

УДК 661.121

І. Демчук, В. Опанасович, М. Слободян  
 Національний Університет "Львівська політехніка",  
 Львівський національний Університет імені Івана Франка

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КАПСУЛЮВАННЯ МОНОДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ У ДВОХФАЗНІЙ СТРУМІНІ

© Демчук І., Опанасович В., Слободян М., 2002

Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена математична модель масообміну у двофазній струміні в процесі мікрокапсулювання.

The mathematical model of mass exchange in two-phase flow in the process of microcapsulation is theoretically and practically proved.

При виведенні математичної моделі мікрокапсулювання в апараті [1], принципова схема якого наведена на рис. 1, були прийняті такі допущення:

1) процес капсулювання здійснюється для кулястих монодисперсних частинок, між якими відсутня значна взаємодія;

2) частинки при контакті із краплями розчину полімеру покриваються рівномірним шаром певної маси, який подається із ежектора;

3) розчин та газ рухаються в режимі прямого потоку.

Кінетика сушіння розчинно-плівкоутворювача на поверхні частинок, що покриваються, в умовах зовнішнього масообміну між рівномірно змоченими частинками та газом, описується рівнянням:

$$-M_t \frac{dW}{dt} = \beta F(\rho_s - \rho), \quad (1)$$

де  $M_t$  – витрата частинок, що транспортуються в газовому струмені,

$[M_t] = \frac{\text{кг}^2}{\text{с}}$ ;  $W$  – відносний вміст

розчинника на частинках, що покриваються, до їх маси,  $[W] = \frac{\text{кг}^2}{\text{с}}$ ;  $t$  – час,  $[t] = \text{с}$ ;  $\beta$  –

коефіцієнт масовіддачі в процесі випаровування розчинника з поверхні частинок,  $[\beta] = \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ ;

$\rho_s$  – концентрація насичення пари розчинника в поверхневому шарі частинки,  $[\rho_s] = \frac{\text{кг}^2}{\text{м}^3}$ ;

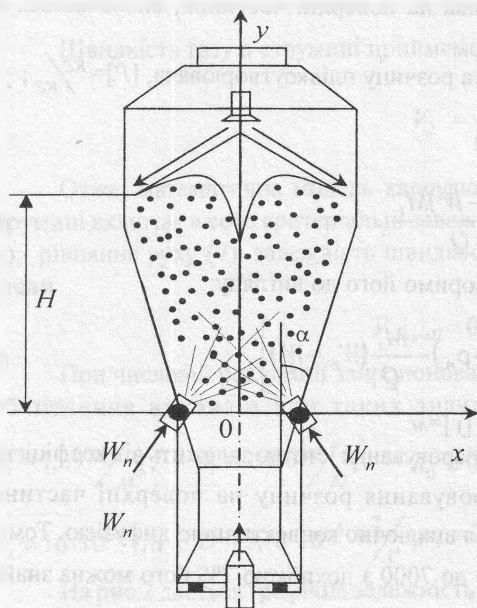


Рис. 1. Принципова схема апарата

$\rho$  – поточна концентрація пари розчинника в газі,  $[\rho] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $F$  – поверхня частинок, що покривається в одиницю часу,  $[F] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ .

В результаті випаровування розчинника по висоті струмини його відносний вміст на частинках зменшується з  $W_n$  до  $W$ ; концентрація насичення пари в поверхневому шарі частинки зменшується з  $\rho_s$  до  $\rho$ . На основі цього можна стверджувати, що умови тепломасообміну по висоті струмини є неоднакові. Виходячи з рівняння матеріального балансу за вмістом розчинника у струмені, можемо записати:

$$M_t(W_n - W) = Q(\rho - \rho_n), \quad (2)$$

де  $Q$  – витрати повітря в газовому струмені,  $[Q] = \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ ;  $\rho_n$  – початкова концентрація розчинника в повітрі,  $[\rho_n] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $\rho$  – поточна концентрація розчинника в повітрі,  $[\rho] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $W_n$  – початковий вміст розчинника на поверхні частинок, визначається на підставі співвідношення  $W_n = P(1 - j)$ ;  $P$  – маса розчину плівкоутворювача,  $[P] = \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ ;  $j$  – частка полімеру в розчині.

З рівняння (2) знайдемо:

$$\rho = \rho_n + \frac{(W_n - W)M_t}{Q}. \quad (3)$$

Підставляючи (3) в рівняння (1), перетворимо його до вигляду:

$$-\frac{dW}{dy} = \frac{\beta F}{V_t M_t} \left[ (\rho_s - \rho_n) - \frac{M_t}{Q} (W_n - W) \right], \quad (4)$$

де  $y$  – координата частинки по висоті апарата,  $[y] = \text{м}$ .

Із залежності (1) видно, що швидкість випаровування істотно залежить від коефіцієнта  $\beta$ . Визначаючи його, вважаємо, що випаровування розчину на поверхні частинок відбувається в першому періоді та визначається виключно конвективною дифузією. Тому в діапазоні зміни критерію Рейнольдса  $R_e$  від 0 до 7000 з похибкою 7% його можна знайти на підставі [2]:

$$\beta = \frac{D}{d} \left( 2 + 0,51 R_e^{0,52} S_c^{0,33} \right), \quad (5)$$

де  $S_c$  – критерій Шмідта,  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $[D] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $d$  – діаметр частинки,  $[d] = \text{м}$ .

Відомо [2], що числове значення критерію Рейнольдса можна знайти за формулою:

$$R_e = \frac{|V_1 - V_2|d}{\nu_2}, \quad (6)$$

де  $V_g$  – швидкість газу,  $V_t$  – швидкість твердої частинки,  $\nu_c$  – коефіцієнт динамічної в'язкості,  $[\nu_c] = \text{Па} \cdot \text{с}$ .

Із співвідношення (4) видно, що на коефіцієнт масовіддачі впливає критерій Рейнольдса  $R_e$ , числове значення якого залежить, як видно з (5), від відносної швидкості обтікання частинок газом, яка змінюється по висоті.

Для знаходження швидкості руху твердої частинки у двофазній струмині скористаємося рівнянням:

$$\frac{dV_t}{dy} = \frac{1}{V_t} \left[ \frac{3 \rho_g}{4 \rho_t} c'_d \frac{1}{d} (V_g - V_t) |V_g - V_t| - g \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_t} \right) \right], \quad (7)$$

де  $g$  – прискорення земного тяжіння,  $[g] = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ,  $\rho_g$  – густина газу,  $\rho_t$  – густина частинки,  $c'_d$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, який розраховується за формулою [3]:

$$c'_d = 0,32 + \frac{4,4}{\sqrt{R_e}} + \frac{24}{R_e}.$$

Швидкість газу в струмині прийемо у вигляді [4]:

$$V_g = \frac{u_0 R_0^2}{(R_0 + y \tan \alpha)^2}. \quad (8)$$

Отже, математична модель капсулювання монодисперсних частинок у двофазній струмині включає в себе критеріальні залежності (5) і (6); рівняння кінетики випаровування (4); рівняння руху (7); залежність швидкості газу від координати частинки (8); початкові умови

$$V_t|_{y=0} = 0, W|_{y=0} = W_n.$$

При числовій реалізації запропонованої моделі використовувався метод Адамса [5]. Обчислення виконані при таких значеннях фізичних і геометричних величин:

$$\rho_g = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \rho_t = 1200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad R_0 = 0,01 \text{ м}, \quad u_0 = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad \alpha = 10^\circ, \quad d = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

$$\nu_c = 16 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad D = 3,18 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad \rho_s = 2,58 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \rho_n = 0 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad M_1 = 1 \text{ кг}, \quad W_n = 0,2 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

На рис.2 дається графічна залежність швидкості газу та швидкості частинки по висоті струмини (відповідно криві 3 та 1, 2). Криві 1 і 3 побудовані при  $u_0 = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а крива 2 – при  $u_0 = 100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . На підставі кривої 1 можна зробити висновок, що спочатку швидкість частинки зростає, а потім спадає до нуля у міру її руху вверх по висоті апарата, при  $y = y_1$  її швидкість змінює напрямок, частинка починає опускатися, швидкість знову спочатку за значенням зростає, а потім дорівнює нулеві при  $y = y_2$ . Далі швидкість частинки знову змінює напрямок, від  $y_2$  частинка починає рухатися вгору, її швидкість знову зростає, а потім

спадає і при  $y = y_3$  перетворюється в нуль. Потім знову змінюється напрямок швидкості і руху донизу, тобто процес є аперіодичним з виходом на стаціонарний режим при  $y = y_C$ . частинка стає нерухомою, зависаючи у струміні газу.

З порівняння кривих 1 та 2 можна зробити висновок, що збільшення швидкості газу призводить до збільшення висоти  $y_C$  зависання частинки.

Аналіз кривих 1 і 3 показує, що існують два значення висоти апарату  $y = y_H$  і  $y = y_B$ , при яких швидкість частинки і швидкість газу рівні і однаково направлені (точки перетину кривих). Спочатку швидкість частинки менша за швидкість газу до висоти  $y_H$ , потім вона стає більшою за неї, однак швидкість газу і швидкість частинки зменшується до висоти  $y_B$ . Після цього моменту швидкість частинки ніколи не дорівнює швидкості газу в сенсі векторних величин.

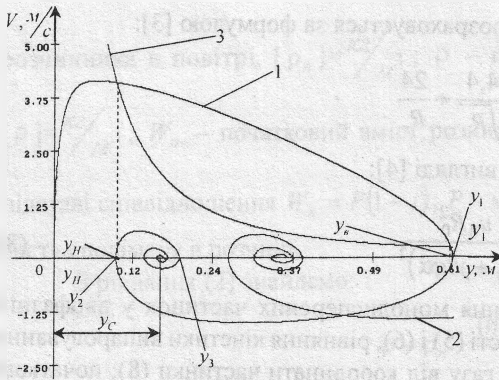


Рис. 2. Графічна залежність зміни швидкості газу (крива 3) та твердої частинки (криві 1 та 2), (крива 1 – при  $u_0 = 30 \text{ м/с}$ , крива 2 – при  $u_0 = 100 \text{ м/с}$ ).

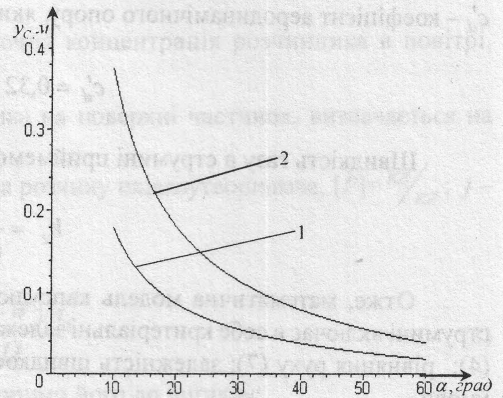


Рис. 3. Графік залежності  $y_C$  від  $\alpha$ : 1 – при  $u_0 = 30 \text{ м/с}$ , 2 – при  $u_0 = 100 \text{ м/с}$ .

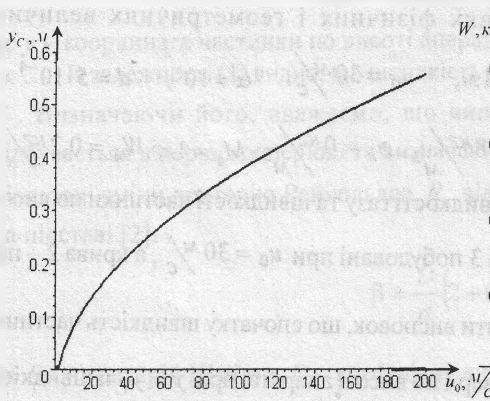


Рис. 4. Графік залежності  $y_C$  від  $u_0$  при  $\alpha = 10^\circ$ .

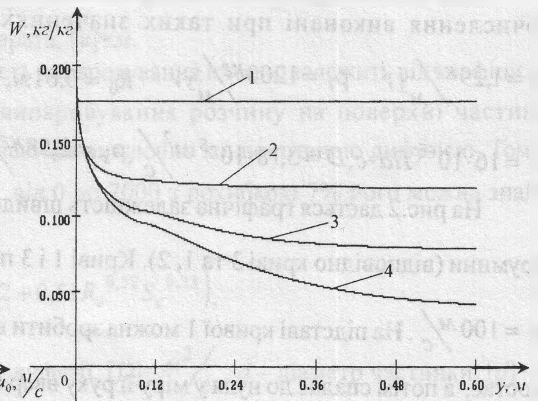


Рис. 5. Графічна залежність відносного вмісту розчинника на частинках по висоті апарату: 1 при  $u_0 = 30 \text{ м/с}$ , 2 –  $u_0 = 100 \text{ м/с}$ , 3 –  $u_0 = 150 \text{ м/с}$ ,

$$4 - u_0 = 200 \text{ м/с}$$

На рис.3 дається графічна залежність висоти  $y_c$  зависання частинки у струмині при виході на стаціонарний режим від кута  $\alpha$  (див. рис. 1). Крива 1 побудована при початковій швидкості газу  $u_0 = 30 \text{ м/с}$ , а крива 2 – при  $u_0 = 100 \text{ м/с}$ . З наведених графіків видно, що із збільшенням кута  $\alpha$  висота зависання частинки спадає, крім того, із збільшенням швидкості газу  $u_0$  вона зростає.

Графічна залежність висоти  $y_c$  зависання частинки у струмині від початкової швидкості  $u_0$  дається на рис. 4 при  $\alpha = 10^\circ$ .

На рис.5 наведені графічні залежності відносного вмісту розчинника на частинках по висоті струмини при різних значеннях початкової швидкості газу  $u_0$ . Аналіз цього рисунка показує, що із збільшенням  $u_0$  відносний вміст розчинника по висоті струмини падає.

1. Патент України № 10902/Демчук І. А. та інші. 2. В.Ф. Фролов. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: 1987. 3. Сурис А.Л.. Плазмохимические процессы и аппараты. М.: 1989. 4. Демчук І. А., Опанасович В. К., Слободян М. С. Швидкість газу в процесі мікро капсулювання у двофазній струмині // 3-я Міжнародна науково-практична конференція "Проблеми економії електроенергії" Львів. 2001. 5. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: 1971.

УДК 658.012.011.56

А. Прищепо, А. Питиримов, В. Коток,  
О. Сендеров, О. Тевяшева

ДК "Укртрансгаз", Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт автоматизированных систем управления транспортом газа (НИПИАСУтрансгаз)

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА РЕЖИМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ КОМПРЕССОРНОГО ЦЕХА

© Прищепо А., Питиримов А., Коток В., Сендеров О., Тевяшева О., 2002

Вирішується задача погодженого оцінювання параметрів технологічного процесу на прикладі компримування газу в компресорному цеху станції магістрального газопроводу. Оцінюються значення непрямих вимірів за набором результатів прямих вимірів відповідно до математичної моделі процесу. Наводиться формальне формулювання задачі, запропонований метод її розв'язання, умови застосовності та дослідження якості одержуваних оцінок.

The task of concordant estimation of process parameters is set out and being solved on a base of gas compression process in a shop of compressor plant. Values of indirect measurement are being estimated according to results of direct measurement and mathematical model of process. The formal problem statement is adduced; solution method is suggest; use conditions and a quality of estimated value are investigated.