

ПРО ГРАНИЧНІ РЕЖИМИ ТЕПЛОВІДДАЧІ ДО ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНИХ ПЛІВОК ЦУКРОВИХ РОЗЧИНІВ ПРИ ВИПАРОВУВАННІ З ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

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

О.М.Рябчук, асистент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

Розглянута двомірна модель розвитку концентраційного поля в ламінарній плівці рідини при випаровуванні розчинника із вільної поверхні.

Ключові слова: плівка, концентраційне поле, дифузія, випаровування

The two-dimensional model of a concentration field development within a laminar film of a liquid at the evaporation of solvent from a free surface is proposed

Key words: film, concentration field, diffusion, evaporation.

Концентрування соків у випарних апаратах з гравітаційно стікаючої плівкою має ряд переваг у порівнянні з процесом концентрування у випарних апаратах системи Роберта з природною циркуляцією. Особливо відчутними вказані переваги проявляються при концентруванні густих сиропів під вакуумом в області малих теплових потоків, характерних для умов роботи хвостової частини випарної установки.

В разі уварювання сиропу до концентрацій вище 65 % виникають режими погіршеної тепловіддачі до плівок, особливо при нерівномірному розподілі рідини по трубах.

Одна з причин погіршення теплообміну – ламінаризація режиму руху плівки внаслідок високої в'язкості при одночасному зростанні її товщини. У виразі для

товщини плівки $(\delta = \sqrt[3]{\frac{3\Gamma_v \mu}{\rho g}})$ підкореневий вираз містить добуток щільності

зрошення Γ_v та в'язкості μ . В разі незначних концентрацій темп падіння щільності зрошення при випаровуванні води з поверхні перевищує темп зростання в'язкості, тому товщина плівки по довжині труби зменшується. В разі концентрування густих розчинів навпаки – темп зростання в'язкості перевищує темп падіння щільності зрошення, і товщина плівки по довжині каналу зростає.

Другою причиною погіршення теплообміну є утворення значного поперечного градієнта концентрації. В ламінарній плівці проникнення сухих речовин в глибину здійснюється лише за рахунок малоефективної молекулярної дифузії, тому на міжфазній поверхні утворюється висококонцентрований прошарок, який перешкоджає процесу випаровування.

Для оцінки впливу поперечного градієнта концентрації на гідродинамічні параметри плівки необхідно отримати функції розподілу концентрації в залежності від режимних параметрів – витрати, теплового потоку.

Схема потоків тепломасообмінного процесу випаровування з вільної поверхні наведена на рис.1.

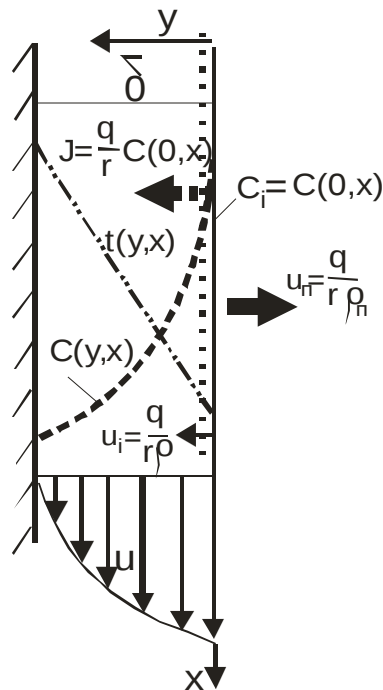


Рис.1 Схема масових потоків на поверхні плівки.

Поле концентрацій в плівці отримують з рівняння конвективної дифузії

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

де $u_x = \frac{rgd}{m} y - \frac{rg}{2m} y^2$ - швидкість в плівці, що вільно стікає по вертикальній поверхні в усталеному ламінарному режимі руху.

Граничні умови на міжфазній поверхні формуються з умови рівності масових потоків сухих речовин, що утворюються в процесі випаровування та потоку маси, що направлений в глибину плівки в результаті дифузії, рис.1.

$$D \frac{\partial C(0, x)}{\partial y} = - \frac{q}{rr} C(0, x) \quad , \quad (2)$$

де D - коефіцієнт дифузії, м²/с; q - тепловий потік, Вт/м²; r - теплота фазового перетворення, Дж/кг; ρ - густина рідини, кг/м³.

Величина $\frac{q}{r} = u_i$ в рівнянні (2) фізично відповідає швидкості руху міжфазної

поверхні у напрямку y , м/с; $\frac{q}{r} C(0, x) = j$ – потік маси розчиненого компонента з міжфазної поверхні в глибину плівки, кг/м²с; $C(0, x)$ – масова концентрація на міжфазній поверхні.

Граничні умови на поверхні теплообміну формуються з умови рівномірності концентрації на вході ($x = 0$; $C(y, 0) = C_0$), та незмінності концентрації на нескінченній відстані в напрямку y , де $\frac{\partial C(\infty, x)}{\partial y} = 0$.

Враховуючи, що концентрація, а відповідно і фізико-хімічна температурна депресія на міжфазній поверхні вздовж координати x в процесі теплообміну зростає, а тепловий потік падає, у першому наближенні можна допустити що їх добуток змінюється мало і прийняти його постійним, тобто

$$D \frac{\partial C(0, x)}{\partial y} = - \frac{q(0, x)}{rr} C(0, x) = - \frac{j}{r} = \text{const} \quad (3)$$

Крім того, в'язкість рідини біля стінки менша, ніж на зовнішній границі, тому профіль швидкості відрізняється від параболічного і стає більш заповненим. За цих умов швидкість u_x можна з певним наближенням замінити на середню $u = \frac{rgd^2}{3m}$.

З прийнятими спрощеннями приходимо до задачі розв'язання параболічного рівняння дифузії (1) з граничними умовами другого роду, розв'язок якого відомий і має вигляд

$$C(y, x) = C_0 + \frac{2J}{rD} \sqrt{\frac{Dx}{u}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{p}} \exp\left(-\frac{y^2 u}{4Dx}\right) - \frac{y}{2\sqrt{\frac{Dx}{u}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\frac{Dx}{u}}}\right) \right\}, \quad (4)$$

де $\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y) = \frac{2}{p} \int_y^\infty e^{-y^2} dy$ – функція помилок Гаусса.

Приклад розрахованку за співвідношенням (4) концентраційного поля, в плівці цукрового розчину (60% сухих речовин) при температурі 80 °C та тепловому потоці на вході 6 кВт/м² з об'ємною витратою $\Gamma_v = 0,0001 \text{ м}^3/\text{с}$, що відповідає числу Рейнольдса $Re = 4\Gamma_v/\nu = 100$, на різній відстані від входу зображено на рис.2.

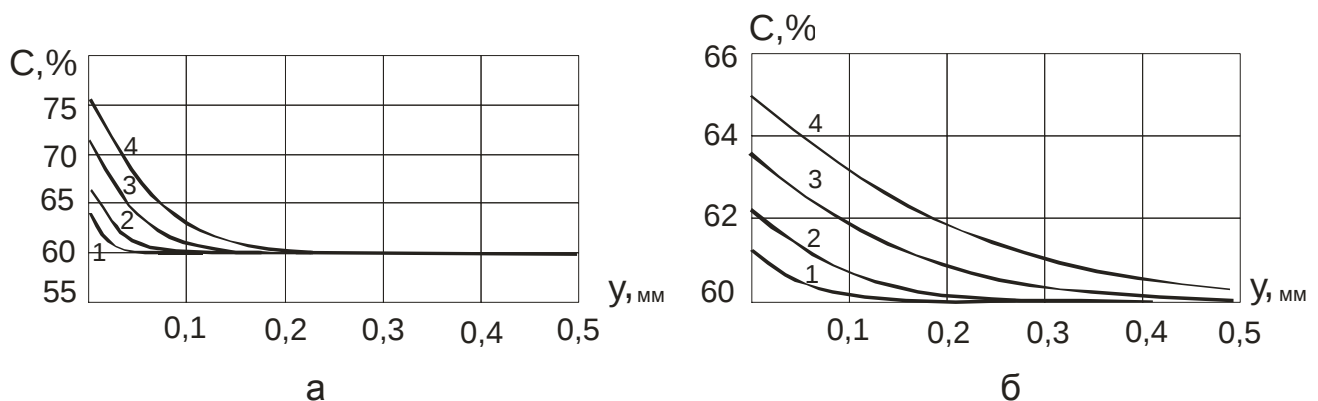


Рис.2. Розподіл концентрації в плівці на різній відстані від входу, x .

а – $D = 0,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; б – $D = 0,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$.

1 – $x = 0,1 \text{ м}$; 2 – $0,5$; 3 – $0,8$; 4 – $1,5$; $\delta = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $u = 0,2 \text{ м/с}$; $Re = 100$, $\Gamma_v = 0,0001 \text{ м}^3/\text{с}$; $\eta = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $CP_{\text{вх}} = 60\%$; $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Середню концентрація отримуємо інтегруванням профілю (4) по товщині

$$C_{cp}(x) = C_o + \frac{Jx}{rud} \operatorname{erf}\left(\frac{d}{2} \sqrt{\frac{u}{Dx}}\right) - \frac{Jd}{2Dr} \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{2} \sqrt{\frac{u}{Dx}}\right) + \frac{Jx}{ru\sqrt{p} \sqrt{\frac{Dx}{u}}} \exp\left(-\frac{d^2 u}{4xD}\right), \quad (5)$$

а максимальну – безпосередньо з рівняння (4) при $y = 0$

$$C_i(x) = C(0, x) = C_o + \frac{2J}{rD\sqrt{p}} \sqrt{\frac{D}{u}} x. \quad (6)$$

Зростання концентрації на зовнішній частині плівки згідно закону Рауля спричиняє підвищення температури кипіння, нагрівання об'єму плівки вище температури пари над поверхнею і, як наслідок, падіння температурного напору та теплового потоку

$$q(x) = \frac{\lambda_{cp}}{\delta} (t_{cm} - t_i) = \frac{\lambda_{cp}}{\delta} (t_{cm} - t_o - \Delta t_i), \quad (7)$$

де t_{cm} , t_i , t_o – температури стінки труби, міжфазної поверхні плівки та пари над плівкою, відповідно; Δt_i – фізико-хімічна температурна депресія, що відповідає концентрації сиропу на міжфазній поверхні плівки.

Залежність температурної депресії густих цукрових розчинів від концентрації відома і має вигляд

$$\Delta t_i = 0,01622 \frac{T^2}{r} \frac{C_i(x)}{0,62655 - 0,695 C_i(x)} \quad (8)$$

Підставивши (6) у співвідношення (7, 8), отримаємо залежність зміни теплового потоку по довжині труби, графік якої наведено на рис. 3.

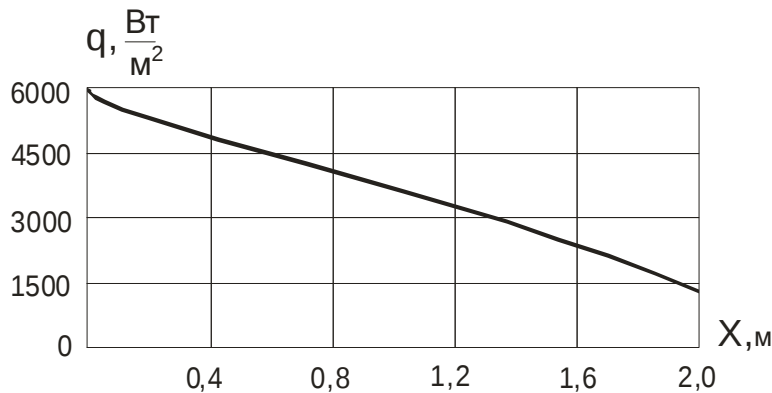


Рис.3 . Графік зміни теплового потоку по довжині теплообмінного каналу.
 $Re = 100$; $\Gamma_v = 0,0001 \text{ м/с}$; $t_0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{cm} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $\delta = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $D = 0,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

Наведені графіки ілюструють стрімке падіння теплового потоку в результаті утворення градієнта концентрації на міжфазній поверхні, зумовленого слабкою релаксаційною дією молекулярної дифузії в ламінарному режимі руху плівки.

На рис. 2.б наведені профілі концентрацій, які мали б місце в разі десятикратного збільшення коефіцієнта дифузії D у порівнянні з дифузією молекулярною. У цьому випадку різниця концентрацій по товщині плівки не перевищує декількох відсотків і проблеми з погіршенням теплообміну зникають.

В разі зміни температурного напору, коли температура стінки стає достатньою для утворення парової бульбашки, виникають сприятливі умови для поверхневого кипіння, яке активізує процес перемішування плівки та вирівнювання концентрацій.

При малих температурних напорах дієвим способом турбулізації плівки є збільшення щільності зрошення за рахунок рециркуляції. У цьому випадку, незважаючи на мале значення числа Рейнольдса, ламінарний повзучий режим порушується поверхневими хвилями, які сприяють вирівнюванню концентрації.

Висновки:

1. В процесі випаровування з вільної поверхні густих ламінарних плівок на міжфазній поверхні формується висококонцентрований прошарок, що спричиняє підвищення температури насичення на його поверхні і, як наслідок, падіння теплового потоку.

2. Основна причина утворення висококонцентрованого прошарку на міжфазній поверхні – надзвичайно мала інтенсивність молекулярної дифузії в рідинах. Збільшення коефіцієнта дифузії на порядок (рис. 2.б.) дозволяє зменшити нерівномірність розподілу концентрації в плівці до декількох відсотків, що практично знімає проблему погіршення теплообміну.

3. Експлуатацію плівкових випарних апаратів хвостової частини випарної установки доцільно здійснювати в режимі рециркуляції сиропу з метою створення гідродинамічних умов, за яких має місце перемішування плівки та вирівнювання концентрації.

