

BOILING IN MICRO I MACROCHANNELS (STATE-OF-THE-ART REVIEW)

V.R. Kulichenko

National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
micro channel, macro channel, boiling is heat emission, bubble, boiling modes, thermal stream.	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.
Article history: Received 6.03.2014 Received in revised form 14.10.2014 Accepted 14.11.2014	
Corresponding author: ingmex@ukr.net	

КИПІННЯ В МІКРО- І МАКРОКАНАЛАХ (АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД)

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.

Завдання пов'язане з методами, пристроями і системами, в яких має місце часткове кипіння рідини в мікро- або макроканалі. Один з розмірів макроканалу складає 10 мм або менше. Один з розмірів мікроканала рівний 2 мм або менше, а в деяких варіантах конструкції в межах від 0,01 до 2 мм. Не дивлячись на те що мікро- і макроканали зазвичай мають такі розміри, в деяких конструкціях діаметр мікроканала складає $D_h < 2$ мм, де D_h — гідравлічний діаметр, а мікроканал визначається як канал, що має величину D_h від 2 до 10 мм.

Теорія часткового кипіння. Відомо, що кипіння є високоефективним механізмом передачі тепла, який забезпечує високу густину теплового потоку на основі площі поверхні і об'єму. Існує декілька режимів кипіння, включаючи потік з низьким масовим паровмістом потоку, бульбашкове кипіння, плівкове кипіння, а також кипіння в перехідному режимі.

Бульбашкове кипіння в основному знаходить своє застосування в промислових установках. Кипіння може відбуватися на поверхні теплопередачі як в потоці рідини, так і у великому об'ємі, або в об'ємі самої рідини. За допомогою фазового переходу рідини, кипіння в потоці може досягти ізотермічного стоку теплоти під час фазового переходу. Кипіння в потоці може досягти дуже високих коефіцієнтів конвективної теплопередачі і разом з ізотермічною рідиною дозволяє стінці теплопередачі залишатися при квазіпостійній температурі уздовж напрямку потоку. Така теплопередача є бажаною ситуацією для різних теплових застосувань в областях хімічних, мікробіологічних, фармацевтичних процесів.

У багатьох хімічних процесах, наприклад, в екзотермічному хімічному реакторі, швидкість реакції сильно залежить від локальної температури. Оптимальна температура по всій зоні реакції часто приводить до максимального виходу продуктів реакції, хімічного перетворення і бажаної вибірконості. Таким чином, теплопередача при кипінні використовується при управлінні технологічним процесом або терморегулюванні різних реакцій для підтримки ізотермічних теплових умов, при яких екзотермічна реакція(ї) виділяє тепло. В порівнянні з управлінням процесом кипіння, система охолодження шляхом однофазного хімічного перетворення рідини зазвичай не досягає схожих ізотермічних граничних умов для реакцій без великих швидкостей потоку, які необхідні для підтримки потоку при постійній температурі і збільшення конвективного теплового потоку.

До теперішнього часу кипіння в мікроканалах не використовувалося для терморегулювання і контролю процесів хімічних реакцій в мікроканалах із-за різних передбачуваних або практичних технічних проблем, включаючи наступні:

1. Кипіння потоку в мікроканалах пов'язане з такими формами потоку, які відрізняються від тих, які були виявлені в звичайних каналах, де бульбашки пари менше діаметру каналу, а стінка каналу зазвичай добре змочена рідиною. Гідравлічний діаметр мікроканалів звичайно менше характерного діаметру бульбашок пари, тому із-за капілярного ефекту парові і рідинні пробки послідовно стікають одна за одною до певної ділянки каналу (рис. 1). Методи прогнозування і критерії проектування для такої форми потоку визначені не дуже добре.

2. Інші бажані режими потоку, такі як аерований потік і кільцевий режим потоку, можуть бути отримані тільки в дуже вузькому діапазоні параметрів потоку або за обмежених умов роботи, або можуть бути взагалі відсутніми.

3. Із-за наявності парових пробок може виникнути локальна ділянка перегріву стінки і, як наслідок, неоднорідність температури унаслідок низької швидкості теплообміну між паром і стінкою.

4. Із-за наявності парових пробок при кипінні в мікроканалі може виникнути сильний потік і коливання тиску. Відразу ж може виникнути нестабільність всієї системи охолодження.

5. Криза теплопередачі може відбуватися навіть при слабкому тепловому навантаженні зважаючи на велику різницю між коефіцієнтами теплопередачі при випаровуванні і при конвекції однофазної пари. Це характеризується критичним тепловим потоком (КТП), який може бути дуже низьким, і призвести до неізотермічного теплообміну.

6. Розподіл і розгалуження потоку в наборах мікроканалів з двофазним потоком утруднені, тоді як для бажаної продуктивності процесу зазвичай потрібна велика кількість інтегрованих каналів (рис. 1).

Даний процес дає можливість використовувати кипіння потоку в мікроканалах, інтегрованих в одиничні операції, для реалізації стійкої ізотермічної граничної умови для екзотермічної реакції. Таким чином, є можливість для теплового управління процесом реакції для роботи за оптимальних умов.

Термін «рівноважний масовий паровміст X_{eq} », також відомий як якість або X , визначається наступним чином:

$$X_{eq} = \frac{zq''P}{AGh_{fg}}, \quad (1)$$

де z [м] — відстань від входу каналу у напрямі потоку води (м); q'' [Вт/м²] — середній тепловий потік біля стінки каналу; P [м] — периметр каналу, перпендикулярний по відношенню до напрямку потоку; A [м²] — площа поперечного перерізу каналу, перпендикулярна по відношенню до напрямку потоку; G [кг/м²·с] — швидкість потоку маси через площу поперечного перерізу каналу, перпендикулярну по відношенню до потоку; h_{fg} [Дж/кг] — прихована теплота паротворення.

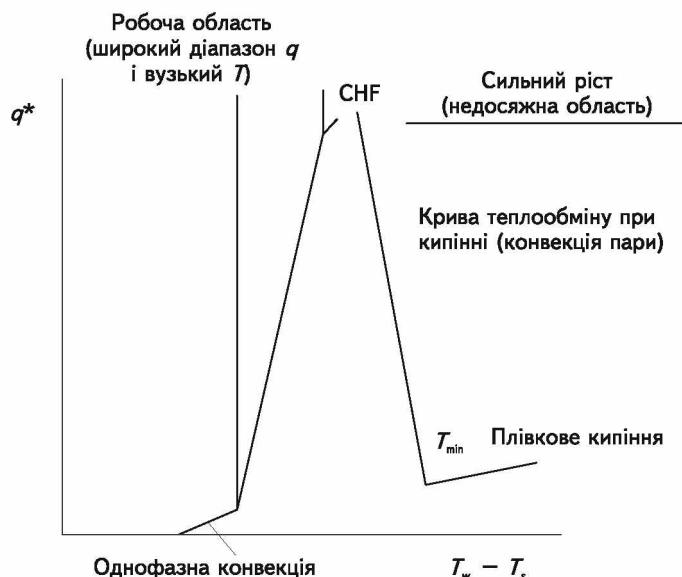


Рис. 1. Схема режимів киплячого потоку в мікроканалі

Рівняння (1) припускає, що:

1) Точка початку бульбашкового кипіння (ПБК) при $X_{eq} = 0$ знаходиться прямо на вході до каналу. На практиці, потік води на вході буде трохи не догрітим із-за неконденсованого газу. По суті, місцеположення $X_{eq} = 0$ не знаходиться в перерізі $z = 0$, де z є напрямком потоку і $z = L$ (де L — довжина мікроканала кипіння) є кінцем мікроканала. З іншого боку, потік води на вході міг би бути також перегрітим $X_{eq} > 0$ в результаті попереднього нагрівання, щоб підтримувати температуру води перед її входом в канал;

2) Перегрів стінки $T_w - T_{sat}$ є досить великим для того, щоб почати кипіння біля входу в мікроканал, який складає перші 5 % його довжин;

3) q'' — постійна уздовж краю каналу і уздовж напрямку потоку.

Для того, щоб визначити падіння тиску в каналі, необхідно знати локальний масовий паровміст конвекційного потоку. Знаючи зміну істинного об'ємного паровмісту і ступінь сухості вологої пари уздовж довжини каналу, падіння двофазного тиску в каналі можна розрахувати за допомогою моделі відокремленого потоку [1]. Рівняння, приведені нижче, розбиває падіння тиску на втрати із-за тертя і прискорення під час процесу кипіння

$$\Delta p = \Delta p_{fr} + \Delta p_{acc} = \int_0^z \frac{2f_o G \Phi_{la}}{D_b c_l} dz + \int_0^z G^2 \frac{dX}{dz} \left\{ \left[\frac{2X}{c_v \delta} - \frac{2(1-X)}{c_l \delta} \right] + \frac{d\delta}{dz} \left[\frac{(1-X)^2}{c_l (1-\delta)^2} - \frac{X^2}{c_v \delta^2} \right] \right\} dz, \quad (2)$$

де D_h [m] — гідравлічний діаметр каналу; f_o [—] — коефіцієнт тертя каналу, коли повна масова швидкість потоку відповідає рідині; f_l [—] — коефіцієнт тертя каналу, коли масова швидкість потоку відповідає рідині, $G(1-X)$; ρ_v [кг/м³] — густина парової фази; ρ_l [кг/м³] — густина рідкої фази.

Для членів рівняння (2), які не визначені вище, застосовується параметр Мартінееллі χ , який визначає градієнти тиску для потоку тільки рідини над градієнтом тиску потоку тільки пари

$$\chi^2 = (dp/dx)(dp/dx), \quad (3)$$

де p — локальний статичний тиск. Кореляція для α у рівнянні (2) для турбулентного потоку у великих трубах становить

$$\zeta = \left[1 + 0,28 \text{ч}^{0,71} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Значення Φ_{lo}^2 множника тертя двофазного потоку залежить від множника тертя потоку тільки рідини Φ_l^2 і локального масового паровмісту

$$\Phi_{lo}^2 = \Phi_l^2 \left(\frac{f_l}{f_{lo}} \right) (1 - X)^2, \quad (5)$$

Множник тертя для потоку тільки рідини задається кореляцією Мартинеллі-Нельсона як

$$\Phi_l^2 = 1 + \frac{C}{\text{ч}} + \frac{1}{\text{ч}^2}. \quad (6)$$

С в рівнянні (6) має члени, які залежать від режимів газової і рідкої фаз потоку, а саме 20: при рідина — турбулентна, газ — турбулентний; 12: при рідина — в'язка, газ — турбулентний; 5: при рідина — в'язка, газ — в'язкий. Лі [2, 3] запропонував проводити кореляцію коефіцієнта:

$$C = 0,06185 \text{Re}_o^{0,726} \quad (7)$$

для мікроканалів до $D_h \sim 0,8$ мм.

Термін «критичний тепловий потік», або КТП, є локальний тепловий потік, в якому температуру стінки неможливо підтримувати унаслідок зміни механізму теплопередачі від кипіння до конвекції пари.

Це призводить до утворення локалізованої ділянки місцевого перегріву. На рис. 1 показана типова крива кипіння, де тепловий потік відкладається по вертикальній осі, а різниця між температурами стінки T_w і насиченій рідині T_s — по горизонтальній. Менші значення діапазону різниці температур мають однофазна теплопередача і слабкі теплові потоки. Існує порогова різниця температур, за якої починається бульбашкове кипіння, а невелике збільшення цієї різниці може викликати значні теплові потоки, оскільки почнеться бульбашкове кипіння. КТП з'являється у тому випадку, коли різниця досягає точки, де швидкість теплообміну міняється від бульбашкового керованого потоку до локальної кризи тепловіддачі при висиханні, а опір газової фази починає переважати по відношенню до теплообміну. КТП може призвести до висихання стінки.

Результати КТП для великих гідравлічних діаметрів досить добре описані. КТП для насичених рідин, зазвичай, є функцією наступних чинників:

1. Швидкість потоку: КТП йде вгору (зростає), коли швидкість потоку збільшується для заданих умов вхідного каналу і геометрії.

2. Тиск: коли тиск збільшується, починаючи з тиску навколишнього середовища, то КТП зростає до локального максимуму і поступово зменшується при тиску, що збільшується.

3. Розмір каналу: КТП зростає при збільшенні розміру каналу;

4. Довжина каналу: довші канали приводять до нижчого КТП;

5. Сухість вологої пари: підвищена сухість пари X приводить до зменшення КТП.

Під час насиченого кипіння розмір каналу і сухість пари пов'язані з середнім тепловим потоком стінки. Таким чином, більший тепловий потік процесу швидко досягає локального КТП за рахунок вищої швидкості пароутворення і певної кількості накопиченої пари.

Показник кипіння, Bo — це тепловий потік, розмірність якого не визначається потоком маси і прихованою теплою паротворення

$$Bo = \frac{q''}{Gh_{fg}}. \quad (8)$$

Показник капіляра Ca — це співвідношення між силою внутрішнього тертя і силою поверхневого натягу

$$Ca = \frac{\mu G}{\rho \sigma}, \quad (9)$$

де: μ [кг/м·с] — в'язкість рідини; ρ [кг/м³] — густина рідини; σ [Н/м] — поверхневий натяг рідини.

Числом Вебера є співвідношення сил інерції до сил поверхневого натягу:

$$We = \frac{D_h G^2}{c\gamma}. \quad (10)$$

Оцінка критичного теплового потоку (КТП) для кипіння насиченого потоку досліджувалася для крупніших каналів, в порівнянні з мікроканалами. Одна з кореляцій узята в [4]

$$q''_{co1} = c_k G h_{fg} We_k^{-0,043} \left(\frac{L}{D_h} \right)^{-1},$$

$$q''_{co2} = 0,1 G h_{fg} \Gamma^{0,133} We_k^{-1/3} \left[\frac{1}{1 + 0,0031(L/D_h)} \right], \quad (11)$$

$$q''_{co3} = 0,098 G h_{fg} \Gamma^{0,133} We_k^{-0,433} \left[\frac{(L/D_h)^{0,27}}{1 + 0,0031(L/D_h)} \right],$$

$$\Gamma = \frac{c_v}{c_l}, \quad We_k = \frac{L G^2}{c_l \gamma},$$

$$c_k = 0,34 \text{ для } L/D_h > 150; \quad c_k = 0,25 + 0,009 \left[\frac{L}{D_h} - 50 \right] \text{ для } 50 \leq \frac{L}{D_h} \leq 150; \quad (12)$$

$$c_k = 0,25 \text{ для } L/D_h < 150;$$

We_k — ґрунтується на значеннях числа Вебера, з використанням масштабу значень для довжини каналу.

$$K_{k1} = \frac{1,043}{4c_k We_k^{-0,043}}, \quad K_{k2} = \frac{5,0,0124 + D_h/L}{6 \Gamma^{0,133} We_k^{-1/3}}. \quad (13)$$

Для $q''_{co1} < q''_{co2}$ тоді $q''_{co} = q''_{cd}$. Для $q''_{co1} > q''_{co2}$ и $q''_{co} = q''_{co2}$, коли $q''_{co2} < q''_{co3}$; $q''_{co} = q''_{co3}$, коли $q''_{co2} > q''_{co3}$. Для $K_{k1} > K_{k2}$: $K_k = K_{k1}$. Для $K_{k1} \leq K_{k2}$ і $K_k = K_{k2}$.

$$q''_{crit} = q''_{co} \frac{1 + K_k (h_{l,s} - h_{l,in})}{h_{fg}}. \quad (14)$$

Для кипіння насиченого потоку величина q''_{crit} дорівнює q''_{co} .

$$SR = \frac{Bo (T_{wall,max} - T_{sat}) D_h}{T_{sat} L}, \quad (15)$$

де Bo — показник кипіння, безрозмірна величина; $T_{wall,max}$ — максимальна температура стінки, що оточує ділянку кипіння, К; T_{sat} — температура насичення рідини за заданого тиску, К; D_h — гідравлічний діаметр каналу, в якому відбувається кипіння, мм; L — довжина каналу, впродовж якої відбувається кипіння, мм.

Показник SR визначається наступним чином:

Різниця між температурою стінки і температурою насичення визначається як надлишкова температура.

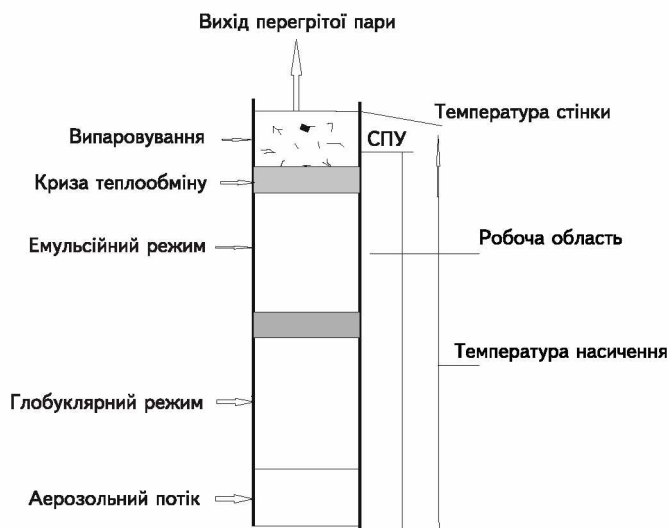


Рис. 2. Схема прикладів киплячого потоку в мікроканалі

Висновок. Визначений КТП для кипіння насиченого потоку для крупніших каналів, в порівнянні з мікроканалами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kandlikar S.G. Heat Transfer Mechanisms During Flow Boiling in Microchannels / S.G. Kandlikar // Transactions of the ASME. — 2004. — Vol 126. — P.340—347.
2. Lee M., Y.Y. Size and shape effects on two-phase flow patterns in microchannel forced convection boiling / Lee M., Y.Y., M. Wong, Y. Zohar // Journal of Micromechanics and Microengineering . — 2003. — 13. — P. 155—164.
3. Lee P.C. Bubble dynamics in microchannels. Part 1: single microchannel / Lee P.C., F.G. Tseng, Chin Pan // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2004. — 47. — P. 5575—5589 .
4. Katto Y. An improved version of the generalized correlation of critical heat flux for the forced convective boiling in uniformly heated vertical tube / Katto Y., H. Ohno // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 1984. — v.27, No. 9. — P. 1641—1648.

КИПЕНИЕ В МИКРО- И МАКРОКАНАЛАХ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

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, пузырьки, режимы кипения, тепловой поток