

УДК 664.002.5

С.М. ВАСИЛЕНКО, кандидат технічних наук

В.І. БОНДАР

А.В. ФОРСЮК, кандидат технічних наук

Національний університет харчових технологій

ГІДРОДИНАМІКА ПАРОРІДИННИХ ТЕЧІЙ У ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИХ АПАРАТАХ

Найбільш достовірним і фізично обґрунтованим методом розрахунку плівкових теплообмінних апаратів є математичне моделювання процесів перенесення імпульсу та енергії в їхніх елементах, у т.ч. в парорідинних кільцевих течіях всередині випарних труб.

Основою математичної моделі є диференціальні рівняння перенесення кількості руху та енергії в плівці, а також відповідні гідродинамічні та теплові граничні умови. До гідродинамічних граничних умов входять: граничні умови першого роду, які визначають відносну швидкість рідини на межі з твердою поверхнею згідно з умовою “прилипання”, що дорівнює нулю; граничні умови другого роду, які задають значення дотичного напруження на поверхні поділу рідина – пара. Аналітичний розрахунок міжфазного дотичного напруження, внаслідок складності фізичної картини процесу, на сьогодні провести неможливо. Це пов'язано насамперед з тим, що інтенсивність і характер міжфазної взаємодії визначаються складною нерегулярною хвильовою структурою на поверхні плівки. Відповідно основним методом його визначення є експериментальні дослідження.

На кафедрі промислової теплоенергетики НУХТ проведено експериментальні дослідження процесу випарювання яблучних соків з поверхні

© С.М. Василенко, В.І. Бондар, А.В. Форсюк, 2002

плівки, що стікала по внутрішній поверхні вертикальної труби 3 м завдовжки та внутрішнім діаметром 0,028 м; тиск вторинної пари змінювався в межах 0,03...0,07 МПа; швидкість пари – 0...60 м/с; плівкове число Рейнольдса – 200...1400; масова частка сухих речовин – 10...60%. В дослідях вимірювався перепад тисків вторинної пари на вході та виході труби, а також зміна температури вторинної пари по довжині труби. Зміна витратних характеристик парогазової суміші визначалася з теплових балансів окремих ділянок дослідної труби 0,5 м завдовжки кожна. Осереднені по довжині окремих ділянок значення параметрів вважалися умовно постійними (дискретно-локальними).

При обробленні результатів експериментальних досліджень внаслідок неможливості формування відповідної аналітичної задачі руху єдиним дієвим інструментом теорії подібності залишається аналіз розмірностей. Але при цьому перед дослідником постає складне завдання визначення такої множини факторів та параметрів течії, які б дали змогу отримати універсальну систему безрозмірнісних комплексів для узагальнення дослідних даних.

Більшість дослідників безрозмірнісним параметром, що визначається, беруть так званий зведений коефіцієнт гідравлічного опору парового ядра (f_{ia}). Основна ж різниця методик подання результатів експериментальних досліджень полягає в способі вибору системи визначальних чисел подібності.

Найбільш очевидною та поширеною є система визначальних чисел подібності, що включають витратні характеристики фаз (табл. 1). Розрахунок за методиками різних авторів, що на ній базуються, свідчить про їх якісну відповідність та дає змогу виділити три ділянки з характерним впливом взаємодії фаз на зведений коефіцієнт гідравлічного опору. По-перше, *режим слабкої взаємодії фаз*, коли плівка слабо впливає на течію газового ядра, тому коефіцієнти гідравлічного опору близькі до розрахованих для течії в сухій гідравлічно гладкій трубі. В *режимі помірної інтенсивності взаємодії фаз* із зростанням швидкості парового ядра зростає коефіцієнт гідравлічного опору.

Це зумовлюється зміною хвильової структури на поверхні плівки рідини, збільшенням амплітуди хвиль та, відповідно, зростанням шорсткості міжфазної поверхні [1]. В режимі сильної інтенсивності взаємодії фаз значне дотичне напруження призводить до руйнування гребенів хвиль, зменшення їх максимальної висоти, подальшого змінення хвильової структури та, як наслідок, до зменшення коефіцієнта гідравлічного опору із зростанням швидкості газу.

Таблиця 1

**Співвідношення для розрахунку f_{ia}
на ділянках помірної 1 та сильної 2 інтенсивностей взаємодії фаз**

Ділянка	Залежність	Автори	Примітки
1 2	$f_{ia} = 3,68 \cdot 10^{-7} Re_{\Gamma}^{0,582} Re_{de}^{0,705};$ $f_{ia} = 0,3 Re_{\Gamma}^{-0,468} Re_{de}^{0,517} \quad (1)$	Чен Фу, Ше-Ибеле [2]	d = 0,05 м, L = 3,2 м
1 2	$f_{ia} = f_{\Gamma} \left[1 + 2,95 \cdot 10^{-20} Re_{\Gamma} \left(\frac{X}{d}\right)^{0,812} Ga_{\sigma}^{1,6} Re_{\delta}^{1,77} \left(\frac{v_p^{2/3}}{g^{1/3}}\right)^{0,55} \right];$ $f_{ia} = f_{\Gamma} (1 + 9,56 Ga_{\sigma}^{-0,705} We^{0,32} \cdot Re_{\delta}^{0,75}) \left[1 + 5,33 \left(\frac{X}{d}\right)^{-2,5} \right] \quad (2)$	Б.Г. Ганчев, А.Б. Мусвик [3]	d = 0,034 м, L = 2,6 м
1 2	$f_{ia} = 0,18 \cdot 10^{-9} Re_{\Gamma}^{1,35} Re_{de}^{0,93};$ $f_{ia} = 0,893 \cdot Re_{\Gamma}^{-0,492} Re_{de}^{0,49} \quad (3)$	В.В. Максимов [4]	d = 0,025 м, L = 2,0 м

На Р1 наведено порівняння розрахунку f_i за наведеними в табл.1 методиками. Можна зробити висновок, що при якісній подібності чисельно результати значно різняться. Це свідчить про те, що користуватись методиками такого типу слід лише в діапазоні змінення параметрів, що були в дослідженнях, результати яких ці методики узагальнюють, причому ці діапазони, як правило, дуже вузькі.

Як видно з аналізу результатів, більшість значень зведеного коефіцієнта гідравлічного опору лежить у ділянці з переважаючим впливом на нього

шорсткості міжфазної поверхні, або, як її ще називають, у ділянці квадратичного закону опору. Ще L.E. Gill та інші [5] відмітили, що ефективна піщана шорсткість міжфазної поверхні залежить насамперед від товщини плівки і не залежить від витратних характеристик фаз. Відповідно, з'явилися методики, що базуються на залежності між зведеним коефіцієнтом гідравлічного опору та відношенням усередненої товщини плівки $\bar{\delta}$ до діаметра d (табл. 2).

Таблиця 2

Залежність f_{ia} від товщини плівки $\bar{\delta}$

Залежність	Автори
$f_{ia} = f_r \left(1 + 360 \frac{\bar{\delta}}{d}\right)$ (4)	Г. Уоллис [6]
$f_{ia} = f_r \left\{ 1 + \frac{A^+}{f_p^{0,75}} \left[\frac{2\bar{\delta}}{d(1 - \bar{\delta}/d)} - \frac{2B^+}{(f_{ia}/8)^{0,5} Re_r} \right] \right\}$, (5) $A^+ \approx 20; B^+ = 0,9 \cdot 10^{-2} Re_{de} v_p / v_{p20}$	Н.М. Коновалов, Н.А. Николаев, Н.А. Войнов [7]

Застосування методик такого типу пов'язане зі значними труднощами. Це спричинено тим, що для визначення товщини плівки, особливо в ділянці помірної та сильної інтенсивностей взаємодії фаз, немає єдиної достовірної методики, оскільки це складна задача. Тому слід знати, якою з існуючих методик для визначення товщини плівки користувались автори при отриманні залежності між f_{ia} та $\bar{\delta}$. Відповідно розрахунки за методиками типів (4), (5), як правило, мають наближений характер, тому можливі значні похибки.

Аналіз процесу міжфазної взаємодії та попередній аналіз отриманих результатів експериментального дослідження методами теорії подібності дали змогу запропонувати таку систему безрозмірних чисел подібності для їх узагальнення:

$$\Delta_e^* = \varphi(\tau_i^*, Re_{de}, We_*) \quad (6)$$

Параметром, що визначається, обрано безрозмірнісну еквівалентну шорсткість міжфазної поверхні Δ_e^* , причому як лінійний масштаб взято постійну Лапласа, яка традиційно застосовується при описанні процесу подрібнення рідких мас у двофазному потоці. А оскільки одним з основних факторів, що визначають характер міжфазної взаємодії, є руйнування гребенів хвиль, цей вибір є доцільним. Безрозмірнісне дотичне напруження на межі двох фаз τ_i^* є мірою співвідношення сил міжфазного тертя та тяжіння в плівці, а спільно з числом Рейнольдса плівки Re_{de} і модифікованим числом Вебера We_* визначає гідродинаміку плівки (у тому числі товщину) та процес хвилеутворення на її поверхні.

Обробка результатів експериментального дослідження в системі (6) дала можливість отримати розрахункове рівняння

$$\Delta_e^* = 7 \cdot 10^3 \frac{\tau_i^*}{\tau_i^{*2,8} + 15} Re_{de}^{4,0} We_*^{-3,8}. \quad (7)$$

Порівняння розрахованих за рівнянням (7) та отриманих при обробленні дослідних даних значень Δ_e^* наведено на Р2 і Р3. Можна зробити висновок про їх задовільну відповідність.

Щоб розрахувати зведений коефіцієнт гідравлічного опору парового ядра на міжфазній поверхні, слід розв'язати систему з рівняння (7), рівняння Коулбрука–Уайта

$$f_{ia}^{-0,5} = 1,74 - 0,87 \ln(2\Delta_e d^{-1} + 18,6 Re_r^{-1} f_{ia}^{-0,5}), \quad (8)$$

а також рівнянь

$$\tau_{ia} = f_{ia} \rho_r v_r^2 / 8, \quad (9)$$

$$\tau_i = \tau_{ia} - 0,6q v_r / \Delta h_{fg} . \quad (10)$$

На Р4 наведено порівняння значень f_{ia} , розрахованих за пропонованою методикою, зі значеннями коефіцієнта, розрахованими за результатами експериментального дослідження. Можна зробити висновок про задовільну відповідність результатів розрахунку дослідним даним.

Крім того, як видно з Р5 розрахунок f_{ia} за пропонованою методикою забезпечує асимптотичне наближення його значення при зменшенні Re_r до лінії, що описує коефіцієнт гідравлічного опору в гідравлічно гладких трубах, тобто в режимі слабкої взаємодії фаз.

Висновки. За результатами експериментального дослідження розроблено методику розрахунку еквівалентної шорсткості поверхні розділу рідина-пара в кільцевому парорідинному потоці, приведеного коефіцієнта гідравлічного опору парового ядра та дотичного напруження на міжфазній поверхні.

Умовні позначення: f_{ia} – зведений коефіцієнт гідравлічного опору парового ядра; f_p – коефіцієнт тертя плівки; f_r – коефіцієнт гідравлічного опору газового (парового) потоку в сухій трубі; g – прискорення земного тяжіння, м/с²; q – густина теплового потоку, Вт/м²; v_r – зведена до діаметра каналу швидкість газу, м/с; x – поздовжня координата, м; Δh_{fg} – питома теплота пароутворення, Дж/кг; Δ_e – еквівалентна піщана шорсткість міжфазної поверхні, м; ν_p, ν_r – кінематичні коефіцієнти в'язкості рідини та газу, м²/с; ν_{p20} – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини при 20 °С, м²/с; ρ_p, ρ_r – густини рідини та газу, кг/м³; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м; $Re_r = v_r d / \nu_r$ – число Рейнольдса газового потоку; $Re_{de} = 4\Gamma / \nu_p$ – число Рейнольдса плівки; $Re_\delta = \Gamma / \nu_p$ – модифіковане число Рейнольдса плівки; Γ – об'ємна густина

зрошення плівки, м²/с; $Ga_{\sigma} = \left[\frac{\sigma}{g(\rho_p - \rho_r)} \right] / (v_p^2/g)^{1/3}$ – число Галілея плівки; $We =$

$v_p^2 \rho_r d / \sigma$ – число Вебера; $We_* = \sigma \left[\rho_p g \left(\frac{v_p^2}{g} \right)^{2/3} \right]^{-1}$ – модифіковане число Вебера

плівки; $\Delta_e^* = \Delta_e / \ell_0$ – безрозмірна еквівалентна шорсткість міжфазної поверхні;

$\ell_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_p - \rho_r)}}$ – постійна Лапласа, м; $\tau_i^* = \frac{\tau_i}{\rho_p g (v_p^2/g)^{1/3}}$ – безрозмірне дотичне

напруження на міжфазній поверхні, Н/м²;

ЛІТЕРАТУРА

1. *Исследование* сопротивления в пристенной области газо-жидкостного изотермического потока при дисперсно-кольцевом режиме течения/ А.Я.Диденко, Г.П.Дубровский, В.А.Леонов // Вопросы теплофизики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат. – 1971 – Вып.3. – С.23–31.
2. *Чен Ше-Фу, Ибеле.* Потери напора и толщина жидкой пленки при кольцевом двухфазном чисто пленочном течении и течении с образованием эмульсии // Труды Америк. об-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача.– 1964. – №1. – С.116–125.
3. *Ганчев Б.Г.* Охлаждения элементов ядерных реакторов стекающими пленками.–М.: Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.
4. *Коновалов Н.М., Харин В.Ф., Николаев Н.А.* Расчет гидравлического сопротивления в условиях прямого нисходящего движения газа и пленки жидкости // Теор. основы хим. технологии. – 1985. – №1. – С.48–52.
5. *Gill L.E., Hewitt G. F. and Lacey P.M.C.* Sampling probe studies of the gas core in annular two-phase flow: II Studies of the effect of phase flowrates on phase and velocity distribution // Chem. Engng. Sci. – 1964. – V.19. – P. 665–682.
6. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. – 440с.
7. *Коновалов Н.М., Войнов Н.А., Николаев Н.А.* Гидродинамические закономерности вертикального прямого движения газа и пленки жидкости в трубах // Теор. основы хим. технологии.–1993. – №2.– с.192–196.

Одержано редколегією 15.01.03

За результатами аналізу експериментальних даних запропоновано залежність для визначення еквівалентної шорсткості міжфазної поверхні в парорідинних кільцевих потоках. Розроблено методика розрахунку зведеного коефіцієнта гідравлічного опору та дотичного напруження на міжфазній поверхні, потрібного для замикання моделі теплоперенесення в плівках рідини.

В результаті аналізу експериментальних даних пропонується залежність для визначення еквівалентної середньої шорсткості міжфазної поверхні в парожидкостних кільцевих потоках. Розроблена методика розрахунку приведеного коефіцієнта гідравлічного опору та касательного напруження на міжфазній поверхні, необхідних для замикання моделі теплопереносу в плівках рідини.