

*Наведено результати досліджень складного тепломасообміну у шарі дисперсного матеріалу під час капсулювання плівкоутворювальними розчинами у стані псевдозрідження. Отримано рівняння для визначення комбінованого коефіцієнту тепловіддачі від повітря до поверхні частинки під час капсулювання у залежності від висоти шару. Встановлено частку поверхні частинок, яка приймає участь у масообміні. Розраховано інтенсивність масообміну з висотою шару дисперсного матеріалу*

*Ключові слова: теплообмін, масообмін, поверхня масообміну, капсулювання, фізична модель, дисперсні матеріали, псевдозріджений шар*

*Приведены результаты исследований сложного тепломасообмена в слое дисперсного материала во время капсулирования пленкообразующими растворами в состоянии псевдооживления. Получена зависимость для определения комбинированного коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности частицы во время капсулирования в зависимости от высоты слоя. Определена доля поверхности частиц, которая принимает участие в массообмене. Рассчитана интенсивность массообмена с высотой слоя дисперсного материала*

*Ключевые слова: теплообмен, массообмен, поверхность массообмена, капсулирование, физическая модель, дисперсные материалы, псевдооживленный слой*

УДК 001.891:65.011.56

# ДИНАМІКА ТЕПЛОМАСООБМІНУ У ШАРІ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ ПІД ЧАС КАПСУЛЮВАННЯ У СТАНІ ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ

**Я. М. Гумницький**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: nahurskyu@mail.ru

**О. А. Нагурський**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: nahurskyu@mail.ru

**А. О. Нагурський\***

E-mail: nahurskyu@mail.ru

\*Кафедра прикладної екології та збалансованого природокористування  
Національний університет "Львівська політехніка"  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

## 1. Вступ

Капсулювання широко застосовується в різних галузях промисловості та сільському господарстві. Одним із методів капсулювання твердих дисперсних речовин є нанесення покриття у стані псевдозрідження, що характеризується максимальною інтенсивністю взаємодії твердої фази, рідини та газу [1-6]. Однак, під час практичної реалізації капсулювання у стані псевдозрідження витрата плівкоутворювача в шар матеріалу як правило не перевищує 80% від максимально можливого значення [7, 8], що знижує продуктивність установки та збільшує затрати на виробництво капсульованих матеріалів. Це викликане явищем злипання частинок, що призводить до різкого зниження якості оболонки. Для запобігання утворенню агломератів у процесі капсулювання дисперсних матеріалів необхідним є більш рівномірно розподілити плівкоутворювач по поверхні частинок. Викликає практичне зацікавлення дослідження динаміки тепломасообміну у шарі дисперсних матеріалів під час капсулювання у стані псевдозрідження.

## 2. Аналіз попередніх досліджень

Питанням теплообміну у шарі дисперсного матеріалу присвячені ряд праць [8, 9]. В них кінетичні

коефіцієнти, що характеризують процес, визначалися як усереднена величина для всього шару матеріалу. Однак, як показують результати досліджень наведених у [10], інтенсивність теплообміну, а відповідно і масообміну, змінюється із висотою шару. Тому, користуючись усередненими показниками кінетичних коефіцієнтів неможливо адекватно охарактеризувати процес по висоті шару.

## 3. Мета роботи

Метою роботи є визначення локальних кінетичних коефіцієнтів процесу тепло- та масовіддачі під час капсулювання дисперсного матеріалу у стані псевдозрідження.

## 4. Матеріал і результати дослідження

Як дисперсний матеріал використовували модельні частинки кулястої форми, виготовлені з полістиролу, діаметром  $5,5 \times 10^{-3}$  м, густина матеріалу  $1060 \text{ кг/м}^3$ , а зрошування шару проводили водою. Результати експериментальних досліджень у графічному вигляді наведені на рис. 1.

Із отриманих результатів (рис. 1) видно, що процес теплообміну в умовах зрошення шару частинок рідиною можна умовно розділити на три фази:

- теплообмін в умовах повного зрошення поверхні частинки;
- теплообмін в умовах часткового зрошення поверхні частинки;
- теплообмін за відсутності рідини на поверхні частинки.

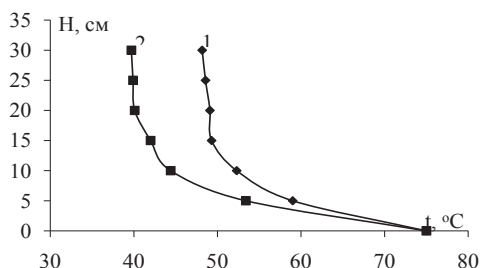


Рис. 1. Залежність температури в шарі матеріалу  $t$ , в процесі капсулювання від висоти  $H$  за різної витрати рідини,  $\text{кг}/(\text{кг}\times\text{с})\times 10^6$ : 1 – 0,76; 2 – 0,92

Повне змочення поверхні частинки рідиною можливе лише безпосередньо біля розпилюючої форсунки. Тут же теплообмін проходить з максимальною інтенсивністю. Цьому випадку відповідає ділянка кривої (рис. 1) на відрізку від 0 см до 5 см. Далі йде процес з частковим змоченням поверхні – відрізок від 5 см до 15 см. І теплообмін тільки між повітрям і поверхнею частинки спостерігається на відрізку кривої від 15 см до 30 см. На першому і третьому відрізку крива залежності має лінійний характер, тому розрахунок коефіцієнту тепловіддачі можна проводити за наведеними у [12] залежностями для відповідних випадків.

Розглядаючи теплообмін в так званій проміжній зоні (на висоті від 5 до 15 см) вводимо поняття величини змоченості поверхні частинки, яке позначаємо як  $\phi$ . Дана величина є змінною по висоті шару, тому розділяємо його на дві зони: перша – від 5 см до 10, і друга – від 10 см до 15 см. З врахуванням коефіцієнту  $\phi$  можемо записати рівняння для визначення коефіцієнту тепловіддачі для зволоженої частини поверхні:

$$\frac{Q_{\text{вол}}}{\phi} = \alpha_{\text{вол}} F_i (\bar{t}_{\text{пов}} - t_{\text{ч}}), \quad (1)$$

де  $Q_{\text{вол}}$  – теплота, яка витрачається на випаровування розчинника, Вт;

$F_i$  – площа поверхні випаровування розчинника,  $\text{м}^2$ ;

$\bar{t}_{\text{пов}}$  – середня температура повітря у проміжній зоні,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{ч}}$  – температура поверхні частинки матеріалу,  $^{\circ}\text{C}$ .

Відповідно для сухої частини поверхні:

$$\frac{Q_{\text{сух}}}{1-\phi} = \alpha_{\text{сух}} F_i (\bar{t}_{\text{пов}} - t_{\text{ч}}), \quad (2)$$

де  $Q_{\text{сух}}$  – теплота, яка витрачається на нагрівання частинки, Вт;

$\alpha_{\text{вол}}$ ,  $\alpha_{\text{сух}}$  – коефіцієнти тепловіддачі, відповідно, для зволоженої і для сухої частини поверхні,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\times\text{град})$ .

Кількість теплоти, яка передається від псевдозріджуючого повітря складається із тепла, яке витрачається на випаровування рідини  $Q_{\text{вол}}$  і на нагрівання сухої поверхні  $Q_{\text{сух}}$ . Тоді можна записати:

$$Q = Q_{\text{вол}} + Q_{\text{сух}} = V_c \rho C (t_n - t_k) \quad (3)$$

де  $t_n$ ,  $t_k$  – температура повітря, відповідно, на вході і виході із відповідної зони дисперсного матеріалу,  $^{\circ}\text{C}$

Рівняння (1-3) утворюють систему рішення якої відносно коефіцієнта  $\phi$  має наступний вигляд:

$$\phi = \frac{Q - \alpha_{\text{сух}} F_i (\bar{t}_{\text{пов}} - t_{\text{мт}})}{F_i (\bar{t}_{\text{пов}} - t_{\text{мт}}) (\alpha_{\text{вол}} - \alpha_{\text{сух}})}. \quad (4)$$

Знаючи середню величину  $\phi$  на певній ділянці псевдо зрідженого шару матеріалу, можемо визначити середнє значення комплексного коефіцієнту тепловіддачі за рівнянням:

$$\alpha = \alpha_{\text{вол}} \phi + \alpha_{\text{сух}} (1 - \phi). \quad (5)$$

Далі за отриманими даними розраховуємо величини змоченості поверхні частинки для проміжних зон за рівнянням (4) і відповідні цим зонам коефіцієнти тепловіддачі за рівнянням (5). Результати розрахунків для різних витрат плівкоутворювача представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти тепловіддачі для відповідних зон псевдозрідженого шару дисперсного матеріалу в процесі зрошення його рідиною.

$G_c$ , $\text{кг}/(\text{кг}\times\text{с})\times 10^6$	0,76	0,92
$\alpha_{\text{вол}}$	367,75	520,02
$\alpha_{\text{сух}}$	21,67	18,49
$\phi_{(5-10)}$	0,43	0,45
$\phi_{(10-15)}$	0,19	0,23
$\alpha_{(5-10)}$	170,6	244,0
$\alpha_{(10-15)}$	87,5	133,8

Кількість випареної вологи з висотою шару, визначене за рівнянням:

$$W = \frac{Q_{\text{вол}}}{r}, \quad (6)$$

наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Залежність кількості випареної вологи по висоті шару, отримана розрахунковим шляхом

H, см	Кількість поданої вологи в шар, $\text{кг}/\text{с}\times 10^3$	
	0,38	0,46
0÷5	0,000275219	0,000366801
5÷10	5,39954E-05	6,76604E-05
10÷15	1,09331E-05	1,55131E-05
	Сумарне розрахункове значення кількості випареної в шарі вологи, $\text{кг}/\text{с}\times 10^3$	
	0,34	0,45

Просумувавши загальну кількість випареної вологи по висоті шару, отримуємо залежність, наведену на рис. 2.

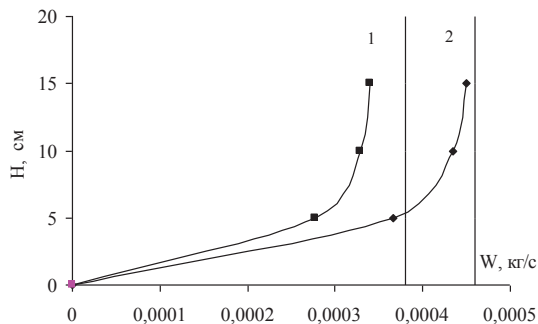


Рис. 2. Залежність кількості випареної вологи  $W$  з висотою шару  $H$  за різних витрат рідини, кг/с:  
1 - 0,00038; 2 - 0,00046

Вертикальними лініями на рис. 2 позначено кількість поданої в шар рідини.

## 5. Висновки

Розрахункові значення, представлені кривими залежностей, прямують до практичної величини. Величина відносної похибки теоретичних та експериментальних результатів лежить в межах  $4,7 \div 19,2\%$ . Це вказує на співпадіння теоретичних значень дійсним, що підтверджує правильність введених спрощень та допущень. Отримані теоретичні залежності можна використовувати для розрахунку динаміки тепломасообміну процесу капсулювання дисперсних матеріалів у стані псевдозрідження, встановлювати на її основі оптимальні технологічні параметри роботи установок псевдозрідженого стану і удосконалення роботи апаратів киплячого шару.

## Література

1. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В двух книгах [Текст]. – М.: Химия, 1981. – 812 с.
2. Кунин Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдооживление. США, 1969. Пер. с англ. Под ред. М.Г. Слинько и Г.С. Яблонского. М.: Химия, 1976. – 448 с.
3. Gutcho M., Capsule technology and microencapsulation, L., 1972.
4. Hertrich-Kamimura Bruno. Mikroverkapselung // Chem.-Ing. Techn. - 1991. - 63. - N4. - P.239-242.
5. Singeser R.E., Reiser A.L., Prilling E.B. Air-suspension tablet coating // Ghem. Eng. Progr. -1966. -v.62. -N6. -P.107-111.
6. U.S. Patent N2648609, K1.B05C 9/06. Method of applying coatings to edible tablets and the like/ Wurster D.E.
7. Демчук, И.А. Разработка технологии и моделирования процессов капсулирования твердых лекарственных форм в псевдооживленном слое: дис. к. т. н. : 05.17.08 [Текст] / Демчук Иван Андреевич. – Львов, 1991 – 203с.
8. Овчинников, Л.Н. Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое: монография [Текст] / Л.Н.Овчинников, А.Г.Липин Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2011. – 140 с.
9. Атаманюк, В.М. Зовнішній тепломасообмін під час фільтраційного сушіння [Текст] / Атаманюк В.М. // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28. - №5. – С.47-54.
10. Корнієнко, Я.М. Утилізація промислових відходів через створення технології виробництва нових добрив для екологічно безпечного землеробства : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 21.06.01 «Екологічна безпека» [Текст] / Я.М. Корнієнко : НТУУ «Київський політехнічний інститут». – Київ, 2003. – 37 с.
11. Нагурський, О.А. Кінетика тепло та масообміну процесу капсулювання дисперсних матеріалів в стані псевдозрідження [Текст] / Нагурський О.А., Гумницький Я.М. // Наукові праці ОНАХТ, вип. 41, т.2, Одеса. – 2012. - С.200-206.