

УДК 66.071.7.932:66.021.3

І. Демчук*, В. Опанасович**, М. Слободян**

*Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра теплотехніки та теплових електричних станцій,**Львівський національний університет ім. Івана Франка,
кафедра механіки

ПРОНИКНЕННЯ РІДИНИ В КУЛЯСТУ ЧАСТИНКУ, ПОКРИТУ НЕРОЗЧИННОЮ ПОЛІМЕРНОЮ ОБОЛОНКОЮ

© Демчук І., Опанасович В., Слободян М., 2003

We leaded to mathematical equation's process and graphical alteration's independence of concentration in particle and polymer membrane. This enable prognosis penetration's time of solution in the particle.

Постановка проблеми

Покриття дисперсних частинок полімерними оболонками (капсулювання) як одна із перспективних сучасних технологій, активно розвивалась із 60-х років ХХ ст. Капсульованими випускаються: хімічною промисловістю мінеральні добрива, пестициди, гербіциди; хіміко-фармацевтичною – лікарські препарати з захисною оболонкою пролонгованої та спрямованої дії. В теплоенергетиці технологія капсулювання використовується при створенні нетрадиційних джерел енергії, а саме – теплових акумуляторів з термоакумулюючою речовиною.

Крім технологічних процесів нанесення полімерних оболонок, особливий інтерес являє також процес масоперенесення речовини через полімерну оболонку. Механізм перенесення розчинної твердої фази із капсульованих частинок через полімерну оболонку здійснюється за рахунок дифузії. Він включає в себе декілька стадій: молекулярну дифузію всередині капсули, масоперенесення через полімерну оболонку та масовіддачу в оточуючий розчин. Дослідження процесу масоперенесення із капсульованих частинок дає змогу визначити час вивільнення розчинних компонентів, вибрати структуру полімерної оболонки та її товщину.

Аналіз літератури

В [1, 2] досліджено процес масоперенесення розчинної твердої фази через нерозчинну полімерну оболонку без врахування механізму проникнення рідини в оболонку, де наведені математичні моделі та результати експериментальних досліджень через плоску поверхню. В [3] наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень вивільнення речовини через полімерну оболонку із кулястої частинки. В усіх наведених вище роботах подано результати теоретичних та експериментальних досліджень масоперенесення із твердої фази, яка вміщає лише один компонент, наприклад, калій-хлор (*KCl*). В [4] сформуована задача масоперенесення із кулястих частинок, що вміщають розчинну тверду фазу, адсорбовану на поверхні твердих поглиначів, та наводяться її аналітичний розв'язок і результати порівняння із експериментальними даними. Однак у цій роботі недостатньо обґрунтований механізм проникнення рідини через полімерну оболонку та тверду фазу у кулястій частинці.

Постановка завдання

Метою цієї роботи є встановлення закономірностей проникнення рідини в кулясту частинку, покриту нерозчинною полімерною оболонкою.

Розглянемо кулясту частинку (рис. 1) радіуса $R, (м)$, покриту полімерною оболонкою завтовшки $\delta, (м)$.

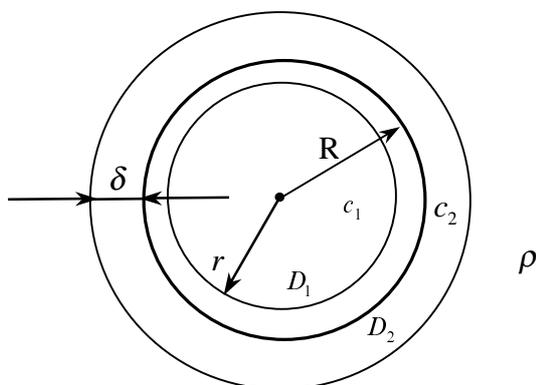


Рис. 1. Схема процесу проникнення речовини в кулясту частинку

При попаданні частинки у розчин починається проникнення рідини в полімерну оболонку в результаті дифузійного процесу. Полімерна оболонка починає наповнюватись рідиною, концентрацію якої позначимо через $c_2(r, t)$, $(R \leq r \leq R + \delta)$, $(\frac{кг}{м^3})$.

Після проникнення рідини у полімерну оболонку вона контактуватиме з твердою частинкою. Концентрацію рідини всередині частинки позначимо через $c_1(r, t)$, $(0 \leq r \leq R)$, $(\frac{кг}{м^3})$.

Математична модель досліджуваного процесу включає в себе рівняння дифузії, початкові та граничні умови:

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D_1 \left(\frac{\partial^2 c_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c_1}{\partial r} \right), \quad 0 \leq r \leq R; \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} = D_2 \left(\frac{\partial^2 c_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c_2}{\partial r} \right), \quad R \leq r \leq R + \delta; \quad (2)$$

$$c_1(r, 0) = 0, \quad c_2(r, 0) = 0; \quad (3)$$

$$|c_1(0, t)| < \infty \quad \forall t \quad (4)$$

$$c_1(R, t) = c_2(R, t), \quad D_1 \left(\frac{\partial c_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=R} = D_2 \left(\frac{\partial c_2}{\partial r} \right) \Big|_{r=R}; \quad (5)$$

$$D_2 \left(\frac{\partial c_2}{\partial r} \right) \Big|_{r=R+\delta} = \alpha (\rho - c_2|_{r=R+\delta}), \quad (6)$$

де D_1 – коефіцієнт дифузії твердої частинки;

D_2 – коефіцієнт дифузії через полімерну оболонку;

α – коефіцієнт проникнення рідини у полімерну оболонку;

ρ – густина рідини.

Виклад матеріалу

Для спрощення задачі (1), (2) зробимо заміну [5]:

$$rc_i(r, t) = u_i(r, t), \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

тоді невідомі функції $u_i(r, t), i = 1, 2$ задовольнятимуть таким рівнянням, початковим та граничним умовам:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = D_1 \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial r^2} \right), \quad 0 \leq r \leq R; \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = D_2 \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial r^2} \right), \quad R \leq r \leq R + \delta; \quad (9)$$

$$u_1(r,0)=0, u_2(r,0)=0; \quad (10)$$

$$u_1(0,t)=0; \quad (11)$$

$$uc_1(R,t)=u_2(R,t); \quad (12)$$

$$D_1\left(\frac{\partial u_1}{\partial r}-\frac{1}{r}u_1\right)\Big|_{r=R} = D_2\left(\frac{\partial u_2}{\partial r}-\frac{1}{r}u_2\right)\Big|_{r=R}; \quad (13)$$

$$D_2\left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_2}{\partial r}-\left[\frac{1}{r^2}+\frac{\alpha}{rD_2}\right]u_2\right)\Big|_{r=R+\delta} = \alpha\rho. \quad (14)$$

Розв'язок рівнянь (8), (9) знайдено чисельно за допомогою методу сіток [6]. Введемо сітку таким способом:

$$- \text{ для } 0 \leq r \leq R: r_i = ih_1, i = \overline{0, N}, h_1 = \frac{1}{N};$$

$$- \text{ для } R \leq r \leq R + \delta: r_k = R + kh_2, k = \overline{0, K};$$

$$- \text{ для } 0 \leq t \leq T: t = jl, j = \overline{0, M}.$$

Похідні замінимо різницями так:

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} \approx \frac{u_{i,j+1}^{(n)} - u_{i,j}^{(n)}}{l}, n = 1, 2; \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 u_n}{\partial r^2} \approx \frac{u_{i+1,j}^{(n)} - 2u_{i,j}^{(n)} + u_{i-1,j}^{(n)}}{h_{(n)}^2}, n = 1, 2. \quad (16)$$

Якщо підставити (15), (16) у (8), (9), то отримаємо

$$\frac{u_{i,j+1}^{(n)} - u_{i,j}^{(n)}}{l} = D_{(n)} \frac{u_{i+1,j}^{(n)} - 2u_{i,j}^{(n)} + u_{i-1,j}^{(n)}}{h_{(n)}^2}, n = 1, 2 \quad (17)$$

або

$$u_{i,j+1}^{(n)} = \left(1 - 2\frac{lD_{(n)}}{h_{(n)}^2}\right)u_{i,j}^{(n)} + \frac{D_{(n)}l}{h_{(n)}^2}(u_{i+1,j}^{(n)} + u_{i-1,j}^{(n)}), i = \overline{1, N-1}, j = \overline{1, M}, n = 1, 2. \quad (18)$$

Введемо позначення

$$\alpha_n = \frac{lD_n}{h_n^2}, n = 1, 2. \quad (19)$$

Для того, щоб різницева схема (17), (18) була стійкою, має виконуватись нерівність [6]:

$$\alpha_n \leq \frac{1}{2}, n = 1, 2.$$

Візьмемо

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{1}{2}. \quad (20)$$

Тоді, на основі формул (19) і (20) l і h_2 можна виразити через h_1 :

$$l = \frac{1}{2} \frac{h_1^2}{D_1}, h_2 = h_1 \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}. \quad (21)$$

Отже, якщо зробити розбиття відрізка $[0, R]$, тоді розбиття відрізків $[R, R + \delta]$ і $[0, T]$ робимо за формулою (21), причому для h_2 має виконуватись нерівність $h_2 \ll \delta$.

На основі залежностей (10) – (13) отримаємо:

$$u_{i0}^1 = 0, i = \overline{0, N}; \quad (22)$$

$$u_{k0}^2 = 0, k = \overline{0, K}; \quad (23)$$

$$u_{0j}^1 = 0, j = \overline{0, M}; \quad (24)$$

$$u_{Nj}^1 = u_{0j}^2, j = \overline{1, M}, \quad (25)$$

$$D_1 \left[\frac{u_{Nj}^1 - u_{N-1j}^1}{h_1} - \frac{1}{R} u_{Nj}^1 \right] = D_2 \left[\frac{u_{1j}^2 - u_{0j}^2}{h_2} - \frac{1}{R} u_{0j}^2 \right]. \quad (26)$$

Якщо взяти до уваги (25), то формулу (26) можна переписати у вигляді

$$\left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{R} \right) u_{Nj}^1 + \frac{D_2}{D_1} \left(\frac{1}{h_2} + \frac{1}{R} \right) u_{Nj}^1 = \frac{D_2}{D_1 h_2} u_{1j}^2 + \frac{1}{h_1} u_{N-1j}^1,$$

звідки знаходимо

$$u_{Nj}^1 = \frac{D_2 R h_1 u_{1j}^2 + D_1 R h_2 u_{N-1j}^1}{D_1 R h_2 + D_2 R h_1 + D_2 h_1 h_2 - D_1 h_1 h_2}.$$

На основі останньої рівності та залежності (25) можемо записати:

$$u_{Nj}^1 = u_{0j}^2 = \frac{D_2 R h_1 u_{1j}^2 + D_1 R h_2 u_{N-1j}^1}{D_1 R h_2 + D_2 R h_1 + D_2 h_1 h_2 - D_1 h_1 h_2}, j = \overline{1, M}. \quad (27)$$

Гранична умова (14) набуде вигляду

$$\frac{u_{Kj}^2 - u_{K-1j}^2}{h_2} - \left(\frac{1}{R + \delta} - \frac{\alpha}{D_2} \right) u_{Kj}^2 = \frac{\alpha \rho_6 (R + \delta)}{D_2},$$

звідки знаходимо

$$u_{Kj}^2 = \frac{\alpha h_2 \rho_6 (R + \delta) + D_2 u_{K-1j}^2}{D_2 h_2 D_2 (R + \delta) + \alpha h_2 (R + \delta) - D_2 h_2} \cdot (R + \delta), j = \overline{1, M}. \quad (28)$$

Отже, за допомогою методу сіток ми отримали співвідношення (18), (21) – (28) для знаходження u_{ij}^1 та u_{kj}^2 . Знайшовши значення u_{ij}^1 та u_{kj}^2 , можемо знайти c_{ij}^1 та c_{kj}^2 :

$$c_{ij}^1 = \frac{1}{i h_1} u_{ij}^1, i = \overline{1, M}, j = \overline{0, M}; \quad (29)$$

$$c_{kj}^2 = \frac{1}{R + k h_2} u_{kj}^2, k = \overline{0, M}, j = \overline{0, M}. \quad (30)$$

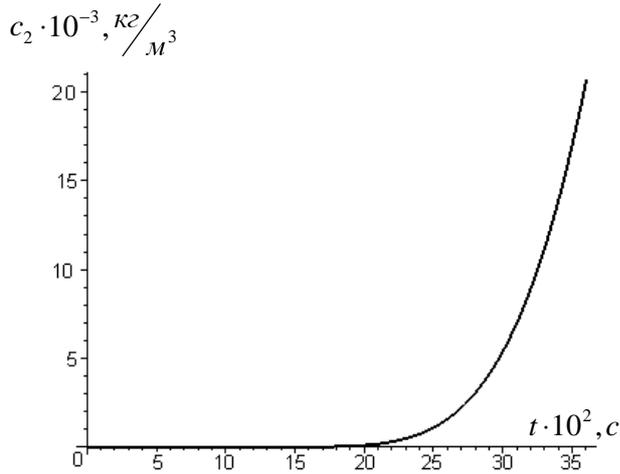


Рис. 2. Графічна залежність зміни концентрації рідини в полімерній оболонці від часу при $r=R$

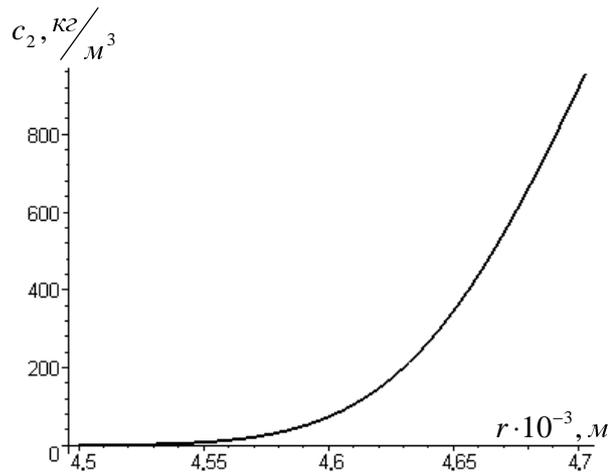


Рис. 3. Графічна залежність зміни концентрації рідини в полімерній оболонці від радіуса при $t=3600$ с

Числовий аналіз задачі проведений при таких даних: $D_1 = 1,96 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, $D_2 = 0,48 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$, $\delta = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $R = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\alpha = 1,42 \cdot 10^{-7} \text{ м}/\text{с}$.

На рис. 2 та 4 показана графічна залежність концентрації рідини відповідно в оболонці і кулястій частинці від часу, а на рис. 3 та 5 – графічна залежність тих самих величин при фіксованому часі від радіуса.

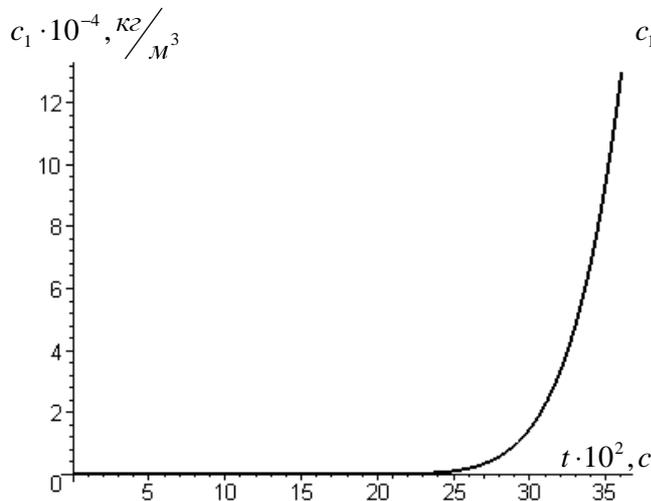


Рис. 4. Графічна залежність зміни концентрації рідини всередині частинки від часу при $r=0,00001$ м

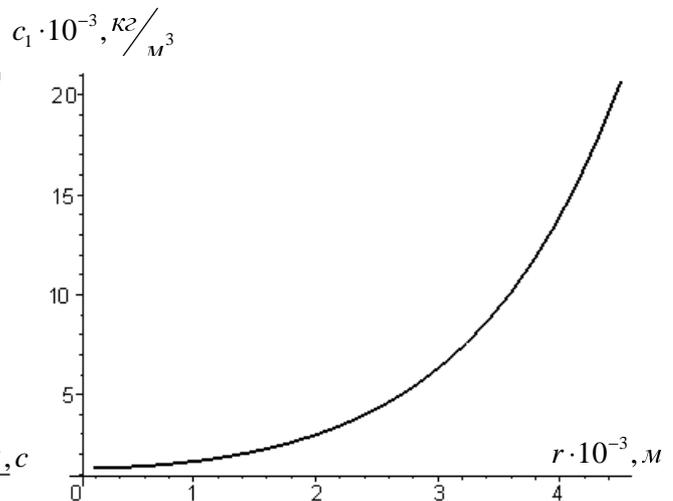


Рис. 5. Графічна залежність зміни концентрації рідини всередині частинки від радіуса при $t=3600$ с

Як видно з усіх рисунків, концентрація рідини, як і потрібно було очікувати, в полімерній оболонці і в частинці спочатку дорівнює нулю, а, починаючи з деякого моменту, зростає. При цьому в полімерній оболонці концентрація зростає набагато швидше, ніж в кулястій частинці.

Як видно з рис. 2, тільки через 30 хв вода проникне через полімерну оболонку і почне контактувати з кулястою частинкою, і можна сподіватись на зворотний процес проникнення речовини через полімерну оболонку.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Ці графічні залежності дають можливість прогнозувати величину концентрації рідини в певній точці частинки від часу. За допомогою цієї математичної моделі можна спрогнозувати час заповнення рідиною полімерної оболонки і частинки без врахування процесів їх насичення.

В подальших дослідженнях будуть розроблені математичні моделі масоперенесення через полімерну оболонку розчинів з врахуванням проникнення рідини.

1. Gumnitsky I. M., Al-Alusik F., Demchuk I. A. *Solufio kinetics of encapsulated particles// Proc. 5th conf. of appl. chem. unit operations and processes. Hungary. – 1989. – V. 1. – P 228.*
2. Гумницький Я. М., Федін І. М., Аль-Алусі К. Ф., Демчук І. А. *Масоперенос из твердой фазы через нерастворимую полимерную оболочку / Теор. основы хим. техн. – 1992. – Т. 26, № 4. – С. 510.*
3. Демчук І. А., Нагурський О. А., Гумницький Я. М. *Масоперенос из твердой шарообразной частицы, покрытой полимерной оболочкой / Теор. основы хим. техн. – 1997. – Т. 31, № 4. – С. 380 – 384.*
4. Demchuk I. A., Gumnitsky I. M., Popovych O. R., Nagurskyi O. A., Martynyak O. R. *Prococolings of the Second West Ukrainian Symposium on Adsorption Chromatography. – Lviv. June 5-7, 2000.*
5. Беляев Н. М., Рядно А. А. *Методы теории теплопроводности. В 2-х частях. Ч. 1. – М. 1982.*
6. Березин И. С., Жидков Н. П. *Методы вычислений. В 2-х частях. Ч. 2. – М. 1962.*

УДК 536.532(088.8)

Ю. Скрипник, Г. Юрчик*

Київський національний університет технологій та дизайну,
кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій,
*Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА АВТОКАЛІБРУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕРМОМЕТРІВ В УМОВАХ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Скрипник Ю., Юрчик Г., 2003

In the present work it's being analyzed the method aimed to improve accuracy and provision of metrological reliability of the digital thermo-electric thermometers using their periodical self-verification in service conditions.

Постановка проблеми і формування цілі статті

Підвищення точності і забезпечення метрологічної надійності цифрових і аналогових термоелектричних термометрів або вимірювальних каналів температури, які знайшли надзвичайно широке застосування в різних галузях промисловості і наукових дослідженнях, є актуальним завданням. Складність його зумовлена тим, що первинні термоелектричні перетворювачі (ТЕП) температури цих термометрів знаходяться під постійною дією високих температур, хімічної агресивності контрольованих середовищ та інших впливових експлуатаційних чинників. Це істотно і досить швидко змінює термоелектричні властивості ТЕП, а похибка вимірювального перетворення виходить далеко за межі допустимої [1, 2]. У зв'язку з цим, основним джерелом домінуючих похибок термоелектричних термометрів (ТТ) є прогресуючий дрейф градувальної характеристики (ГХ) ТЕП. При цьому кінцевий результат вимірювання температури від початку і в процесі експлуатації ТТ починає усе більше залежати від прогресуючих мультиплікативної та адитивної складових похибок. Перша складова, зумовлена поступовою зміною чутливості ТЕП, тобто зміною його диференціального термоелектричного коефіцієнта (коефіцієнта Зеєбека), а друга (похибка від паралельного зміщення ГХ) зростає із-за прогресуючого розвитку термоелектричної неоднорідності