

УДК 536.423.1

## ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОДИНАМІКИ ДВОФАЗНИХ СИСТЕМ НА ВЕРТИКАЛЬНИХ ПОВЕРХНЯХ

Д. т. н. В. О. Туз, к. т. н. Н. Л. Лебедь, Я. Є. Трокоз, І. К. Лебедь

НТУУ «Київський політехнічний інститут»

Україна, м. Київ

valeriituz56@gmail.com, nata.lebeddom@gmail.com, yar\_t@ukr.net

*Використання результатів експериментального дослідження гідродинаміки двофазного потоку в каналах з сітчастим покриттям дозволило уточнити аналітичне рішення задачі визначення меж кризових явищ. Дослідження показали, що початок процесу захливання настає при значно більшій товщині плівки, що є істотним позитивним моментом при експлуатації контактних тепломасообмінних апаратів.*

*Ключові слова: гравітаційний рух плівки рідини, сітчасте покриття, густина зрошення.*

У продовження наших попередніх робіт по вивченню процесів тепло- та масообміну при охолодженні експериментально досліджено гідродинаміку двофазних систем в каналах з сітчастим покриттям. Метою роботи було визначення діапазону взаємодіючих фаз, який пов'язаний з кризовими явищами (захливання і інверсія плівки рідини).

Складність фізичної моделі взаємодії гравітаційно стікаючої плівки з потоком газу, вплив конструктивних особливостей поверхонь, урахування теплофізичних властивостей і режимних параметрів контактуючих фаз приводять до необхідності свідомо спрощувати аналітичні моделі. Аналіз отриманих рішень [1, 2] дозволив зробити висновок про те, що нестійкість руху плівки рідини і потоку газу спостерігається в певному діапазоні швидкості газу. Нижня границя цього діапазону відповідає виникненню режиму захливання, а верхня – стійкому висхідному руху фаз.

Розглянемо гравітаційний рух плівки рідини середньої товщини  $\delta_0$  у вертикальному каналі круглого перетину радіусом  $R$ , по якому рухається вгору потік пари або газу. Задаючи рівняння поверхні розділу у вигляді хвильової функції, яка задовольняє даній системі диференціальних рівнянь і граничним умовам, необхідно визначити частоту хвиль. Допускається також, що дотична і нормальна складові напруги з боку газу на поверхні плівки рідини можуть бути виражені залежністю через відхилення поверхні розділу фаз від площини  $\delta = \delta_0$ , що відповідає поверхні незбуреної хвилями плівки рідини. При таких допущеннях завдання зводиться до розгляду руху плівки рідини при заданих граничних умовах на стінці каналу і на вільній поверхні. Аналіз показав, що стійкий хвильовий рух можливий лише в області малих значень безрозмірної товщини плівки, де кожному значенню безрозмірної товщини плівки відповідає два значення критичної довжини хвилі  $\lambda_{кр}/\delta_0$ . Більше значення відповідає початку появи хвиль на гладкій поверхні, а менше – малим довжинам хвиль і характеризує втрату стійкості хвильового руху при збільшенні швидкості газового потоку. В цьому випадку зростає амплітуда хвиль, що приводить до порушення стійкості течії і відриву крапель рідини з гребенів хвиль. Цей режим відповідає нижній границі процесу захливання. Фіксація початку цього режиму можлива за різким збільшенням опору, що підтверджується роботами [1–3]. Функціонально границі режиму захливання можна представити у вигляді залежності критичної довжини хвилі від безрозмірної товщини плівки і безрозмірної дотичної напруги на границі «рідина – газ».

Як встановлено в результаті теоретичного аналізу [1], порушення хвильової течії характеризується постійним значенням відносної довжини хвилі.

Підвищення навантаження з боку газу приводить до того, що пінний режим переходить в снрядний, а потім в кільцевий, при якому відбувається інверсія плівки рідини, тобто вона починає рухатися вгору. Дане кризове явище визначає верхню границю захливання висхідного потоку газу і граві-

таційно стікаючої плівки рідини. В результаті узагальнення експериментальних даних було встановлено, що для верхньої границі процесу захлинання інверсія плівки не залежить від витрати рідини і числа Во ( $Bo = d/\sqrt{\sigma/(g(\rho_p - \rho_r))}$ ), при цьому критерій стійкості приймає постійне значення 3,2.

Використання методів пасивної інтенсифікації у вигляді шорстких поверхонь з пористими або сітчастими покриттями в контактних апаратах істотно ускладнює гідродинамічну картину взаємодії системи «поверхня – плівка рідини – газовий потік». Інтенсифікуючі процеси тепло- і масообміну, штучна шорсткість зменшує робочий діапазон контактних апаратів шляхом зниження границі захлинання.

При експериментальному дослідженні гідродинаміки гравітаційної плівки рідини при висхідному русі газового потоку в каналі з сітковим покриттям стінок була отримана карта режимів. В залежності від густини зрошення течія плівки має характерні особливості. Найбільш цікавим, з точки зору розширення діапазону роботи контактних апаратів, є режим, при якому плівка рідини не виходить за межі сітчастого покриття і характеризується відносно стабільною товщиною плівки. Зростання густини зрошення не приводить до значної зміни її товщини. В цій області домінують сили поверхневого натягу, які утримують плівку в структурі сітчастого покриття. Діапазон зміни товщини плівки для цієї області характеризується початком появи верхньої частини дроту в місці їх переплетіння і товщиною плівки в центрі меніска, утвореного рідиною між дротами вічка сітки. Безрозмірна товщина плівки на початку області ( $\delta^* = \delta/\sqrt[3]{(v^2/g)}$ ) визначається залежністю  $\delta^*_{II} = 147,68 \cdot Fr^{0,27} \cdot Bo^{0,5} \cdot (1 - \cos\theta)$ , де  $Fr$  — число Фруда, визначається як  $Fr = Q_m / [\delta \cdot (g \cdot \delta)^{0,5}]$ ;  $Q_m$  — об'ємна густина зрошення;  $\delta$  — середня товщина плівки;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $\sigma, \rho, \theta$  — сила поверхневого натягу, густина рідини та крайовий кут змочування, відповідно.

Як зазначалось вище, гідродинамічна криза, яка пов'язана з досягненням граничної товщини плівки рідини і обмежена початком процесу краплеуносу, характеризується мінімальним коефіцієнтом опору  $\xi_{оп}$ .

Таким чином, дослідження моделі взаємодії в кільцевих двофазних системах і визначення умов збереження стійкості плівкової течії при протитечійному русі газу і рідини у вертикальних каналах з сітчастим покриттям з використанням рівнянь Нав'є-Стокса і нерозривності для рідини і газу підтвердило, що причини кризи, пов'язаної з втратою стійкості хвильового руху при затопленій сітчастій структурі, аналогічні процесам, що відбуваються в каналах з гладкими стінками. Слід зазначити також, що наявність пористого або сітчастого покриття на поверхні каналів, яке можна розглядати в якості регулярної шорсткості, приводить, за певних умов, до стабілізації хвильових процесів в плівці і, тим самим, до підвищення нижньої границі початку процесу захлинання.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Безродный М. К., Пиоро И. Л., Костюк Т. О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах.— Киев: Факт, 2003.
2. Безродный М. К., Письменный Е. Н., Туз В. Е., Лебедь Н. Л. Экспериментальное исследование гидродинамики плёночного течения в каналах с сеточным покрытием // Промышленная теплотехника.— 2009.— Т. 31, № 7.— С. 139—143.
3. Сорокин Ю.Л. Об условиях устойчивости некоторых режимов движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах/ Ю.Л.Сорокин // Журн. прикл. и техн. физики.— 1963.— № 6.— С. 150—165.

V. E. Tuz, N. L. Lebed, Y. E. Trokoz, I. K. Lebed

#### Hydrodynamics features of two-phase systems on vertical surfaces

Using the results of experimental research of two-phase flow hydrodynamics in channels with mesh covering allowed specifying analytical solution defining the boundaries of the crisis. Research has shown that the beginning of the flooding process comes at a much greater thickness of the film, which is a significant positive aspect in the operation of contact heat and mass transfer devices.

Keywords: *gravitational movement of the liquid film, mesh coating, irrigation density.*