

## VAPORIZATION UNDER BOILING IN POROUS STRUCTURES

V. Kulichenko

National University of Food Technologies

D. Kaptanovsky

Cherkasy State technological University

---

**Key words:**

Boiling  
Heat exchange  
Large volume  
Porous structures  
Steam bubble  
Capillary and gravity forces  
Time of expectation and growth

---

**Article history:**

Received 20.03.2013  
Received in revised form  
13.05.2013  
Accepted 23.05.2013

---

**Corresponding author:**

E-mail:

npnuht@ukr.net

---

**ABSTRACT**

The dynamics of water vaporization process in porous structures has been studied. The research combines the mass effect and the capillary forces. From physical standpoint, it is the basis for the calculation of heat flow intensity, the heat transfer through the inside characteristics of liquid boiling process. Such theory includes some number of factors reflecting the surface structure (degree of roughness, vapor stage meniscus, surface orientation), which can be determined experimentally, and their impact on heat transmission. The formulas are obtained through the calculation of vaporization density centers and the diameters of vapor bubbles generation in porous structures.

## ПАРОУТВОРЕННЯ ПРИ КИПІННІ В ПОРИСТИХ СТРУКТУРАХ

**В.Р. Кулінченко, д-р техн. наук,**

*Національний університет харчових технологій*

**Д.В. Каптановський, інж.**

*Черкаський державний технологічний університет*

*Вивчена динаміка процесу випаровування води в пористих структурах. Дослідження комбінує ефект мас і капілярні сили. Фізично це основа для обчислення інтенсивності теплового потоку — передача тепла через приховані характеристики процесу кипіння рідини. Така теорія включає певну кількість чинників, які характеризують структуру поверхні (шорсткість, меніск парової фази, орієнтація поверхні) і її вплив на передачу тепла, і визначаються експериментально. Формули отримані підрахунком центрів пароутворення і діаметрів бульбашок пари зростаючих в пористих структурах.*

**Ключові слова:** кипіння, теплообмін, великий об'єм, пористі структури, парова бульбашка, капілярні і гравітаційні сили, час очікування і зростання.

Для кипіння рідини у великому об'ємі на технічній поверхні вважалось, що інтенсивність теплового потоку  $q$  від грючої стінки відбувалася за рахунок вільної конвекції від ділянок, не зайнятих паровими бульбашками, і шляхом перенесення теплоти в результаті виштовхування

паровими бульбашками порцій перегрітого шару рідини у верхні холодні шари. Тоді залежність інтенсивності теплового потоку буде  $q \sim \bar{F}\bar{D}\Delta t\bar{n}$ . Через величину щільності центрів пароутворення  $\bar{n}$  враховувався закон розподілу шорсткості поверхні [5]. Величина  $\bar{F}$  — аналог частоти відриву парової бульбашки у великому об'єммі,  $\bar{D}$  — відривний діаметр парових бульбашок;  $\Delta t$  — температурний напір.

У роботі [3] запропонована теорія теплообміну при кипінні у великому об'ємі на поверхні з природною шорсткістю, побудована на моделі мікросхарового випаровування. Основною причиною, що визначає випаровування рідини в парову бульбашку, що росте на поверхні теплообміну, є тепло, яке підводиться шляхом теплопровідності від поверхні нагріву через мікрошар рідини до її основи.

Подальшим розвитком [3] є робота [9], в якій на підставі схеми меніска рідкої плівки, що випаровується, на межі «сухої» плями оцінена товщина плівки порядку  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  м, співрозмірна з шаром адсорбованих молекул. Надходження рідини в зону інтенсивного випаровування відбувається за рахунок градієнта кривизни меніска рідкої плівки. Це дозволяє оцінити товщину плівки рідини під паровим включенням на межі меніска рідини (зони максимальної інтенсивності випаровування) —  $10^{-6} \dots 10^{-5}$  м і отримати розрахункове рівняння для визначення інтенсивності теплового потоку. Проте при розрахунках потрібно застосовувати ітераційну процедуру, а саме рівняння у цьому випадку має похибку  $\pm 35\%$ .

Визначення інтенсивності теплових потоків, що відводяться пористою системою, через внутрішні характеристики кипіння аналогічно [3, 5] показує, що описані моделі не придатні.

Відведення великих теплових потоків з поверхні, покритою сіткою, в порівнянні з поверхнею без покриття, автори [7] пояснили тим, що збільшення перегріву рідини в пристінному шарі приводило до збільшення частоти генерації парової фази, оскільки збільшувалася швидкість випаровування рідини і знижувалися відривні діаметри.

При кипінні рідин на поверхнях з нетеплопровідними покриттями [6] показали, що перегріву стінки досягають до 100 К, а для деяких покриттів встановлена залежність  $q \sim \Delta t^2$ . Пара покидала поверхню покриття у вигляді струменів, що складаються з дрібних бульбашок, через канали, що стабільно діють, регулярно розташовані по поверхні. Дано пояснення протиріч які мали місце в побудові механізму процесу теплообміну в пористих структурах різних авторів, коли обговорювалося яке середовище знаходилося біля стінки: рідина, пара чи пароводяна суміш. У роботі показано, що всі моделі не суперечать одна одній, а описують різні режими кипіння.

Динамічна модель теплообміну при кипінні на пористій поверхні, що містить зв'язані між собою внутрішні порожнини у формі майже прямокутних каналів і маленькі пори, що сполучають канали з об'ємом рідини, показала [8], що відношення потоку прихованого тепла, до повного теплового потоку для розвиненої поверхні в 2...5 разів більше, ніж для звичайної поверхні при питомому тепловому потоці  $10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. При великих теплових потоках це відношення зменшується. Відхилення деяких даних від розрахункових досягло 300%.

Досліджена пориста система охолодження відрізняється тим, що процеси тепло-масообміну протікали в умовах сумісної дії гравітаційних і капілярних сил.

Експериментальні дослідження виконувалися з визначенням інтегральних і термогідравлічних характеристик теплообміну, останні з яких визначалися оптичними методами із застосуванням голографічної інтерферометрії і швидкісної кінозйомки. Установки, методика і умови проведення дослідів приведені в [4].

Термогідравлічні характеристики процесу кипіння в сітчастих пористих структурах отримані для теплового потоку  $q = (2 \dots 20) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\Delta t = (1 \dots 30)$  К,  $m = m_p/m_n = opt$ , гідравлічний діаметр комірки — 0,14; 0,4 мм. Пориста структура виконувалася з нржавіючої сталеві сітки, поверхня нагріву — мідь, нржавіюча сталь, алунд, скло завтовшки 0,05...2 мм при зовнішньому діаметрі труби, рівному 21 мм. Під величиною  $m_p$  і  $m_n$  розуміються витрати рідини і пари.

Термічні (внутрішні) характеристики кипіння дозволяють розкрити механізм і описати фізичну картину в досліджуваних пористих структурах, що працюють в полі гравітаційних сил, і отримати розрахункові залежності для визначення теплового потоку, що відводиться [1].

При малих величинах  $q$  передача теплоти здійснюється за рахунок кондуктивного теплообміну і тим цікавіше, чим більше ефективна теплопровідність структури, змоченою рідиною, і теплопровідності корпусу. Течія рідини носить плавний характер і на її поверхні не спостерігаються бульбашки і пов'язані з ними збурюючі процеси. Рідина інтенсивно випаровується з менісків при малих надлишках охолоджувача і зі зростанням надлишку рідини починається випаровування з поверхні стікаючих плівок.

При деякому тепловому потоці, у разі зменшення параметра  $m$ , починається порушення плавної хвилястої течії плівки рідини, з'являються окремі парові бульбашки. Постійно діючими центрами генерації є декілька осередків структури. Початок закипання залежить від режимних і конструктивних параметрів і визначається величиною  $\Delta t_{п.з.}$ , якій відповідає тепловий потік  $q_{п.з.}$ . Зниження витрати рідини охолодження, або збільшення притоку теплоти, приводять до бурхливого зростання центрів пароутворення, число яких визначається залежністю:

$$\bar{n} = 5,89 \cdot 10^{-7} \left( \frac{r \rho_i \Delta t}{\sigma t_i} \right)^2 \bar{m}^{-0,1} \left[ 1 + \sqrt{\left( \frac{\lambda_{\delta}}{\lambda_{\text{ст}}} \right)^2 \frac{2 a_{\text{ст}} \tau_0}{\delta_0^2}} \right]^2, \quad (1)$$

де  $r$  — прихована теплота пароутворення;  $\rho_p$  — густина пари;  $\sigma$  — коефіцієнт поверхневого натягнення;  $t_n$  — температура насичення;  $\lambda_p$ ,  $\lambda_{\text{ст}}$  — коефіцієнт теплопровідності рідини і стінки;  $\tau_0$ ,  $\delta_0$  — час повного випаровування і початкова товщина плівки рідини.

Інтенсивність роботи кожного центру в початковому режимі кипіння неоднорідна, деякі зони поверхні нагріву ледь «прокидаються», і тільки починають діяти окремі центри. У разі збільшення витрати циркулюючого охолоджувача час «життя» окремих бульбашок зростає, а ряд активних комірок припиняє свою роботу, мають місце тривалі паузи, аж до виключення окремих центрів активної генерації. Збільшення надлишку рідини призводить інші активні центри генерації до «в'ялих» і «непрацездатних».

Зона перехідної ділянки до розвинутого бульбашкового кипіння невелика внаслідок високої швидкості зростання активно діючих центрів пароутворення. Подальше зростання теплового навантаження приводить до стійкої роботи великої кількості активних центрів, рівномірна їх кількість істотно вища, ніж при кипінні рідини у великому об'ємі (див. формулу 1). Скелет структури перешкоджає змиванню рідиною активних зародків із западин. Зростання бульбашки приводить до проникнення пари в інші пори і з'являється можливість народження нових активних парових зародків.

Над поверхнею рідини, що стікає по структурі, не спостерігаються куполи бульбашок, що має місце в тонкоплівкових випарниках. Парові бульбашки лопаються в межах товщини структури, сумірної з теплогідродинамічним двофазним шаром, з частотою, що визначається за формулою

$$\bar{F}^{-1} = \bar{\tau}_{\delta} = 0,0126 (R_0^2 a_{\delta} \text{Ja})^{-0,5} K_{\text{ст}}, \quad (2)$$

де  $\bar{R}$  — відривний (чи такий, що руйнується) радіус парової бульбашки становить

$$\bar{R}_0 = 0,5 \left[ \frac{\rho_{\delta}}{q(\rho_{\delta} - \rho_i)} \right]^{1/3} 0,35 \left( \frac{\sigma^2 T_i}{r \rho_{\delta} \rho_i \Delta t} \right)^{1/3} + \left( \frac{\lambda_{\delta} \Delta t}{r \rho_i} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

$\alpha_p$  — коефіцієнт температуропровідності рідини;  $Ja = \frac{C_{p,\delta} \rho_\delta (t_{co} - t_1)}{r \rho_l}$  — число Якоба;

$K_{co} = 1 + \left[ \frac{(\rho c \lambda)_\delta}{(\rho c \lambda)_{co}} \right]^{0,5}$  — коефіцієнт, що характеризує теплоакумулюючу здатність

стінки;  $C_{p,r}$  — ізобарна теплоємність рідини;  $\rho_p$  — густина рідини.

Величина  $\bar{F}$  як і щільність центрів пароутворення, істотно перевищує частоту при кипінні у великому об'ємі, і залежно від параметра надлишку рідини  $m$  може бути співрозмірна з частотою пароутворення в тонких киплячих плівках.

Подальше збільшення потоку теплоти приводить до зростання величин  $\bar{n}$  і  $\bar{F}$  (див. формулу 2) у кожному активному центрі. При деякому критичному паровмісті в об'ємі структури починається зростання температури поверхні теплообміну, і залежно від величини  $m$  криза кипіння носить в тому або іншому ступені затягнутий характер. Величини теплових потоків, відповідні розвиненому бульбашковому кипінню і кризовому стану, залежать від багатьох чинників і визначаються за голографічними інтерферограмами на яких концентрація смуг досягає найбільшої величини, аж до утворення замкнених інтерфераційних смужок.

Як видно з фотографічних, кінематографічних і голографічних спостережень динаміка парової фази після спонтанного (вибухоподібного) зародження бульбашки критичного розміру протікає за участю мікрошару рідини, що випаровується, знаходячись під паровою бульбашкою, а за деяких умов починається витіснення рідкої плівки в центр бульбашки з подальшим розвитком «сухої» плями. Відрив або руйнування бульбашок відбувається при діаметрах, у декілька разів менших, ніж при кипінні у великому об'ємі, а величина  $\bar{R}$  розраховується за формулою (2, 9).

Після відриву (руйнування) бульбашки активно підсмоктуються відносно холодні порції рідини під дією гравітаційних і капілярних сил. За деяким «очікуванням» центру генерації спонтанно виникає нова бульбашка критичного розміру, причому час зростання, керований витратою рідини (швидкістю потоку і ступенем його недогрівання), що охолоджує, зменшується і відбувається при інтенсивнішому підведенні теплоти від тонкого перегрітого шару рідини, що оточує бульбашку, з боку об'єму пористої структури. Несумірність часу «очікування» з періодом зростання також свідчить про постійно існуючий перегрітий пульсуючий мікрошар рідини, стійкість і стабільність якого при розширенні відбувається в результаті комбінованої дії сил.

### Висновки

1. Узагальнені дослідні дані з термогідрравлічних характеристик процесу кипіння в сітчастих пористих структурах, якими можна керувати за допомогою комбінованої дії гравітаційних і капілярних сил.

2. Отримані формули дозволяють вести розрахунки при проектуванні теплових енергоустановок.

### Література

1. Кулінченко В.Р., Осипенко В.І., Каптановський Д.В. Побудова математичної моделі процесу росту та схлопування парогазових бульбашок у рідині. Вісник Черкаського державного технологічного університету. №3, 2012. С. 55 – 59.

2. Кулінченко В.Р., Мирончук В.Г. Промышленная кристаллизация сахаристых веществ. — К.: НУПТ, 2012. — 426 с.

3. Лабунцов Д.А. Приближенная теория теплообмена при развитии пузырькового кипения. Известия АН СССР, Энергия и транспорт, № 1, 1963. — С. 58 – 71.

4. Поляев В.М., Генбач А.А. Скорость роста паровых пузырей в пористых структурах. Известия вузов. Машиностроение, № 10, 1990. — С. 56 – 61.

5. Розенов У.М. Теплообмен при кипении. Современные проблемы теплообмена. М.-Л.: Энергия, 1966. — 226 с.

6. Стырикович М.А., Мальшенко С.П. и др. Особенности кипения на поверхностях с нетеплопроводными пористыми покрытиями. ДАН СССР. Техническая физика. Т. 241, № 2, 1978. — С. 345 – 348.

7. Толубинский В.И., Антоненко В.А. и др. О механизме процесса кипения жидкости на затопленных поверхностях с сетчатым капиллярно-пористым покрытием. Промтеплотехника, № 3, 1984. — С. 3 – 11

8. Тонконогий А.В., Генбач А.А. Исследование процесса кипения жидкости в пористой структуре методом скоростной киносъёмки. Рабочие процессы и усовершенствование теплотехнических и электротехнических устройств. Сб тр. КазПТИ. Алма-Ата, 1983. — 35 с.

9. Ягов В.В. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении жидкостей. Теплоэнергетика, № 2, 1988. — С. 4 – 9.

## ПАРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ КИПЕНИИ В ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ

**В.Р. Кулинченко**

*Национальный университет пищевых технологий*

**Д.В. Каптановский**

*Черкасский государственный технологический университет*

*Изучена динамика процесса испарения воды в пористых структурах. Исследование комбинирует эффект масс и капиллярные силы. Физически это основа для вычисления интенсивности теплового потока — передача тепла через скрытые характеристики процесса кипения жидкости. Такая теория включает определенное количество факторов, которые характеризуют структуру поверхности (шероховатость, мениск паровой фазы, ориентацию поверхности) и ее влияние на передачу тепла, и определяются экспериментально. Формулы получены подсчетом центров парообразования и диаметров пузырьков, растущих в пористых структурах.*

**Ключевые слова:** кипение, теплообмен, большой объем, пористые структуры, паровой пузырек, капиллярные и гравитационные силы, время ожидания и роста.