

Р.А. Ткачук, канд. техн. наук
Ю.В. Осауленко,
Н.М. Романченко
Національний університет
харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ І РОЗРОБКА ВИПАРНИХ АПАРАТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ В НИХ СТРУМЕНЕВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ РІДИНИ

Показана висока ефективність струменевого способу генерації плівки рідини, при якому коефіцієнти тепловіддачі значно перевищують, які досягнуті в кращих плівкових апаратах.

Ключові слова: апарат, струменеві генерація плівки, поверхня нагрівання, коефіцієнт тепловіддачі.

Струменевий спосіб генерації плівки є одним з найбільш ефективних у теплообмінних апаратах. Він полягає в одержанні на поверхні теплообміну тонкої плівки рідини за рахунок удару об неї струменя, що виходить із сопла або отвору. При цьому використовується ефект додаткового розтікання струменя в плівці рідини при ударі її об поверхню нагрівання. Локальні швидкості в районі удару (критичній точці) досягають 10...15 м/с, а товщина плівки 0,1 мм і менше. У даному випадку ефекти Крауссольда і Рейнольда діють спільно, що визначає високі коефіцієнти тепловіддачі до плівки при такому способі генерації.

Проведення такого способу мало досліджено для труб, особливо в умовах нагрівання.

Перевага струменевої генерації полягає також у тому, що вона дає можливість простими конструктивними способами забезпечити рівномірність зрошення теплообмінної поверхні, запобігаючи відшарування плівки від поверхні та її оголення при коливаннях тиску і витрати рідини на зрошення. В умовах названої генерації легко забезпечуються приблизно однакові гідродинамічні характеристики витікання плівки для всієї теплообмінної поверхні. Оскільки генерація плівки відбувається локально в багатьох місцях поверхні нагрівання, то легко створюється можливість для підтримки оптимального режиму роботи апарату.

Інтенсивність тепловіддачі тут майже не змінюється по довжині труби. Необхідно відзначити, що α майже не залежить від Δt , а це приближує тепловіддачу до конвективної, типу вимушеної конвенції і дає особливі переваги багатокорпусній випарній установці (БВУ). Розмиваюча дія удару значно знижує відкладення. Тонка плівка скорочує час перебування розчину в апараті та поліпшує технологічні показники.

Оскільки випаровування відбувається з поверхні плівки, то коефіцієнти тепловіддачі значно перевищують за величиною ті, що досягаються в кращих плівкових апаратах.

Кратність, кількість ступенів випарювання випарних установок тісно пов'язана з витратою пари і економічністю їх роботи. Чим більшу кількість ступенів (корпусів) має випарна установка, тим менше теоретично вона повинна споживати свіжої пари.

Однак, інтенсивність теплообміну при кипінні в значній степені залежить від температурного напору, а загальний перепад температур тому на випарній установці обмежений і кількість ступенів випарювання не може в цьому випадку практично збільшуватися вище певної межі обумовленої мінімальним температурним напором на одному корпусі. Перехід до конвективного теплообміну в зв'язку з незалежністю коефіцієнту тепловіддачі від температурного напору значно знижує вказані обме-

ження. Кратність, кількість ступенів випарювання в цьому випадку можуть бути збільшені, що сприяє зниженню витрати свіжої пари і підвищенню економічності випарної установки.

Забезпечення конвективної тепловіддачі з допомогою вимушеної циркуляції пов'язано зі значними затратами енергії на переміщення рідини в апараті. Нами вивчена інша можливість забезпечення незалежності тепловіддачі від температурного напору шляхом створення тонкої плівки рідини, яка розтікається при ударі струменя на поверхні нагрівання.

Дослідження теплообміну при нагріванні різних рідин у тонкій плівці, створеної при ударі струменя об поверхню нагрівання, проводилося на трубах довжиною 1,5 м і шаховому розташуванні 48 отворів діаметром 2 мм при об'ємних площинах зрошення

$$\Gamma_v = (1,88 \dots 4,1) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{Тут } \Gamma_v = G_v / F_{\text{тр.}},$$

де G_v — об'ємна витрата рідини, $\text{м}^3/\text{с}$; $F_{\text{тр.}}$ — активна поверхня експериментальної труби, м^2 .

Досліджено вплив різних швидкостей струменя на інтенсивність тепловіддачі на рідних ділянках по висоті труб. Крім впливу швидкості також змінювалася в'язкість зрошувальної рідини. Для цього рідина на вході в зрошувальну трубу нагрівалася до різних температур і використовувалися бідицилат і чисті цукрові розчини концентрацією 45% і 65% сухих речовин, що дозволило забезпечити великий діапазон змін числа Рейнольдса.

Як показали досліді, інтенсивність тепловіддачі на різних ділянках по висоті труби зростала з підвищенням швидкості струменя. Нами проводилось також визначення середньої товщини плівки методом відсікання живлення рідиною.

Так як в літературі відзначається, що вплив способу зрошення і витрати зрошувальної рідини не досліджено, то в нашій роботі ми приділили найбільшу увагу дослідженню цих аспектів проблеми. Нами визначились вплив швидкості струменя, розташування зрошувальних отворів і в'язкості рідини.

Для визначення площі плями розтікання нами отримано критеріальне рівняння:

$$F^+ = \frac{\sqrt{4F/\pi}}{\sigma_{\text{пр.}}^2} = 0,187 K_a^{0,1} Re_c^{1,65}, \quad (1)$$

$$\text{де } K_a = \frac{\delta^3}{\rho \nu^4} \text{ — критерій Капиці, } \delta_{\text{пр.}} = \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{q}}.$$

Узагальнення дослідних даних по товщині плями дано для $Re_r (Re_{\text{пр.}})$:

$$\delta^+ = 1,37 Ga^{0,48} Re_r^{-0,75}, \quad (2)$$

де $Ga = \frac{q d_{\text{отв.}}^3}{\nu^2}$, $Re_r = \frac{G_v}{\nu}$, $G_v = \frac{G_{\text{отв.}}}{2\pi r}$, $d_{\text{отв.}}$ — діаметр отвору в соплі; G_v — об'ємне витрати рідини.

При $\nu (5 \div 25) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ коефіцієнт в рівнянні (2) належить прийняти рівним 0,96.

Критичне значення $Re_{кр.}$ може бути знайдено з залежності

$$Re_{кр.} = 0,87 Ga^{0,09} \quad (3)$$

I_3 (2) одержана залежність для швидкості розтікання плями на будь-якому радіусі, заміряному від центру плями.

$$W_{раст.} = 20,76 \cdot 10^{-3} \frac{G_v^{1,75}}{v^{0,45} d^{1,44} r^{1,75}} \quad (4)$$

$$\frac{\bar{Nu}}{Pr^{0,43}} = f(Re_{эф.})$$

Критичальне узагальнення дослідних даних по тепловіддачі при струменевій генерації плівки може бути описане рівнянням:

$$Nu = 0,28 Re_{эф.}^{0,6} Pr^{0,43} \text{ при } Re_{эф.} < 3500, \quad (5)$$

де $Re_{эф.} = \sqrt{Re_c Re_u}$; $Re_c = \frac{W_c d_{омс.}}{v}$; $Re_u = \frac{U d_{омс.}}{\rho'' v}$; U — питома масова завантаженість поверхні нагрівання, кг/м²/с; ρ'' — густина пари.

При $Re_{эф.} > 3500$ інтенсивність тепловіддачі практично не залежить від $Re_{эф.}$. Рівняння (5) приймає вид

$$Nu = 38 Pr^{0,43} \quad (6)$$

$$\frac{\bar{Nu}}{Pe_u^{0,6} Pr^{0,43} Kp^{0,7}} = f(Kw)$$

Узагальнення може бути отримане в такому виді:

$$Nu = 0,268 \cdot 10^{-4} \left(\frac{v}{v_0} \right)^{-0,43} Pe_u^{0,6} Kp^{0,7} Pr^{0,43} Kw^{-0,55} \quad (7)$$

де $Pe_u = \frac{q D_{тр.}}{r \rho'' a}$; $Kp = \frac{\rho D_{мр.}}{\sigma}$; $Kw = \frac{q}{r \rho'' W_c}$; Nu, Pr, Pe — критерії відповідно Нуссельта, Прандтля, Пекле; Kp, Kw — комплекси, які враховують вплив відповідно теплового потоку і тиску, за яких проходить кипіння в плівці; x — кінематична в'язкість рідини, м²/с; x_0 — в'язкість води і розчинів при $t=20^\circ C$, м²/с.

Для труб довжиною 1,5 м при рядовому і шаховому розташуванні отворів, кількість 48 шт., діаметром 1,0 — 2,5 мм при об'ємних витратах зрошення $\Gamma_v = (1,8 \div 4,1) \cdot 10^{-3}$ м³/с досягає на воді навантаження поверхні нагрівання:

$$\frac{u}{\Delta t} \begin{matrix} 40 & 100 & 200 \\ 4 & 10 & 20 \end{matrix} \frac{K/m^2 \cdot C}{^\circ C}$$

При ударноструменевій генерації плівки внаслідок високих швидкостей витікання коефіцієнт теплопередачі практично не залежить від температурного напору:

$$K = \text{Const} \neq f(\Delta t)$$

Ця обставина робить можливим компоновку економічних багатокорпусних випарних установок (БВУ) із апаратів з ударноструменевою генерацією плівки.

Відомо, що витрата пари на БВУ

$$D_{\text{вип.}} \cong \frac{\sum W}{n} + \frac{n-1}{n} E_1 + \frac{n-2}{n} E_2 + \dots + \frac{1}{n} E_{n-1},$$

або у випадку паровідбору $E_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $D_{\text{вип.}} \cong \frac{\sum W}{n}$,

де $\sum W$ — загальна кількість випареної на випарці води.

Загальний температурний перепад на випарці обмежений $\Delta t = \Delta t_{\text{роар.}} = T_{\text{гр.}} - t_n$, де $T_{\text{гр.}}$ і t_n — температура граючої пари і температура кипіння розчину в останньому корпусі відповідно.

Висновки. В БВУ з ударноструменевих апаратів створюється можливість збільшення кількості ступенів випарювання n без зниження загального коефіцієнта теплопередачі, чого неможливо досягти в апаратах іншого типу, крім апаратів з вимушеною циркуляцією.

Збільшення n в декілька разів майже у стільки ж знижує витрати пари на випарку.

Зазначені переваги зумовлюють доцільність застосування струменевих випарних апаратів для випарювання термолабільних розчинів і розчинів, які спричиняють інтенсивне відкладення на поверхні нагрівання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ткачук Р.А., Коваленко Б.Д. методика теплового розрахунку струменевих випарних апаратів//Наук.праці НУХТ, 2006. № 18, — с.63-65.
2. Коваленко Б.Д., Ткачук Р.А., Іванова Л.І. Дослідження тепловіддачі при струменевій генерації рідинної плівки//Наук.праці НУХТ, 2009. № 28, — с.68-70.
3. Ткачук Р.А., Коваленко Б.Д. Гідравлічний розрахунок струменевих плівкових випарних апаратів//Наук.праці НУХТ, 2009. № 29, — С.49-51.

Р.А.Ткачук, Ю.В.Осауленко,
Н.М.Романченко

Исследование теплоотдачи и разработка выпарных аппаратов с применением в них струйной генерации жидкости

В статье рассмотрены исследования процессов теплообмена при струйной генерации пленки, которые показали, что данный способ отличается конструктивной простотой осуществления, дает возможность получать устойчивое тонкопленочное течение, предотвращает возможность оголения поверхности нагревания, благодаря большой скорости растекания, обеспечивает высокие значения коэффициентов теплоотдачи.

Объектом исследования является струйный способ генерации пленки, который оказался одним из наиболее эффективных в теплообменниках в выпарных аппаратах. Он заключается в получении на теплообменной поверхности тонкой пленки жидкости за счет удара о нее струи, выходящей из сопла или отверстия. Локальные скорости в районе удара (критической точки) достигают 10...15 м/с,

а толщина пленки 0,1 мм и менее, что определяет высокие коэффициенты теплоотдачи к пленке при таком способе генерации. Интенсивность теплоотдачи здесь почти не меняется по длине трубы. На основании полученных экспериментально-го и теоретического материала предложена новая конструкция струйного пленочного выпарного аппарата.

Наиболее эффективным следует считать применение струйных выпарных аппаратов для выпаривания термолабильных растворов, вызывающих интенсивные отложения на поверхность нагрева.

Ключевые слова: аппарат, струйная генерация пленки, поверхность нагрева, коэффициент теплоотдачи.

R. Tkachuk, Y. Osaulenko,
N. Romanchenko

Research-and-development of heat emission evaporators with application string Liquid generation in them

The researches of heat exchange processes during a stream tape generation, considered in the article, showed that this method vary of structural simplicity of realization, gives an opportunity to get a steady pellicle flow, prevents possibility of denudation of heating surface, due to high speed of spreading, provides the high values of coefficients of heat emission.

A research object is a stream method of tape generation, that is one of most effective in heat-exchangers in evaporators. Its main idea is getting a thin tape of liquid on the heat-exchange surface due to a blow of a stream going out a nozzle or opening. Local speeds in the district of blow (critical point) are at 10.15 m/ss, and thickness of tape is 0.1 mm and less, that determines the high coefficients of heat emission to tape at such method of generation. Intensity of heat emission here almost does not change on the length of pipe. The new construction of stream pellicle evaporator is offered on the basis of got experimental and theoretical material.

It is necessary to consider the application of stream evaporators for evaporating solutions, defiant intensive sedimentations on the surface of heating to be the most effective.

Key words: vehicle, stream generation of tape, heating surface, coefficient of heat emission.

e-mail: jimp@ukr.net

Надійшла до редколегії 25.02.2012 р.