

Гідродинаміка окремих струменів рідини в апаратах з циліндричними розподільними пристроями

В.І. Бондар, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

С.М. Василенко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

В.В. Шутюк, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології консервування

Проаналізовано результати експериментального дослідження гідродинаміки струменів води, що утворюються під час її витікання з циліндричних розподільних пристроїв у поперечному потоці пари. Визначено граничні режими витікання та критичні параметри початку диспергування поодинокого струменя рідини.

Ключові слова: парорідинні потоки, циліндричні струмені, конденсація, теплообмін, гідродинаміка, теплообмінні апарати.

Проанализированы результаты экспериментального исследования гидродинамики струй воды, образующиеся при ее истечении из цилиндрических распределительных устройств в поперечном потоке пара. Определены предельные режимы истечения и критические параметры начала диспергирования одиночной струи жидкости.

Ключевые слова: парожидкостные потоки, цилиндрические струи, конденсация, теплообмен, гидродинамика, теплообменные аппараты.

The analysis of results of an experimental research of hydrodynamics of jets of water which are formed at its expiration of cylindrical-holes at a cross motion of stream is done. Authors defined modes of marginal leakage and critical parameters of early single dispersion liquid jet.

Keywords: vapor-liquid flows, cylindrical flows, condensation, heat transfer, hydrodynamics, heat-transfer apparatus.

Аналіз конструктивних особливостей теплообмінних апаратів з безпосереднім контактом фаз, а саме – розподільчих пристроїв для надходження рідкого теплоносія в паровий простір апаратів, дає змогу зробити висновок, що однією з найперспективніших для харчової промисловості є конструкція пароконтактних тепломасообмінних апаратів з розподільними пристроями циліндричного типу.

Якщо розглядати теплообмінні апарати змішування, які є поширеними в харчовій промисловості, з точки зору руху потоків теплоносіїв, то одним із найбільш важливих питань є визначення граничних параметрів течій, що визначають початок руйнування суцільної структури струменя, тобто початок його диспергування.

Гідродинамічний режим роботи теплообмінних апаратів впливає на стабільність його роботи, а також обумовлює особливості процесів перенесення теплової енергії та обміну масою. Але на сьогодні немає рекомендацій щодо розрахунку гідродинамічних режимів апаратів цього типу і, відповідно, їх конструктивних розрахунків.

Виходячи з вище наведеного, постає мета та основні завдання наукового дослідження, а саме:

- провести експериментальне дослідження гідродинамічних характеристик під час конденсації пари на поверхні циліндричних струменів нестислової рідини різних геометричних параметрів за різних витратних характеристик парострумінних потоків відповідно до умов роботи тепломасообмінних апаратів харчових виробництв;
- дослідити гідродинамічні режими струменів під час вільного витікання рідини через циліндричні отвори різних геометричних параметрів;
- дослідити граничні режими витікання струменів рідини різних геометричних параметрів.

Для дослідження процесів теплообміну під час конденсації водяної пари на циліндричному вільностікаючому струмені рідини було спроектовано дослідну установку, виготовлену в Інституті вугільних технологій НАН та змонтовану на кафедрі теплотехніки Національного університету харчових технологій. Установка дозволяла досліджувати процеси теплообміну та гідродинамічні характеристики під час конденсації пари на циліндрич-

ному вільностікаючому струмені рідини в широкому діапазоні зміни витратних і режимних параметрів двофазних потоків.

В досліджах початкові параметри течії змінювалися в таких межах: тиск нагрівної пари – 101...114кПа, швидкість ... пари – 0...1,017 м/с, швидкість ... рідини – 0,29...1,25 м/с, діаметр отвору – 6, 8, 10 мм, початкова температура рідини – 7...22 °С .

Під час дослідження гідродинамічного режиму витікання поодинокого циліндричного струменя рідини єдиним достовірним методом є візуальний. На основі фотографування струменевої течії під час проведення експериментального дослідження та аналізу отриманих результатів запропоновано таку класифікацію гідродинамічних режимів руху циліндричного вільностікаючого струменя рідини.

1. *Режим стійкої течії.* Струмінь не змінює своєї форми протягом всього досліду. Траєкторія руху вертикальна. Форма струменя в перерізі повторює форму отвору, з якого він витікає. Пара обтікає струмінь, практично не змінюючи його форми та траєкторії руху (див. рис. 1, а).

2. *Хвильовий режим* настає під час подальшого збільшення витрат води та швидкості набігаючого потоку пари. Це відбувається не миттєво, а поступово внаслідок дестабілізації струменя. Він характеризується відхиленням струменя від вертикальної траєкторії (зміною горизонтальної координати), періодичною зміною його форми та появою на поверхні струменя хвиль (див. рис. 1, б).

3. *Диспергований гідродинамічний режим* настає під час подальшого збільшення витрати рідини та швидкості набігаючого потоку пари. Траєкторія витікання рідини з отвору не відповідає вертикальній. Струмінь відхиляється вбік, різко коливається, порушується його суцільність (він руйнується). Утворюються маленькі краплі рідини, які виносяться потоком пари (див. рис. 1, в).

4. *Граничний гідродинамічний режим.* Пара підхоплює струмінь, частина пари барботує через товщу рідини. Цей режим періодично змінюється на диспергований гідродинамічний (рис. 1, г).

Якщо, для прикладу, розглядати струмінь $d = 6$ мм за умови $Re = 4616$, то при значенні кінетичної енергії парового потоку $\rho_p \cdot v_p^2 \leq 0.10$ кг/(м/сек²) течія стійка і чітко виражений перший режим руху, далі за умови збільшення $\rho_p \cdot v_p^2$ до 0,14 кг/(м/сек²) відбувається перехід від режиму стійкої течії до хвильового режиму. За умови подальшого збільшення кінетичної енергії парового потоку до 0,34 кг/(м/сек²) відбувається перехід від хвильового до диспергованого гідродинамічного режиму і далі, у разі зростання значення , струмінь руйнується, а при значеннях $\rho_p \cdot v_p^2 \geq 0.54$ кг/(м/сек²) настає граничний гідродинамічний режим.

Класифікацію струменевих течій проводили і раніше [1, 2], але вона була наведена для вільних

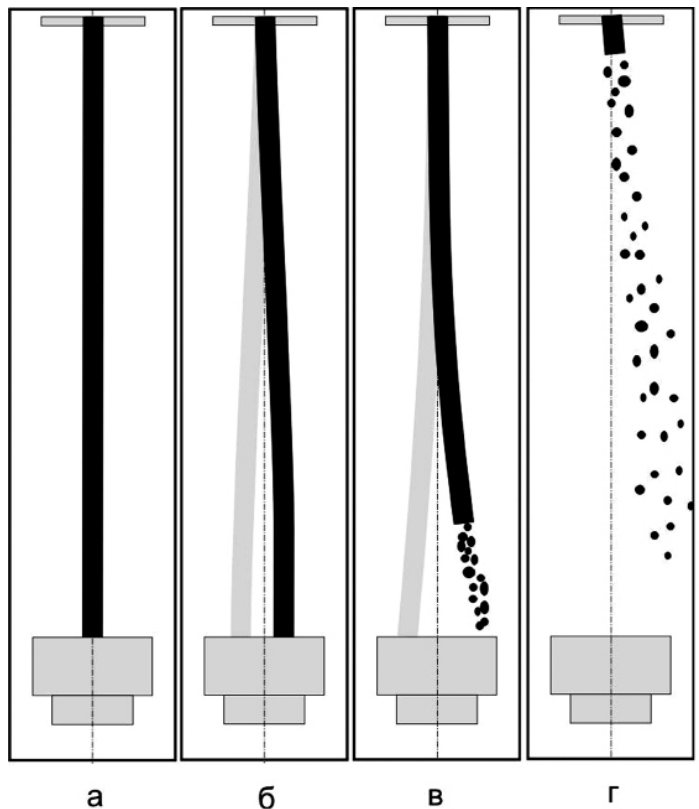


Рис. 1. Гідродинамічні режими руху $d = 6$ мм, $Re = 4616$, а) $\rho_p \cdot v_p^2 \leq 0.10$ кг/(м/сек²), б) $\rho_p \cdot v_p^2 \leq 0.14$ кг/(м/сек²), в) $\rho_p \cdot v_p^2 \leq 0.34$ кг/(м/сек²), г) $\rho_p \cdot v_p^2 \geq 0.54$ кг/(м/сек²)

струменів, які витікають через щилінні розподільчі пристрої.

Стабільність роботи тепломасообмінних апаратів обумовлена початком диспергованого гідродинамічного режиму [3, 4, 5]. Тому надзвичайно важливо визначити умови, за яких відбувається перехід від хвильового до диспергованого гідродинамічного режиму, тобто початок руйнування структури струменя.

Аналіз результатів візуального дослідження дав змогу визначити критичні параметри початку диспергування поодинокого струменя рідини, що витікає з циліндричного розподільчого пристрою.

Для того, щоб описати початок диспергування (межу переходу від хвильового до диспергованого гідродинамічного режиму), необхідно визначити ті розмірнісні величини, які визначають цей перехід [6].

Попередній аналіз гідродинамічного поодинокого струменя за протитечійного обтікання його водяною парою дозволив зробити висновок, що перехід між гідродинамічними режимами залежить від діаметра отвору, швидкості рідини, динамічного напору парового потоку, фізичних властивостей потоків рідини та пари. Тобто висота початку диспергування струменя залежить від таких величин: діаметра струменя рідини, кінетичної енергії парового потоку, швидкості виходу рідини з отвору, в'язкості, поверхневого натягу, прискорення вільного падіння

$$h_{кр} = f(\rho_p v_p^2; \nu_p; d_o; \sigma_p; \rho_p; g) \quad (1)$$

Початок руйнування структури струменя про-

понується описати такою залежністю безрозмірних параметрів

$$h_{кр}^* = f [We_{\sigma 1}; Re], \quad (2)$$

де $h_{кр}^* = \frac{h_{кр}}{\sqrt{\sigma_p / (\rho_p \cdot g)}}$ – безрозмірна відстань по вертикалі від центра отвору до площини, в якій починається диспергування струменя; $We_{\sigma 1}$ – капілярне число Вебера;

$$We_{\sigma 1} = \frac{\rho_{п} v_{п}^2}{\sqrt{\sigma_p \cdot \rho_p \cdot g}},$$

Re_0 – число Рейнольдса струменя;

$$Re_0 = \frac{v_o \cdot d_o}{v_p},$$

де v_o – швидкість рідини на виході з отвору, м/с; $v_{п}$ – швидкість пари в паровому просторі, м/с; $h_{кр}$ – висота початку диспергування, відрахована від місця витікання, м; d_o – діаметр отвору, м.

Також необхідно враховувати змінність фізичних параметрів рідинного та парового потоків, ввівши безрозмірний комплекс, наприклад Pr . До того ж наявність ще одного, четвертого, безрозмірного комплексу вимагає також π -теорема Бекінгема аналізу розмірностей [7, 8]. Але аналіз експериментальних даних гідродинамічного дослідження не виявив впливу цього фактора внаслідок незначних меж зміни фізичних параметрів потоків під час проведення дослідів.

Параметри течій під час складання безрозмірних комплексів вибирали з практичних міркувань. Так, в теплообмінному обладнанні є можливість виміряти діаметр отвору, а не діаметр струменя, розрахувати швидкість рідини на виході з отвору, парового потоку.

Для отримання залежностей було проведено експериментальні дослідження на отворах різних діаметрів ($d_o = 0,006, 0,008, 0,010$ м) у таких межах змін характеристик течії: $Re_0 = 3000 \dots 14000$; $We_{\sigma 1} = 0,0018 \dots 0,016$.

Дослідні дані задовільно апроксимуються залежністю

$$h_{кр}^* = 14,10840 \cdot Re_0^{0,180938} \cdot \exp(-55,54866 \cdot We_{\sigma 1}). \quad (3)$$

Порівняння експериментальних і розрахованих значень за емпіричною залежністю (3) наведено на **рис. 2**.

Проаналізувавши результати графічного порівняння, можемо зробити висновок, що запропонована залежність (3) з високою точністю корегує дослідні дані в межах похибки 10%, коефіцієнт детермінації 98,11%.

Для подальшої перевірки запропонованої емпіричної залежності перевіримо, як змінюється безрозмірна висота початку диспергування струменя від параметрів течій. Параметри течії, як вже було розглянуто вище, враховуються безрозмірними комплексами Re_0 та $We_{\sigma 1}$. Результати

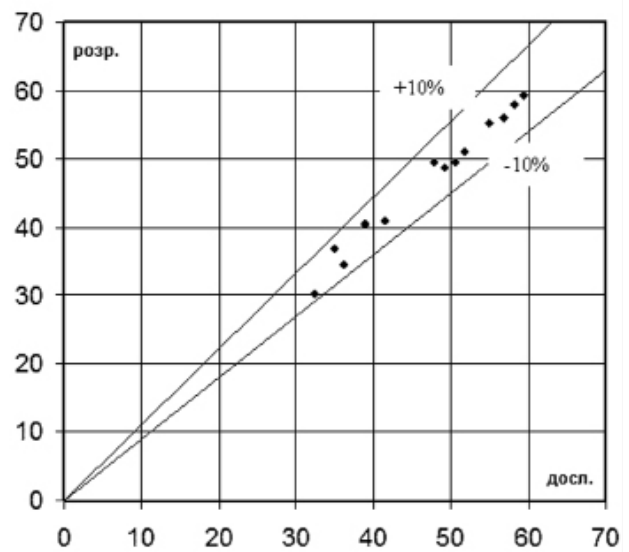


Рис. 2. Порівняння результатів розрахунку $h_{кр}^*$ за формулою (3) з дослідними даними порівняння наведено на **рис. 3**.

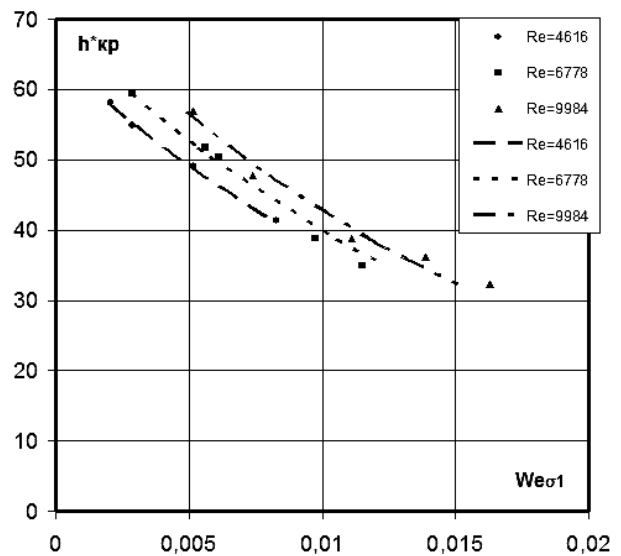


Рис. 3. Вплив критерію $We_{\sigma 1}$ на безрозмірну висоту початку диспергування. Розраховані дані за формулою (3) наведено у вигляді ліній, дослідні – у вигляді точок для відповідних значень Re .

Проаналізувавши графічну залежність, робимо висновок, що дослідні значення систематично розширюються за значеннями числа Рейнольдса, підвищення числа Re викликає збільшення $h_{кр}^*$ руйнування струменя, тобто струмінь стає більш стійким до дії парового потоку.

Під час збільшення динамічного напору парового потоку, а, відповідно, під час зростання $We_{\sigma 1}$ спочатку наступало різке зменшення безрозмірної висоти диспергування, потім струмінь інтенсивно подрібнювався, руйнувався в місці витікання та виносився з парового потоку з пролітною парою.

Можемо зробити висновок, що емпірична залежність (3) для визначення початку руйнування

ТЕХНІКА & ТЕХНОЛОГІЇ

структури струменя адекватно описує процес зміни його структури.

Висновки. Розглянувши особливості циліндричного вільностікаючого струменя рідини та взаємодію його з паровим потоком, можемо зробити висновки:

аналіз гідродинаміки циліндричного струменя рідини дозволив розробити фізично обґрунтовану класифікацію режимів його течії: режим стійкої течії, хвильовий режим, диспергований гідродинамічний режим, граничний гідродинамічний режим;

визначено граничні режими витікання струменів рідини різних геометричних параметрів;

аналіз результатів гідродинамічного дослідження дав змогу визначити критичні параметри початку диспергування поодинокого струменя рідини, що витікає з циліндричного розподільчого пристрою, та розробити залежність для розрахунку початку руйнування струменя.

Список використаних джерел

1. *Теплообмін в парорідинних течіях теплообмінних апаратів харчових виробництв*: Автореф.

дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 / С.М. Василенко; Нац. ун-т харч. технологій. – К., 2003. – 38 с. – укр.

2. *Рогоза О.Б. Теплообмін при конденсації водяної пари на поверхні вільного струменя рідини*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06 / О.Б. Рогоза; Укр. держ. ун-т харч. технологій. – К., 2000. – 20 с. – укр.

3. *Соколов Е.Н., Зингер Н.М. Струйные аппараты*. - М. : Энергия, 1970. - 286 с.

4. *Труб А.И., Литвин О.П. Конденсация пара на вертикальных струях воды // Энергомашиностроение*. – 1966. – № 4. – С. 48-51.

5. *Дементьева К.В. Исследование контактного теплообмена в процессе конденсации пара на струях переохлажденной жидкости*. Дисс. ... канд. техн. наук. К., 1971. – 158 с.

6. *Дорохов А.Р. Влияние скорости конденсирующегося пара на теплообмен // Вопросы гидродинамики и теплообмена*. – Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1972. – С. 54–58.

7. *Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике*. – М. : Наука, 1981. – 448 с.

8. *Бриджмен П. Анализ размерностей*. – Ижевск: РХД, 2001. – 148 с.

ЦІКАВІ ФАКТИ

Хімія в цифрах

■ Найвища температура створена людиною це приблизно ~ 4 трлн. К, (прирівнюється з температурою Всесвіту в перші секунди його життя), була досягнута в 2010 році при зіткненні золотих часток, прискорених до близькосвітлових швидкостей. Експеримент був проведений на установці RHIC, розташованій в Брукгейвській національній лабораторії (США).

■ Найнижча створена людиною температура - нижче $5,9 \cdot 10^{-12}$ К, тобто вище абсолютного нуля менш ніж на 1/170 млрд. частку градуса. Ця температура в 1995 року була отримана Еріком Корнеллом і Карлом із США при охолодженні атомів рубідію.

■ 718 градусів за Цельсієм - саме така температура пекла, обчислена вченими на підставі зіставлення цитат з Біблії на цю тему.

■ Якщо ви думаєте, що залізо це щось міцне і надійне, то ви помиляєтесь. Залізо, нагріте до 5000°C , стає газоподібним. При кімнатній температурі залізо легко намагнічується. Однак його важко намагнітити в нагрітому вигляді. Магнітні властивості заліза зникають при температурі близько $+800^{\circ}\text{C}$.

■ За одну хвилину Сонце виробляє більше енергії, ніж вся Земля витрачає за рік. Ми не споживаємо більшість сонячної енергії. Та енергія, яка доходить до Землі, розподіляється таким чином: 19% сонячної енергії поглинається атмосферою, 47% - падає на Землю, а 34% - повертається в космос.

■ За останні 500 років маса Землі збільшилася на мільярд тонн за рахунок космічної речовини.

■ Щодня з поверхні землі випаровується 1 трильйон тонн води.

■ У склянці води міститься близько 8 септіліонів молекул.

■ Вода може замерзнути в трубопроводі при температурі $+20^{\circ}\text{C}$, якщо в цій воді присутній метан, оскільки з води і метану утворюється газовий гідрат, який і призводить до замерзання. Молекули метану «розштовхують» молекули води, оскільки займають більший об'єм. Це призводить до зниження внутрішнього тиску води та підвищення температури замерзання.

■ Якщо 100 млн. атомів водню розташувати поруч один з одним, то вони утворюють ланцюжок довжиною всього лише в 1 см.

■ У кожному літрі морської води приблизно 25 грамів солі.

■ У Світовому океані в 1 тонні води міститься приблизно 7 мг золота. А загальна маса цього металу в водах океану становить 10 млрд. тонн.

■ 2 км найтоншого золотого дроту важать всього 1 г. Сусальне золото в 4 рази тонше людської волосини. А лужні метали - найм'якші та ріжуться ножом.