

Особливості кризових режимів в плівкових випарних апаратах під час концентрування густих цукрових розчинів

Національний університет харчових технологій, кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Анотація. Аналіз кризового погіршення інтенсивності тепловіддачі до висококонцентрованих киплячих плівок розчинів, виконано в рамках моделі процесу циклічного накопичення надлишкової концентрації на міжфазній поверхні і, відповідно, циклічного зростання фізико-хімічної температурної депресії, та її циклічного вирівнювання під час проходження великих, а у випадку висококонцентрованих розчинів – напливних хвиль.

Ключові слова: тепловіддача, концентрування, випаровування, криза, плівка, температурна депресія.

Abstract. The analysis of the crisis deterioration of the heat transfer rate to highly concentrated fluidized solution films was performed in the framework of the model of the process of cyclic accumulation of excess concentration on the interfacial surface and, accordingly, the cyclic growth of the physico-chemical temperature depression, and its cyclic equalization during the solution flow waves.

Keywords: heat transfer, concentration, evaporation, crisis, film, temperature depression.

Плівкові випарні апарати останніх корпусів багатокорпусних випарних установок (ВУ) цукрових заводів в разі порушення ритмічності виробництва періодично потрапляють в режим експлуатації зі зниженою витратою сиропу, що зумовлює його перекоцентрування та спричиняє кризу теплообміну зі стрімким падінням теплового потоку по довжині труб.

Відомо, що під час охолодження теплонапружених поверхонь водою причиною виникнення кризових явищ є утворення сухих п'ятен, що розвиваються вверх по поверхні з виникненням струмків, або ривулєт [1]. В разі концентрації густих сиропів під час випаровування темп зростання в'язкості суттєво перевищує темп падіння щільності зрошення, тому плівка в процесі руху потовщується без розривання на струмки. Другим фактором, що пригнічує тепловідведення, є те, що на міжфазній поверхні в результаті випаровування утворюється прошарок з надвисокою концентрацією, який не порушується за ламінарного режиму руху в'язкого розчину. За параболічного профілю швидкості в плівці в межах міжфазної поверхні, де градієнт концентрації максимальний, зміна швидкості незначна, тому задача знаходження концентраційного $C(x, y)$ поля набуває вигляду:

$$u \frac{\partial C(x, y)}{\partial x} = D_m \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial y^2}, \quad (1)$$

де D_m – коефіцієнт дифузії; u – швидкість рідини в плівці; x, y – повздовжня та поперечна координати.

$$\text{Граничні умови: } -D_m \frac{\partial C(\delta, x)}{\partial y} = \frac{q}{r\rho} C(\delta, x); \quad \frac{\partial C(0, x)}{\partial y} = 0.$$

В реальних випарних апаратах поверхня теплообміну нагрівається водяною парою, тому в міру зростання концентрації і, відповідно, фізико-хімічної температурної депресії, тепловий потік q вздовж поверхні нагрівання зменшується пропорційно падінню корисної різниці температур, а концентрація на міжфазній поверхні C_i плівки зростає. За даних умов добуток $q C_i$, приймаємо постійним, а потік маси з міжфазної поверхні вглибину плівки виразиться як $J_m = \frac{q}{r} C_i$.

Тоді, враховуючи, що $D_m \frac{\partial C(\delta, x)}{\partial y} = -\frac{q}{r\rho} C(\delta, x) \approx -\frac{J_m}{\rho} = const$, розв'язок (1) в безрозмірних координатах надається як

$$C(\eta, \xi) = C_o + \frac{2J_m \delta}{\rho D_m} \sqrt{\frac{4\xi}{Pe_m}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(1-\eta)^2}{\frac{16\xi}{Pe_m}}\right) - \frac{(1-\eta)}{2\sqrt{\frac{4\xi}{Pe_m}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{(1-\eta)}{2\sqrt{\frac{4\xi}{Pe_m}}}\right) \right\}, \quad (2)$$

де $\eta = \frac{y}{\delta}$, $\xi = \frac{x}{\delta}$ – поперечна та повздовжня безрозмірні координати відповідно; $Pe_m = \frac{4\Gamma_v}{D_m}$ – число

Пекле масообмінне; Γ_v – об'ємна щільність зрошення, r – теплота фазового перетворення; ρ – густина. Концентрацію розчиненого компонента на міжфазній поверхні плівки, на якій і виникає пригнічуюча теплообмін дія фізико-хімічної температурної депресії, знаходимо із (2) при $\eta = 1$

$$C_i(\xi) = C_o + \frac{4J_m \delta}{\rho D_m \sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\xi}{Pe_m}}. \quad (3)$$

В довгій вертикальній трубі по поверхні густої в'язкої ламінарної плівки періодично прокочуються тривимірні серповидні напливи, які порушують сформоване концентраційне поле. За даних умов процеси теплообміну пов'язані з періодичним збуренням плівки хвилеподібними напливами, які, перемішуючи плівку, вирівнюють концентрацію в плівці. Температурний профіль здійснює періодичні коливання від початкового, сформованого в процесі перемішування під час проходження хвильового напливу, до кінцевого, який сформується на момент підходу наступного валу. У міжхвильову паузу температурне поле знайдено з рівняння конвективного теплообміну [2]

$$\left[\left(\frac{\tau_i}{\nu \rho \delta} + \frac{g}{\nu} \right) \eta - \frac{g}{2\nu} \eta^2 \right] \delta^3 \frac{\partial \theta(\eta, \xi)}{\partial \xi} = a \frac{\partial^2 \theta(\eta, \xi)}{\partial \eta^2}, \quad (4)$$

де τ_i – міжфазна дотична напруга; ν – кінематична в'язкість; $\theta(\eta, \xi) = \frac{t(\eta, \xi) - t_i(\xi)}{t_w - t_i(\xi)}$ – безрозмірна

температура; t_w – температура стінки; a – температуропровідність;

Наближений розв'язок (4) за граничних умов: $\eta = 0$, $\theta = 1$; $\eta = 1$, $\theta = 0$; та початкового розподілення температури, який реалізується під час проходження великої хвилі при $\xi = \xi_m$,

$\theta(\eta, \xi_m) = \left(\frac{Pe}{4} \right) \frac{1}{D} \exp\left(-\frac{\xi_m}{D}\right) \left(\frac{\eta^2}{2} - \eta \right) + 1$, має вигляд

$$\theta(\eta, \xi) = \frac{Pe}{8} \left[\frac{R_1 - 1}{R} + \frac{Pe}{80DR} \frac{(16\rho g \delta + 25\tau_i)}{(3\tau_i + 2\rho g \delta)} \exp\left(-\frac{\xi_m}{D}\right) \right] \exp\left[\frac{\xi_m - \xi}{R}\right] (\eta^2 - \eta) - \eta + 1 \quad (5)$$

де $D = \frac{Pe}{80} \frac{25\tau_i + 16\rho g \delta}{3\tau_i + 2\rho g \delta}$; $R = \frac{(7\rho g \delta + 10\tau_i)}{(3\tau_i + 2\rho g \delta)} \frac{Pe}{160}$; $R_1 = \frac{\tau_i + (3/4)\rho g \delta}{3\tau_i + 2\rho g \delta}$; $Pe = \frac{4\Gamma_v}{a}$; $\xi_m = D \ln\left(\frac{Pe}{8D}\right) -$

відстань, за якої $\theta(1, \xi_m) = 0$. В разі вільного стікання ($\tau_i = 0$) (5) набуває виду

$$\theta(\eta, \xi) = \left[\frac{40}{7} \exp\left(-\frac{10}{Pe} \xi_m\right) - \frac{25}{7} \right] \exp\left(\frac{320}{7Pe} (\xi_m - \xi)\right) (\eta^2 - \eta) - \eta + 1. \quad (6)$$

Координата ξ_m , за якої $\theta(1, \xi_m) = 0$, визначається із співвідношення $\xi_m = 0,0223 Pe$.

Функція підвищення температури кипіння внаслідок дії фізико-хімічної температурної депресії для

цукрового розчину на міжфазній поверхні $R_{dep}(\xi)$ в діапазоні концентрацій $0,75 < C < 0,9$ виразиться співвідношенням

$$R_{dep}(\xi) = \left(1156,9 - 6322C_i(\xi - \xi_m) + 1,3 \cdot 10^4 C_i^2(\xi - \xi_m) - 11920C_i^3(\xi - \xi_m) + 4134C_i^4(\xi - \xi_m) \right) 16,22 \frac{T^2}{r}.$$

Температурне поле в плівці в міжхвильову паузу відповідає виразу $t(\eta, \xi) = t_i(\xi) + [t_w - t_i(\xi)]\theta(\eta, \xi)$,

а тепловий потік на стінці $q_{cm}(\xi) = -\frac{\lambda}{\delta} \frac{dt(\eta, \xi)}{d\eta} \Big|_{\eta=0}$, або

$$q_{cm}(\xi) = \frac{\lambda}{\delta} \left\langle \left[\frac{40}{7} \exp\left(-\frac{10\xi_m}{Pe}\right) - \frac{25}{7} \right] \exp\left(\frac{320}{7Pe}(\xi_m - \xi)\right) + 1 \right\rangle [t_{cm} - t_{sat} - R_{dep}(\xi)H_{dep}], \quad (7)$$

де $H_{dep} = \exp\left(-1,07 \cdot 10^{-2} \sqrt{We^3 Pe}\right)$ – функція пригнічення фізико-хімічної температурної депресії потоком пари, $We = \frac{\rho_2 u_2^2 d}{\sigma}$ – число Вебера; u_2 – швидкість пари; σ – поверхневий натяг, ρ_2 – густина пари; d – діаметр труби.

Результати розрахунку (моделювання) циклічної, відповідно до частоти проходження великих хвиль (напливів), зміни теплового потоку по довжині труби довжиною 9 м на відрізьку 1 м (від 4 до 5 м) до плівки цукрового розчину високої концентрації в режимі випаровування з міжфазної поверхні наведено на рис.1.а, а осереднених розрахункових значень теплового потоку на ділянці від 4 до 9 м та порівняння з експериментальними даними, на рис.1.б.

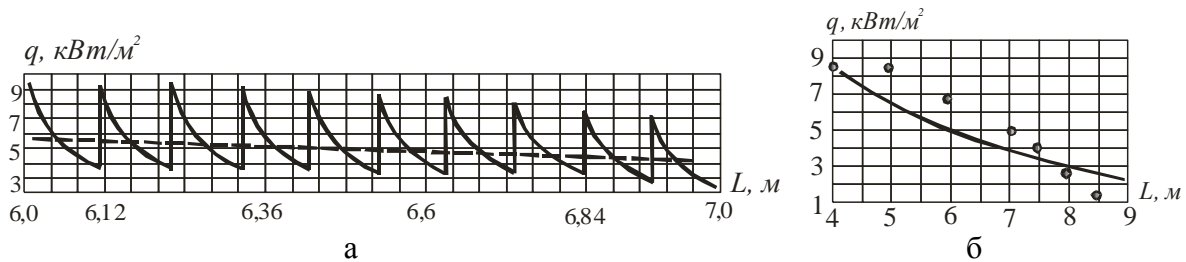


Рис.1. Розподілення теплового потоку до плівки цукрового розчину високої концентрації по довжині труби.

а. Зміна теплового потоку по довжині міжхвильових ділянок плівки. б. Зміна осередненого на міжхвильових ділянках теплового потоку по довжині труби. Вхідні параметри кільцевого двофазового потоку сформовані на відстані 4 м від входу: концентрація $CP_n = 75,5\%$ $\Gamma_v = 0,061 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; $u_2 = 3,8 \text{ м/с}$, $t_w = 115 \text{ }^\circ\text{C}$, температура насичення $t_{sat} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, відстань між хвильовими напливами $\lambda_{bw} = 0,12 \text{ м}$. Штрихова лінія – осереднені значення теплового потоку для кожного хвильового циклу

$$q_{cm}^{cp.xv} = \frac{1}{\xi_v - \xi_m} \int_{\xi_m}^{\xi_v} q_{cm}(\xi) d\xi; \quad \xi_v = \lambda_{bw} / \delta, \quad \delta - \text{товщина плівки.}$$

Експериментальні дані отримані на моделі плівкового випарного апарата з довжиною труби 9 м діаметром 33 x 1,5 мм із нержавіючої сталі в процесі концентрування густого цукрового сиропу під атмосферним тиском [3].

Висновки:

1. Напливні вали, що рухаються по поверхні густої плівки, як переструктуровані елементи системи великих хвиль в довгих каналах, запобігають стрімкому падінню теплового потоку в нижній частині труби внаслідок циклічного порушення утвореного в межах міжфазної поверхні прошароку плівки з надвисокою концентрацією.
2. Модель циклічного накопичення надлишкової концентрації на міжфазній поверхні і, відповідно, циклічного зростання фізико-хімічної температурної депресії, та її циклічного вирівнювання під час проходження напливних хвиль адекватно відтворює режим погіршення тепловіддачі в процесах концентрування надгустих сиропів в плівках, що стікають по поверхні вертикальних довгих каналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Зайцев Д.В. Термокапиллярный разрыв стекающей пленки жидкости: автореф. дис. к.т.н. Новосибирск. Сибирское отделение РАН. 2003. 115 с.
2. Petrenko V., Zasyadko Y. Heat transfer modeling in down-flowing laminar films with the developed wavy structure with co-current steam flow. *Food and Environment safety (FES)*. 2016. Vol. 15. Issue 3. p. 203 – 215.
3. Ардашев В.О. Исследование теплообмена при выпаривании гравитационно-стекающей пленки жидкости в вертикальных трубах. Дис. к.т.н. Киев. 1983. 186 с.

1. Петренко Валентин Петрович, к.т.н., доцент, доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій; Petrenkovp@ukr.net

2. Прядко Микола Олексійович, д.т.н, професор, професор кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій;

3. Францішко Алла Петрівна, асистент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій.

1. Valentin Petrenko, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Department of Heat and Refrigeration Engineering of the National University of Food Technologies; Petrenkovp@ukr.net

2. Mykola A. Pryadko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Chair of Heat and Refrigeration Engineering of the National University of Food Technologies;

3. Frantsishko Alla, Assistant Professor, Department of Heat and Refrigeration Engineering, National University of Food Technology.