УДК 536.423.1
DOI

ГІДРОДИНАМІКА ГАЗОРІДИННИХ ПОТОКІВ НА КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ СТРУКТУРАХ

Туз В.О.¹, д.т.н., Лебедь Н.Л.¹, Трокоз Я.Є.¹, к.т.н.

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Україна, Київ

Анотація. Перспективним напрямком підвищення енергоефективності і зменшення малогабаритних характеристик тепломасообмінного обладнання, яке використовується в хімічній, харчовій та ін. галузях є застосування методів, які забезпечують оптимізацію параметрів процесів в обладнанні.

Одним з основних принципів, покладених в основу проектування і експлуатації контактних тепломасообмінних апаратів, є забезпечення стабільності взаємодії плівки рідини і потоку газу або пари. Характер взаємодії визначається кризовими явищами, пов'язаними з порушенням режиму течії плівки при високих швидкостях газового потоку, що супроводжується інтенсивним уносом крапель і початком процесу захливання. Представлені результати дослідження показують, що використання капілярно-пористого покриття поверхні каналів контактних апаратів впливає на хвильові процеси в плівці і сприяє зниженню нижньої границі початку процесу захливання при певних умовах. Досліджено вплив геометричних характеристик покриття на інтенсивність процесів тепломасообміну в контактному апараті. Використання результатів експериментального дослідження гідродинаміки двофазного потоку в каналах з капілярно-пористим покриттям дозволило уточнити аналітичний розв'язок задачі по визначенню границь кризових явищ. Аналіз результатів дослідження показав, що початок процесу захливання настає при значно більшій товщині плівки, що є істотним позитивним моментом при експлуатації контактних тепломасообмінних апаратів.

Ключові слова: гідродинаміка, газорідинні потоки, плівка рідини, капілярно-пориста структура, процес захливання

HYDRODYNAMICS OF GAS-LIQUID FLOWS AT THE CAPILLARY-POROUS STRUCTURES

doctor of science V.O.Tuz¹, candidate of technical sciences N.L.Lebed¹, Ya.E.Trokoz

¹National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute" Ukraine, Kyiv

Abstract. A promising direction of increasing energy efficiency and reducing the mass and dimensions of heat and mass transfer equipment used in chemical, food and other industries are the application of methods that provide optimization of process parameters in the equipment. One of the main principles laid down in the design and operation of contact heat exchangers is to ensure the stability of the interaction of the liquid film and the flow of gas or steam. The nature of the interaction is determined by the crisis phenomena associated with the violation of the flow regime of the film at high velocities of the gas stream, which is accompanied by intense drift of droplets and the beginning of the break process.

The presented research results show that the use of capillary-porous coating of the surface of the channels of contact devices affects the wave processes in the film and contributes to lowering the lower boundary of the beginning of the break process under certain conditions.

The influence of the geometrical characteristics of the coating on the intensity of the processes of heat and mass transfer in the contact apparatus is investigated. Using the results of an experimental study of the hydrodynamics of a two-phase flow in channels with a capillary-porous coating allowed to clarify the analytical solution of the problem of determining the boundaries of crisis phenomena. Geometrical characteristics of the coating of the heat-exchange surface, significantly affect the interaction of the contact surface and the film of the working fluid and the intensity of the processes of heat and mass transfer in the contact apparatus.

Analysis of the presented results shows that in the temperature range in which conducted the studies, the intensity of the evaporation of the fluid increases with an enlarged cell size from 10^{-4} m to $5 \cdot 10^{-4}$ m. With an increase in the size of the cell from 10^{-4} m to $6,3 \cdot 10^{-4}$ m, the intensity of the evaporation of the liquid is somewhat reduced due to the fact that the work of adhesion forces are not enough to hold thin films for a long time in large cells until their full evaporation. Analysis of the results of the study showed that the beginning of the break process occurs at a much greater thickness of the film, which is a significant positive moment in the operation of contact heat and mass transfer devices.

Keywords: hydrodynamics, gas-liquid flows, liquid film, capillary-porous structure, chocking boundary

Умовні позначення			
g	прискорення вільного падіння, м/с;	τ	- дотичне напруження, Па.
I	інтенсивність випаровування, кг/м ² ·с;	Числа подібності	
p	тиск, Па;	$Bo = \frac{d}{(\sigma / (g (\rho_p - \rho_f)))}$	число Бонда;
R	радіус, м;		
t	температура, °С;	$K_w = \frac{w_{кр}'' \cdot \rho_f^{0.5}}{(\sigma \cdot g (\rho - \rho_f))^{0.5}}$	критерій стійкості.
u, w	швидкість рідини, газу відповідно, м/с;		
x, y	координати, м;	Індекси	
ξ	коефіцієнт опору;	г	газ;
δ	товщина плівки, м;	p	- рідина;
λ	довжина хвилі, м;	кр	критичне значення;
ν	кінематичний коефіцієнт в'язкості, м ² /с;	"	вихідне (кінцеве) значення;
ρ	густина, кг/м ³ ;	з	капілярно-пориста структура
σ	коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;	о	- середнє значення.

Вступ. У хімічній, харчовій та ін. галузях набули широкого застосування тепломасообмінні апарати контактної типу, які мають певні переваги над іншими конструкціями теплообмінного обладнання: велике значення питомої поверхні контакту в одиниці об'єму, мінімальний термічний опір процесу тепломасообміну. Але діапазон їх роботи обмежується кризовими явищами гідродинамічного характеру. Верхня границя пов'язана з явищем захливання, яке виникає при протитоковому русі висхідного потоку газу і гравітаційно стікаючої плівки. Нижня границя обумовлена порушенням суцільності течії плівки при зменшенні густини зрошення, що призводить до утворення сухих плям, наявність яких зменшує дійсну площу контакту взаємодіючих фаз. Перспективним напрямом підвищення енергоефективності і зменшення масогабаритних характеристик тепломасообмінного обладнання є застосування методів, які забезпечують оптимізацію параметрів процесів в обладнанні.

Перспективним методом пасивної інтенсифікації процесів тепломасообміну у газорідних системах є використання поверхонь контакту з капілярно-пористим покриттям стінок каналу. Такий метод дозволяє штучно турбулізувати плівку рідини і, тим самим, інтенсифікувати процес тепломасообміну. З іншої сторони, капілярно-пориста структура сприяє більш ранньому розвитку хвильового руху плівки, що може обмежувати величину верхньої границі швидкості газу, при якій виникає процес захливання, у випадку затоплення структури поверхні. Особливістю капілярно-пористих структур є створення умов руху рідини в межах структури. Дія капілярних сил стабілізує рух рідини при певних густинах зрошення. Цей ефект доцільно використовувати для розширення робочого діапазону параметрів тепломасообмінних апаратів.

Формулювання задачі і аналіз літературних джерел. Процес взаємодії плівки рідини з газовим потоком досліджувався у роботі [1]. Дія потоку газу на вільну поверхню плівки враховувалася на підставі допущення про пропорційність дотичної напруги на цій поверхні величині відхилення поперечної координати хвильової поверхні щодо середнього значення товщини плівки рідини.

Необхідною умовою ефективності роботи апарату контактної типу, що має певну гідравлічну схему, є забезпечення взаємодії потоків в діапазоні зміни їх робочих параметрів, в межах яких реалізується сталий рух плівки рідини.

Дослідженню процесів, при яких відбувається порушення сталості руху двофазної системи «плівка рідини - потік газу» у вертикальних каналах, присвячена велика кількість аналітичних і експериментальних робіт [2-4]. При висхідному русі газу можливе існування наступних режимів течії плівки: низхідного (під дією сил гравітації), висхідного (під дією потоку газу) і режим захливання. Режим захливання спостерігається в певному діапазоні співвідношень витрат рідкої і газової фаз. Він супроводжується порушенням гідродинамічної стійкості поверхні розділу фаз, інтенсивним краплинним винесенням, зникненням кільцевого режиму течії з переходом у барботажний. Критичне значення швидкості газового потоку, яке відповідає початку режиму захливання, залежить від витрати рідини в плівці (фактично від її товщини), режиму течії, частоти і амплітуди хвиль, дотичної напруги на зовнішній поверхні плівки, а також від теплофізичних властивостей рідини і газу.

Залежність, що дозволяє визначити критичну швидкість газу, має вид

$$w_{0кр}'' = 2,52 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho'' \cdot R} \right)^{0.5}. \quad (1)$$

Отримана залежність, як наголошувалося у [3], мала істотні розбіжності з експериментальними результатами.

Гідродинамічна криза захливання двофазної системи досліджувалася в роботі [3] на основі нелінійної теорії руху хвильової плівки спільно з газовим потоком. Математичний опис процесу взаємодії контактуючих фаз був істотно спрощений, в результаті область застосування даної моделі значно скоротилася. Отримане в результаті досліджень значення критерія стійкості $K_w = 3,3$ задовільно узгоджується з верхньою границею процесу захливання, визначеною у роботах [3, 4].

Аналітичне дослідження стійкості системи «плівка рідини – газовий потік» на основі класичної роботи [1] стосовно двофазних термосифонів розглянуто в [3].

Проведений аналіз гравітаційного руху плівки рідини середньої товщини δ_0 у вертикальному каналі круглого перетину радіусом R , по якому рухається вгору потік газу. Радіус каналу R значно більше середньої товщини плівки δ_0 . В цьому випадку впливом кривизни каналу на гідродинаміку гравітаційно стікаючої плівки можна знехтувати. В результаті, для опису гідродинаміки даного процесу застосовується система, яка складається з диференціальних рівнянь руху і нерозривності для рідкої і газової фаз.

Складність розв'язку сформульованої математичної моделі у виді системи диференціальних рівнянь з відповідними граничними умовами полягає у тому, що функціональна залежність для границі розділу фаз невідома. Для рівняння поверхні розділу у виді хвильової функції, яка задовольняє умовам взаємодії рідини і газового потоку на границі фаз, необхідно визначити частоту хвиль. Припускається також, що дотична і нормальна складові напруження на поверхні плівки рідини зі сторони газу можуть бути виражені залежністю через відхилення поверхні розділу фаз від площини $\delta = \delta_0$, що відповідає поверхні плівки рідини, яка незбурена хвилями. При таких допущеннях розв'язок зводиться до розгляду руху плівки рідини при заданих граничних умовах на стінці каналу і на вільній поверхні.

Аналізуючи експериментальні дослідження [1-3] з визначення характеристик хвильового руху гравітаційно стікаючих плівок рідини і враховуючи незначну товщину плівки, можна нехтувати інерційними членами диференціального рівняння руху. За прийнятих допущень, для опису руху плівки рідини маємо наступну систему рівнянь і відповідних граничних умов:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial x} + v_p \nabla^2 u_x - g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial x} + v_p \nabla^2 u_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

$$u_x|_{y=0} = u_y|_{y=0} = 0; \quad (5)$$

$$\tau_p|_{y=y_i} = \tau_r|_{y=y_i}, \quad (6)$$

$$p_p|_{y=y_i} - p_r|_{y=y_i} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (7)$$

Аналітичне розв'язання системи диференціальних рівнянь (2)-(5) при граничних умовах (6)-(7) можливо для одновимірного руху плівки і періодичних відхилень швидкостей і тиску внаслідок її хвильового руху.

На підставі аналізу результатів розв'язання системи (2)-(5) з урахуванням експериментальних значень параметрів хвиль, представлених в [1], зроблено припущення, що на практиці реалізуються граничні хвильові режими.

Отримана з цієї умови залежність довжини хвилі від швидкості газу експериментально підтверджена в [4]. В результаті отримано, що у момент втрати стійкості хвильового руху плівки критична швидкість газу відповідає значенню критичної довжини хвилі:

$$w_{гкр} = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \left(\frac{\sigma \cdot R}{2 \cdot \rho_r} \right)^{0,5}, \quad (8)$$

або у безрозмірному виді

$$K = \pi \cdot Bo^{0,5} \frac{\delta}{\lambda_{кр}}. \quad (9)$$

Швидкість рідини u_0 на поверхні плівки може бути визначена на підставі рішення, отриманого в роботі [2] при $\delta = \delta_0$:

$$u_0 = \frac{\tau_0}{\mu_p} \cdot \delta_0 - \frac{\rho_p \cdot g - \Psi}{2 \cdot \mu_p} \delta_0^2. \quad (10)$$

Гradient тиску вздовж газового потоку визначається через дотичну напругу τ_0 на поверхні плівки

$$\psi = \frac{4 \cdot \tau_0}{d}, \quad (11)$$

де $d = 2 \cdot (R - \delta_0)$ – переріз для проходу газу.

Аналіз результатів [1] показав, що стійкий хвильовий рух спостерігається лише в області малих значень безрозмірної товщини плівки коли кожному значенню безрозмірної товщини плівки відповідає два значення критичної довжини хвилі $\lambda_{кр}/\delta_0$: більше – відповідає початку появи хвиль на гладкій поверхні, а менше – малим довжинам хвиль і характеризує втрату стійкості хвильового руху при збільшенні швидкості газового потоку. В останньому випадку зростає амплітуда хвиль, що приводить до порушення стійкості течії і відриву крапель рідини з гребенів хвиль. Цей режим відповідає нижній границі процесу захлинання. Початок цього режиму характеризується різким збільшенням опору, що підтверджується роботами [5, 6]. Функціонально границі режиму захлинання можна представити у вигляді залежності критичної довжини хвилі від безрозмірної товщини плівки і безрозмірної дотичної напруги на границі «рідина – газ»

$$\frac{\lambda_{кр}}{\delta_0} = f \left(\frac{\tau_0}{\rho_p \cdot g \cdot \delta_0}; \frac{\delta_0}{d} \right). \quad (12)$$

Як встановлено в результаті аналізу [3], порушення хвильової течії, досягнувши граничної товщини плівки рідини, характеризується постійним значенням відносної довжини хвилі. Таким чином, критерій стійкості хвильового руху визначається виразом (9) і може бути розрахований за допомогою співвідношення

$$K_w = \frac{\pi \cdot Bo^{0.5}}{\left[986 \cdot \gamma^2 \cdot \left(\frac{\delta_0}{\delta_n} \right)^2 + 0,962 \cdot Bo \right]^{0.5}}. \quad (13)$$

Подальший розвиток кризових явищ, внаслідок збільшення швидкості газу і товщини плівки, супроводжується утворенням хвиль великої амплітуди, зривом крапель рідини з гребенів і зменшенням швидкості руху плівки рідини. Цей режим характеризується підвисанням плівки рідини. Внаслідок складного характеру течії, що супроводжується зникненням чіткої границі між рідкою і газоподібною фазами, на даний час аналітичне дослідження кількісної характеристики даного процесу не може бути виконане.

Використання методів пасивної інтенсифікації у вигляді поверхонь з капілярно-пористим покриттям в контактних апаратах істотно ускладнюють гідродинамічну картину взаємодії системи «поверхня – плівка рідини – газовий потік». Іntenсифікуючи процеси тепло- і масообміну, штучна шорсткість зменшує робочий діапазон контактних апаратів, шляхом зниження границі захлинання [7].

Дослідження гідродинаміки газорідних потоків в каналах проведено в роботах [8, 9], зводилося до визначення нижньої границі захлинання, величина якої в основному залежала від конструктивних особливостей поверхонь теплообміну контактного апарату. Використання залежностей для визначення товщини плівки рідини на вертикальній гладкій поверхні, стосовно поверхонь з регулярно шорсткістю, або з капілярно-пористим покриттям не коректно і вимагає відповідного дослідження.

Таким чином, гідродинамічній кризі, яка пов'язана з досягненням граничної товщини плівки рідини, що обмежена початком крапельного виносу і характеризується мінімальним коефіцієнтом опору $\xi_{оп}$, відповідає вираз (13). Невідомий в цьому рівнянні коефіцієнт γ , на підставі експериментальних даних по дослідженню гідродинаміки двофазних кільцевих потоків в каналах з гладкими стінками [5] визначається як:

$$\gamma = \frac{(\pi^2 \cdot Bo - 0,962 \cdot Bo \cdot K_w^2)^{0.5}}{31,4 \cdot \left(\frac{\delta_0}{\delta} \right) \cdot K_w}. \quad (14)$$

Результати експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження по визначенню товщини плівки на вертикальній стінці з капілярно-пористим покриттям залежно від густини зрошування дозволило виділити декілька характерних областей, границі яких визначалися не тільки взаємодією плівки і газу з урахуванням сил інерції і в'язкості, але і капілярними силами.

Для ламінарного режиму течії плівки було виявлено чотири області (рис.1). Область I відповідала руху плівки при затопленому капілярно-пористому покритті. Слід зазначити, що характер зміни товщини плівки в I області ідентичний зміні при її течії по гладкій поверхні з урахуванням геометричних характеристик капілярно-пористого покриття. Область II характеризується практично автомодельністю товщини плівки від густини зрошування. Подальше зменшення густини зрошування приводить до стрибкоподібної зміни товщини плівки, що дозволяє виділити цей ефект в область III. В області IV спостерігається квазістабільний режим течії. Нижня границя області IV визначається початком процесу розриву плівки.

Рис. 1 - Характерні стадії гравітаційної течії рідини у вертикальних каналах із капілярно-пористим покриттям

Виконані дослідження показали, що при використанні капілярно-пористих матеріалів при певних густинах зрошення, коли товщина плівки не перевищує товщини капілярно-пористого покриття, граничне значення швидкості газового потоку збільшується у 2-3 рази [10]. З іншої сторони, враховуючи особливості експлуатації тепломасообмінних апаратів контактного типу достатньо складно досягти значень товщини плівки менше 10^{-4} м.

На процес формування плівки впливають тип зрошувального пристрою і виникнення капілярних сил в структурі покриття. Вплив наведених факторів значно ускладнює гідродинаміку плівкової течії. Для капілярних сил в значній мірі залежить від теплофізичних властивостей рідини, крайового кута змочування, поверхневого натягу і геометрії капілярно-пористої структури. Були проведені дослідження по визначенню впливу геометричних характеристик покриття на інтенсивність процесів тепломасообміну двофазних газорідинних систем в каналах з капілярно-пористою структурою.

Геометричні характеристики покриття теплообмінної поверхні, суттєво впливають на адгезійну взаємодію поверхні контакту і плівки робочої рідини, а отже і на інтенсивність процесів тепломасообміну в контактному апараті.

Результати дослідження впливу на інтенсивність випаровування плівки робочої рідини геометричних характеристик капілярно-пористого покриття, а саме розміру чарунки, при швидкості газового потоку 10 м/с представлено на рис.2.

Аналіз представлених результатів показує, що у діапазоні температур, в якому проводились дослідження, інтенсивність випаровування рідини I зростає при збільшенні розміру чарунки S від 10^{-4} м до $5 \cdot 10^{-4}$ м. При збільшенні розміру чарунки від $5 \cdot 10^{-4}$ м до $6,3 \cdot 10^{-4}$ м інтенсивність випаровування рідини дещо знижується, в наслідок того, що роботи сил адгезії не вистачає на утримання тонких плівок довгий час у великих чарунках до їх повного випаровування. Зростання інтенсивності випаровування здійснюється також за рахунок турбулізації плівки рідини.

Враховуючи експериментальні дані по дослідженню гідродинаміки плівки рідини на вертикальній поверхні з капілярно-пористим покриттям [10], при визначенні коефіцієнта γ , згідно (14), необхідно замість δ_0 для області I використовувати

$$\delta' = \delta_0 - \delta_3. \quad (15)$$

Отриманий результат добре узгоджується з результатами, наведеними у [3].

Таким чином, аналітичне рішення задачі з визначення границь кризових явищ, отримане в [3], з урахуванням результатів експериментального дослідження гідродинаміки двофазного потоку в каналах з капілярно-пористим покриттям, при відповідних граничних умовах, дозволяє визначати верхній діапазон навантажень до початку захлинання по рідкій і газовій фазах в контактних тепломасообмінних апаратах.

Температура на вході у робочу камеру: 1 – 42 °С; 2 – 55 °С; 3 – 77 °С; 4 – 96 °С; 5 – 115 °С; 6 – 152 °С

Рис. 2. Інтенсивність випаровування рідини з капілярно-пористого покриття в залежності від геометричних параметрів

При цьому, початок процесу захлинання настає при значно більшій товщині плівки, що є істотною позитивною характеристикою при експлуатації тепломасообмінних апаратів контактного типу.

Висновки.

1. Наявність капілярно-пористого покриття на поверхні каналів, яке за певних умов, приводить до інтенсифікації хвильових процесів в плівці і, тим самим, зниженню нижньої границі початку процесу захлинання.

2. Аналіз результатів дослідження процесів формування плівки на капілярно-пористій поверхні дозволив визначити геометричні характеристики покриття, які забезпечують високу інтенсивність процесів тепломасообміну в контактному апараті.

3. Аналітичний розв'язок задачі по визначенню границь кризових явищ, отримане в [3], було уточнено з використанням результатів експериментального дослідження гідродинаміки двофазного потоку в каналах з капілярно-пористим покриттям. Дослідження показали, що початок процесу захлинання настає при значно більшій товщині плівки, що є істотним позитивним моментом при експлуатації контактних тепломасообмінних апаратів.

References

1. Semenov, P.A. (1950) The flow of liquid in thin layers (II). Journal of Theoretical Physics. 20(8). 980-990.
2. Kapitsa, P.L. (1948) Wave flow of thin layers of viscous fluid. Journal of Experimental Thermal Physics. 18(1). 3-28.
3. Bezrodny, M.K., Pioro, I.L., Kostyuk, T.O. (2003) Transfer processes in two-phase thermosyphon systems. Kyiv: Fakt, 480.
4. Sorokin, Yu.L., Kirdyashkin, A.G., Pokusaev, B.G. (1965) Investigation of the film regime stability of fluid flow in a vertical tube with upward gas movement. Journal of Chemical and Petroleum Engineering. 5, 35-38.
5. Bezrodny, M.K., Alabovsky, A.N., Volkov, S.S. (1980) Investigation of the hydrodynamic characteristics of a two-phase flow in a closed thermosyphon. Proceedings of the USSR universities. Series Energetics. 7, 116-121.
6. Bezrodny, M.K. (1980) On the choking mode in a countercurrent flow of a film of liquid and gas flow in vertical tubes. Journal of Chemical and Petroleum Engineering. 5, 30-32.
7. Kirillov, V.Kh. (2002) Hydrodynamics and heat and mass transfer in two-phase flows of film apparatuses for refrigeration equipment. Doct. Diss author's abstract. Odessa, , 48 .
8. Nikolaev, N.A., Kharin, V.F. (1974) Hydrodynamic regularities of the film flow of a liquid on a rough surface. Proceedings of the USSR universities. Series Theoretical foundations of chemical technology. 8(5), 712.
9. Kholpanov, L.P. (1997) Hydrodynamic and mass transfer in active hydrodynamic regimes. Journal of Chemical and Petroleum Engineering. 2, 1-7.
10. Tuz, V.O., Lebed, N.L. (2018) Hydrodynamics and heat and mass transfer of gas-liquid flows at the capillary-porous structures: monograph. Kharkiv: FOP Brovin O.V., 220.

Отримано в редакцію 08.04.2019

Прийнято до друку 16.06.2018

Received 08.04.2019

Approved 16.06.2018