

### Висновки.

Отримано узагальнення у критеріальній формі (10) залежності кінетики нарощування оболонки на поверхні частинок матеріалу, яке дає змогу розраховувати тривалість капсулювання у широких межах властивостей речовин, що приймають участь у процесі капсулювання.

### Література

1. Кунин Д. Промышленное псевдооживление. / Кунин Д., Левеншпиль О. США, 1969. Пер. с англ. Под ред. М.Г. Слинько и Г.С. Яблонского. М.: Химия, 1976. – 448 с.
2. Winiarski A. Metody zwiekszenia wykorzystania azotu z nawozow mineralnych zwiazane z technologia ich wytwarzania i stosowania / Winiarski A. // Prace Nauk. ITN I NMPWr. – 1994. - № 40. - 69 s.
3. Овчинников, Л.Н. Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое: монография / Л.Н.Овчинников, А.Г.Липин Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2011. – 140 с.
4. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В двух книгах / Гельперин Н.И. – М.: Химия, 1981. – 812 с.
5. Демчук И.А. Разработка технологии и моделирования процессов капсулирования твердых лекарственных форм в псевдооживленном слое: дис. к. т. н. : 05.17.08 / Демчук Иван Андреевич. – Львов, 1991 – 203с.

УДК 66.047.45

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Симак Д.М. канд. техн. наук, Гумницький Я.М. докт. техн. наук, професор,  
Атаманик В.М. докт. техн. наук, професор  
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

*Проаналізовано процес теплообміну у шарі дрібнодисперсного матеріалу. Обґрунтовано неможливість одержання аналітичних рішень. Наведено емпіричну апроксимацію експериментальних даних.*

*Analyzes the process of heat transfer in a layer of fine-dyspersated material. Has been proved the impossibility of obtaining analytical solutions. Has been shown empirical of approximation of experimental data.*

**Ключові слова:** теплообмін, тепловий агент, стаціонарний шар, дисперсний матеріал, кек глиноземистий, кам'яне вугілля

В основі фільтраційного сушіння лежить метод профільтрування теплового агента через нерухомий (стаціонарний) шар дисперсного матеріалу. Метод характеризується високою інтенсивністю, особливо для процесів сушіння, що протікають у першому періоді, а також за наявності вільної вологи, що за лічені секунди видаляється з шару матеріалу. Сушіння є тепломасообмінним процесом, причому температура теплового агента відіграє суттєву роль у видаленні вологи.

Теплові та масообмінні процеси у шарі відзначаються значною складністю визначення поля температур та концентрацій. Структура потоку теплового агента значно відрізняється від структури потоку у реакторі ідеального витіснення (наприклад, вихідні криві у процесах адсорбції).

У процесах сушіння необхідно враховувати температурний фактор, який впливає на рівноважний вологовміст, фізико-хімічні характеристики дисперсного матеріалу та теплового агента.

Балансове рівняння для визначення зміни температури  $t$  теплового агента, записане у безрозмірних координатах для одиниці довжини шару, має вид [1]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = -3 \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=1}, \quad (1)$$

у якому:

$\varphi = \frac{r}{R}$  – безрозмірний радіус частинок;

$$\omega = \frac{a \cdot \zeta \cdot (1 - \varepsilon) \cdot z}{\nu_0 \cdot R^2} \text{ – безрозмірна довжина шару;}$$

$r, R$  – біжучий та дійсний радіус частинки, м;

$T$  – температура твердих частинок, °С;

$a$  – коефіцієнт теплопровідності, м<sup>2</sup>/с;

$\nu_0$  – фіктивна швидкість теплового агента, м/с;

$z$  – біжуча висота шару, м;

$\varepsilon$  – пористість шару;

$\zeta$  – відношення об'ємних теплот дисперсного матеріалу і теплового агента [1].

Доповнивши рівняння (1) диференціальним рівнянням теплопровідності з крайовими умовами III роду [2], використавши операційний метод, оснований на перетвореннях Лапласа, одержано зображення, якому немає оригіналу. Можливо одержувати лише наближені рішення для екстремальних значень безрозмірної довжини ( $\omega \ll 1, \omega \gg 1$ ) та чисел Фур'є ( $Fo \ll 1, Fo \gg 1$ ).

Нами розглянуто два методи математичного моделювання процесу теплообміну у стаціонарному шарі для випадків, коли параметри процесу  $\omega$  і  $Fo$  не вписуються у рамки точних рішень, одержаних на основі перетворення за Лапласом.

В основі першого методу лежить процес перетворення функції на основі експериментальних даних. Метод полягає в тому, що функцію  $\theta_1(Fo)$  можна представити експоненціальною залежністю для таких значень  $\omega$ , які характеризують «короткий шар».

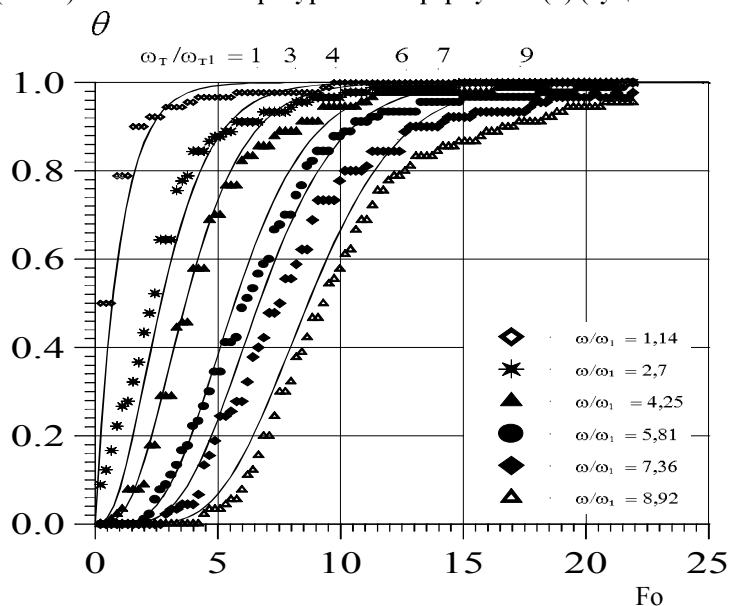
$$\theta_1(Fo) = 1 - e^{-Fo} \tag{2}$$

Для шару більшої довжини  $\omega$  рекурентна формула має вигляд [3]:

$$\theta_n(Fo) = 1 - e^{-Fo} \cdot \left( 1 + \frac{Fo^{2-1}}{(2-1)!} + \dots + \frac{Fo^{n-1}}{(n-1)!} \right), \tag{3}$$

де  $n = \frac{\omega_n}{\omega_1}$ , а  $\theta = \frac{t - T_0}{t_n - T_0}$ .

На рис. 1 наведено експериментальні результати щодо зміни температури сушильного агента  $t$  у безрозмірній формі (точки) та визначені за рекурентною формулою (3) (суцільні лінії).



**Рис. 1 – Зміна температури теплового агента під час фільтраційного сушіння кам'яного вугілля (точки – експериментальні дані, суцільна лінія – розрахунок за формулою (3))**

Експериментальні значення температур теплового агента визначались по висоті шару зернистого матеріалу за допомогою ХК термопар і 7-канального вимірювального інтелектуального перетворювача ПВІ-0298 з виведенням інформації на персональний комп'ютер.

Другий метод базується на одержанні емпіричних залежностей  $\theta = f(Fo, \psi)$ , у якій  $\psi = h/H$  – безрозмірна висота шару. Комп’ютерна апроксимація одержання експериментальних даних показала, що найбільш коректно температурний режим на різних висотах шару описується логарифмічною залежністю типу:

$$\theta = A \cdot \lg(Fo) \pm B, \quad (4)$$

у якій  $A$  і  $B$  є функціями безрозмірної висоти шару  $\psi$ .

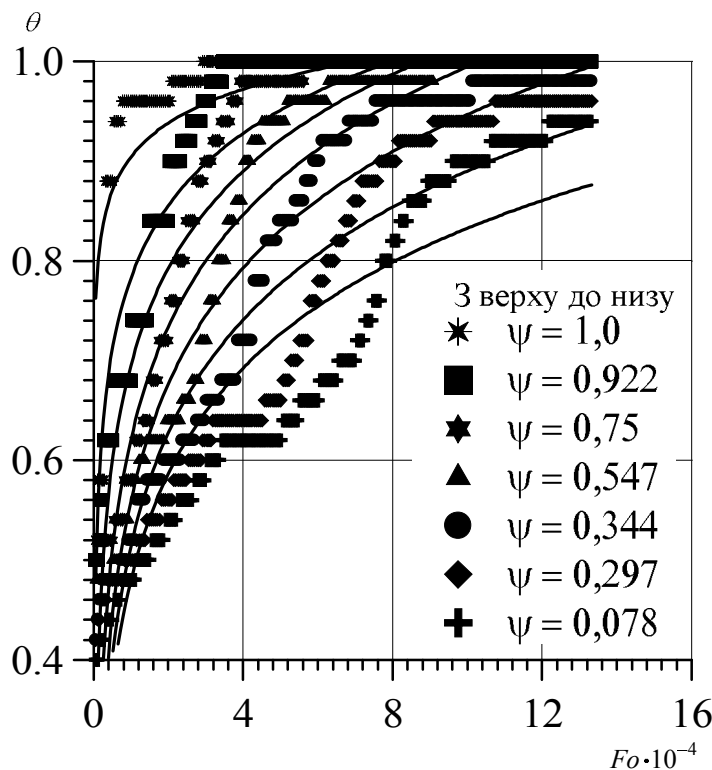


Рис. 2 – Зміна безрозмірної температури  $\theta$  від безрозмірного часу  $Fo$  залежно від висоти шару кеку глиноземистого

На рис. 2 наведено зміну безрозмірної температури теплового агента  $\theta = t/t_n$  як функції безрозмірного часу  $Fo$  для шару дрібнодисперсних частинок кеку глиноземистого.

Узагальнення результатів наведених на рис. 2 дала змогу визначити невідомі коефіцієнти  $A$  і  $B$  рівняння (4)

$$A = 0,1 \cdot \lg(\psi) + 7,8 \cdot 10^{-2}$$

$$B = -1,4 \cdot \lg(\psi) + 0,2$$

а саме рівняння представити у вигляді:

$$\theta = (0,1 \cdot \lg(\psi) + 7,8 \cdot 10^{-2}) \cdot \lg(Fo) - 1,4 \cdot \lg(\psi) + 0,2 \quad (5)$$

#### Висновок

Отримана розрахункова залежність дає змогу прогнозувати швидкість переміщення температурного поля в шарі дисперсного матеріалу під час фільтраційного сушіння з достатньою точністю для використання її під час проектних розрахунків сушильного обладнання.

#### Література

1. Атаманюк В.М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів (Монографія) / В.М. Атаманюк, Я.М. Гумницький / Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2013, 276 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков / – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
3. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело-жидкость / Г.А. Аксельруд / – Львов: изд-во Львов. ун-та, 1970. –185 с.