні для початку кипіння в мікротрубках Серед інших чинників необхідно відзначити, що їх експерименти проводилися в повністю турбулентному режимі, тоді як більшість мікроканалів працюють в режимі ламінарного потоку.

У роботі [7] автори розглядають експериментальні дослідження коефіцієнтів теплопередачі кипіння потоку з недогріванням для вибраних холодоагентів в гладких мідних трубках невеликого діаметру. Були розглянуті наступні діапазони параметрів: діаметри трубок 0,92 і 1,95 мм, теплові потоки — від 11 до 170 кВт/м<sup>3</sup> і загальна кількість потоків маси від 110 до 1840 кг/(м<sup>2</sup>·с). Більш того, обмежений набором даних діапазон чисел Рейнольдса для рідини складає від 450 до 12000. У своїй роботі вони не визначили ні доказу того, що конвекція пригнічує член зародкоутворення, а також не навели доказу того, що акти зародкоутворення підсилюють конвективний член навіть в ламінарних і перехідних потоках. Проте ламінарні потоки можуть збільшуватися за допомогою невизначеного механізму.

У своїх експериментальних дослідженнях [8] наголошується, що основною моделлю теплообміну під час бульбашкового кипіння є збудження бульбашок. Збудження розсівається у міру того, як бульбашка рухається від нагрітої поверхні каналу.

Автори [3] проводили експерименти з бульбашковою динамікою в одиночному трапецієвидному мікроканалі з гідравлічним діаметром 41,3 мікрон. Результати цього дослідження указують на те, що утворення бульбашок в мікроканалі зазвичай росте з постійною швидкістю від 0,13 до 7,08 мікрон/мс. В деяких випадках спостерігається надзвичайно висока швидкість росту від 72,8 до 95,2 мікрон/мс. Виявилось, що на розмір тієї бульбашки, яка відривається від стінки мікроканала, впливає поверхневий натяг і гідродинамічний опір масової витрати на відміну від напруги стінки при зсуві, крім того, його можна належним чином корелювати за допомогою модифікованої форми рівняння Леві. Вони також стверджують, що частота бульбашок в мікроканалі порівнянна з частотою бульбашок в каналі звичайного розміру.

Том [9] провів аналіз останніх досліджень в області кипіння в мікроканалах. Був зроблений аналіз експериментів і теорії паротворення в мікроканалі. Він стверджує, що основним домінуючим режимом потоку, мабуть є режим витягнутих бульбашок, який може

продовжувати існувати до сухості пари 60—70 % в мікроканалах, після чого слідує кільцевий потік. Також він стверджує, що регулюючий механізм теплообміну не є ні бульбашковим кипінням, ні турбулентною конвекцією, а перехідним тонкоплівковим паротворенням. Як показують деякі дослідники, коефіцієнти теплопередачі кипіння потоку майже виключно залежать від теплового потоку і тиску насичення, тобто схожі на теплопередачу при бульбашковому кипінні у великому об'ємі і лише трохи залежать від швидкості маси і сухості пари. Проте в ході недавню проведених тестів було продемонстровано вплив швидкості маси і сухості пари, що підтримує гіпотезу про те, що при кипінні теплообмін регулюється снаряжним режимом потоку або тонко плівковим кипінням.

**Стійкість потоку.** Стійкість потоку кипіння в мікроканалі є питанням, що викликає великі побоювання. Оскільки ще не існує ніякої комплексної теорії про початок нестійкості, вона в основному вивчається по флуктуаціях і візуалізації тиску потоку. Теплообмін набагато менш ефективний для нестійкого потоку з багатьох причин, включаючи нестійкість в різних режимах потоку, утворення плівкового кипіння, зворотного потоку і слабкий розподіл потоку. Нижче приводяться цитати з наявної літератури про відомий рівень техніки по цій темі.

Брутін та ін. [10] досліджували нестійкість двофазного потоку під час конвективного кипіння, що має місце у вузьких прямокутних мікроканалах. Гідралічний діаметр складав 889 мікрон, а довжина каналу 200 мм. Експерименти проводили при потоці маси величиною  $240 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$  і теплових потоках в діапазоні від 3,3 до  $9,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . За всіх цих умов утворюється парова пробка, яка блокує двофазний потік і проштовхує його назад до входу. На підставі своїх експериментальних спостережень, вони встановлюють критерій для потоку в стійкому стані як низькі коливання амплітуди флуктуації в зміряному тиску потоку менше  $1 \text{ кПа}$ , і при цьому характеристична частота коливань співвідношення менше 20 (відношення амплітуди піку до амплітуди шуму).

У наукових роботах наводиться опис ряду експериментів, які проводилися для вивчення різних режимів нестійкості кипіння для води у потоці в мікроканалах при різних значеннях теплового потоку і потоку маси. У цих експериментах використовували вісім паралельних кремнієвих мікроканалів з

однаковим трапецієвидним поперечним перерізом, з діаметром 186 мікрон і завдовжки 30 мм. Коли тепловий потік на стінці був збільшений з  $13,5$  до  $22,6 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , а середній за часом потік маси води був зменшений з  $14,6$  до  $11,2 \text{ г}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ , то в мікроканалах спостерігали три види режимів нестійкого кипіння:

- Рідкий/двофазний змінний потік (РДЗП) при слабкому тепловому потоці і великому потоці маси;
- Безперервний двофазний потік (БДП) при середньому тепловому потоці і середньому потоці маси;
- Рідкий/двофазний/парової змінний потік (РДПЗП) при високому тепловому потоці і слабкому потоці маси.

Зазвичай РДЗП виникав при нижчому тепловому потоці від  $13,5$  до  $16,6 \text{ Вт}/\text{см}^2$  і вищому середньому потоці маси від  $14,6$  до  $12,7 \text{ г}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ; БДП виникав при середньому тепловому потоці  $18,8 \text{ Вт}/\text{см}^2$  і середньому потоці маси  $11,9 \text{ г}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ , а РДПЗП виникав при вищому тепловому потоці  $22,6 \text{ Вт}/\text{см}^2$  і нижчому потоці маси  $11,2 \text{ г}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ . Серед трьох нестійких режимів кипіння, амплітуди коливань в РДПЗП були найбільшими при коливаннях тиску і потоку маси майже за межами тих граничних значень, які визначені для цієї фази.

Значення  $L/D_h$ . Всі експерименти з мікроканалами проводяться при певній фіксованій геометрії. Для того, щоб дати короткий опис продуктивності теплообміну для цих пристроїв, було визначено, що співвідношення довжина-діаметр, яке зазвичай рівне довжині каналу, що ділиться на гідралічний діаметр  $L/D_h$ , є зручним показником. У більшій частині літератури про відомий рівень техніки не наводяться чіткі дані про довжину каналів, використаних в їх експериментах. Нижче перерахована та література, в якій вказані ці дані.

- Брутін та ін.:  $L/D_h = 100$  і  $250$  (див. опис вище в розділі «Стійкість потоку»).
- Ву та ін.:  $L/D_h = 161$  (див. опис вище в розділі «Стійкість потоку»).
- Лі та ін.: для дослідження впливів форми каналу розміром декілька мікрометрів на режими потоку, що розвиваються, і теплову продуктивність мікросистеми використовувався

інтегрований стік теплоти з неглибоких, майже прямокутних мікроканалів. У цьому пристрої використовувалися канали з еквівалентним діаметром  $D_n=24$  мікрон і загальною довжиною 19 мм, що дало співвідношення  $L/D_n=792$ . Був зроблений висновок про те, що локальне зародкоутворення і ізольоване утворення бульбашок незначні. Домінуючий режим потоку є нестійкою областю переходу, яка сполучає зону пари у верхній течії із зоною рідини в низовій течії, і середнє місцеположення цієї області залежить від вхідної потужності.

• Уоррієр та ін.: у невеликих прямокутних каналах були проведені експерименти по однофазній вимушеній конвекції, а також експерименти по бульбашковому кипінню у фазі недогрівання і фазі насичення з використанням дослідної рідини FC-84. Дослідні ділянки складалися з п'яти паралельних каналів, причому кожен канал мав наступні розміри: гідравлічний діаметр  $D_n = 0,75$  мм і співвідношення довжина-діаметр було 409,8. Ці експерименти були проведені з горизонтально орієнтованими каналами, і при цьому до верхньої і нижньої поверхонь були підведені однакові теплові потоки. Ті параметри, які мінялися під час експериментів, включали швидкість потоку маси, недогрівання вхідної рідини і тепловий потік. Для теплообміну при кипінні в недогрітому і насиченому потоці були утворені нові кореляції теплообміну.

• Петтерсе: досліджував випаровування рідкого  $\text{CO}_2$  в мікротрубках діаметром 0,8 мм і завдовжки 0,5 м  $L/D_n=625$ . Вимірювання теплопередачі і падіння тиску були проведені при змінній паровій фракції при температурах в діапазоні від 0 до 25°C, потоці маси 190—570 кг і тепловому потоці 5—20 кВт/м<sup>2</sup>. Результати теплопередачі показують значний вплив висихання, особливо при великому потоці маси і високій температурі. Спостереження за потоком відображають винесення при більшому потоці маси, що збільшується, і домінування кільцевого потоку — пробковий потік і тонко плівкове кипіння.

**Висновки.** Наводиться опис ряду експериментів, які проводилися для вивчення різних режимів нестійкості кипіння для води у потоці в мікроканалах при різних значеннях теплового потоку і потоку маси.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Kandlikar S.G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels / S.G. Kandlikar // *Experimental Thermal and Fluid Science*. — 2002. — P. 389—407.
2. Chedester R.C. A proposed mechanism for hydrodynamically-controlled onset of significant void in microtubes / R.C. Chedester, S.M. Ghiaasiaan // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2002. — P. 769—775.
3. Honda H. Enhanced boiling heat transfer from electronic components by use of surface microstructures / H. Honda, J.J. Wei. // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2004. — P. 159—169.
4. Forced convection and flow boiling heat transfer for liquid flowing through microchannels // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 1993. — v.36, No.14. — P. 3421-2427.
5. Thome J.R. Boiling in microchannels: a review of experiment and theory / Thome J.R. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2004. — P. 128—139.
6. Brutin D., Experimental study of unsteady convective boiling in heated minichannels / D. Brutin, P. Topt, L. Tardist // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2004. — P. 2957—2965.
7. Wu H.Y. An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions / H.Y. Wu, P. Cheng. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2003 — P. 2547—2556.
8. Wu H.Y. Boiling instability in parallel silicon microchannels at different heat flux / H.Y. Wu, P. Cheng. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2004. — P. 3631—3641.
9. Warriar G.R. Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels / Warriar G.R., Dhir V.K., Momoda L.A. // *Experimental Thermal and Fluid Science*. — 2002 — P. 53—64.
10. Pettersen J. Flow vaporization of  $\text{CO}_2$  in microchannel tubes / Pettersen J. // *Experimental Thermal and Fluid Science*. — 2004 — P. 111—121.

## КИПЕНИЕ В МИКРО- I МАКРОКАНАЛАХ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР). ЧАСТЬ 2.

**В.Р. Кулинченко**

*Национальный университет пищевых технологий*

*Рассмотрен экзотермический процесс передачи тепла в микро или макроканал, который содержит кипящую жидкость и может учитывать любой из следующих случаев или любую комбинацию этих случаев: процесс частичного кипения в микроканале с химической реакцией в смежной реакционной камере; процесс частичного кипения в микроканале с химической реакцией в смежном реакционном микроканале; процесс частичного кипения в микроканале с химической реакцией в смежной реакционной камере, с помощью чего температура катализатора повышается менее чем на 10 °С, 5 °С, 3 °С на длине реакционной камеры, а время реакционного контакта составляет менее 300 мс.*

**Ключевые слова:** микроканал, макроканал, кипение, теплоотдача, пузырек, режимы кипения, тепловой поток