

УДК 66.047

Я. М. Ханик, д. т. н., проф.;

О. В. Ковальчук, к. т. н., доц.;

А. Я. Ханик;

Т. І. Римар, асп.

## ФІЛЬТРАЦІЙНЕ СУШІННЯ ЯК ЕНЕРГОЗБЕРЕЖНИЙ МЕТОД ЗНЕВОДНЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Розроблено високоефективний і енергозберіжний метод зневоднення матеріалів. Суть методу полягає у тому, що теплоносій під дією перепаду тисків рухається через пористу структуру газопроникного матеріалу. Досліджено гідродинаміку, кінетику сушіння і якісні характеристики виробів. Отримано математичні залежності, що дають змогу спрогнозувати процес сушіння і забезпечити необхідну механічну міцність і задану геометричну форму об'єкта.

### Вступ

Сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів є не тільки енергетичною, а й технологічною проблемою, яка полягає у тому, що якість готової продукції дуже часто не відповідає необхідним вимогам. Особливо це стосується виробів складної форми, виготовлених шляхом нафільтровання із суспензій, тверда частина яких є сумішшю волокнистих матеріалів капілярно-пористої колоїдної природи. Після виготовлення виробів різної форми їх необхідно висушувати до заданої вологості для проведення подальшої технологічної обробки. Частина вологих виробів деформується під час транспортування їх із зони формування в зону сушіння, і не можуть використовуватись для подальшої обробки. Значна частина виробів може деформуватися безпосередньо в процесі сушіння через нерівномірність процесів тепло- та масообміну по всій поверхні виробу складної форми. Разом з тим тривалість конвективного сушіння є значною, а сам процес характеризується високими питомими енергозатратами.

### Основна частина

Покращення якості висушуваних матеріалів, зменшення енергозатрат і тривалості процесу досягається шляхом одночасного формування і сушіння під надлишковим тиском теплоносія в зоні формування.

Фільтраційне сушіння, схема якого показана на рис. 1, полягає у тому, що теплоносій під дією перепаду тисків рухається через пористу структуру листового газопроникного матеріалу. Процес тепломасообміну відбувається на внутрішньо-капілярній поверхні, яка на порядок–два перевищує геометричну поверхню висушуваного матеріалу. В процесі фільтраційного сушіння має місце механічне витіснення і винесення вологи в залежності від природи зв'язку її з матеріалом, високий ступінь використання теплової енергії, значна інтенсифікація сушіння у порівнянні з конвективним процесом зневоднення, а також суттєве зменшення питомих енергозатрат [1].

В результаті такого суміщення процесів геометрична форма виробу повністю зберігається, відсутні деформаційні явища, що досягається шляхом рівномірного прилягання вологого виробу до стінок форми завдяки створенню надлишкового тиску в зоні сушіння.

Авторами досліджені гідродинаміка, кінетика сушіння і якісні характеристики виробу (задана геометрична форма, рівномірність розподілу вологи по поверхні матеріалу, жорсткість конструкції, придатність до подальшої хімічної і механічної обробки). Отримані математичні залежності дають змогу спрогнозувати процес сушіння (розрахунок тривалості процесу до заданої кінцевої вологості) і забезпечити необхідну механічну міцність та задану геометричну форму об'єкта складної форми.

Вивчення гідродинаміки та кінетики сушіння дало змогу обґрунтувати доцільність використан-

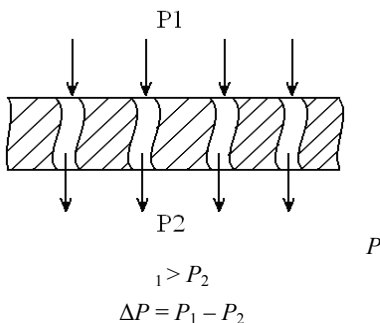


Рис. 1. Схема фільтраційного сушіння

ня зневоднення за рахунок створення перепаду тисків і руху теплоносія через пористу структуру матеріалу. Гідродинаміка тісно пов'язана з кінетикою сушіння і, в кінцевому результаті, впливає на якість висушеного виробу. Прогнозування кінетики сушіння, як уже згадувалось, є важливим для визначення кінцевого часу зневоднення. При досягненні рівноважного стану, коли деформація виробів відсутня, вологість рівномірно розподілена по товщині стінок.

В промислових умовах виробу різноманітної складної форми сушать в багатопозиційних сушарках, які включають стадії формування об'єкта і до його вивантаження в сухому вигляді. Дослідження кінетики сушіння показало, що зневоднення картонних виробів методом профільтовування теплоносія через матеріал, характеризується двома періодами тепло-масообміну — періодом сповільненого та інтенсивного сушіння. В період сповільненого сушіння зміна вологості виробу є незначною, а тривалість процесу зневоднення велика. В той час як в період інтенсивного сушіння за короткий проміжок часу видаляється основна маса води. Отже, кінетична крива складається з двох ділянок — з ділянки сповільненого сушіння і з ділянки інтенсивного зневоднення.

Період інтенсивного зневоднення тісно пов'язаний з гідродинамікою у внутрішньокапілярній структурі. На гідравлічний опір матеріалу під час руху теплоносія через пористу структуру матеріалу впливають дві складові — зростання швидкості руху теплоносія при зменшенні вологості матеріалу і збільшення розмірів капілярів.

У період інтенсивного сушіння зростає активна пористість матеріалу після механічного витіснення води з капілярів внаслідок зменшення в'язкості води в результаті прогрівання матеріалу у період сповільненого сушіння.

На гідравлічний опір впливає як зростання швидкості теплоносія у процесі сушіння, так і збільшення діаметру капілярів зі зменшенням вологості матеріалу. Зростання швидкості руху теплоносія спричиняє зростання гідравлічного опору матеріалу, а збільшення вільного об'єму — зменшення. Як показали дослідження, друга складова має домінуючий вплив на гідравлічний опір газопроникного матеріалу. Це веде до того, що швидкість руху теплоносія зростає, а гідравлічний опір зменшується, досягаючи мінімального значення, коли матеріал сухий і вільний об'єм максимальний.

З метою узагальнення результатів досліджень фільтраційного процесу сушіння і отримання розрахункових залежностей для прогнозування процесу необхідно в комплексі розглядати гідродинаміку і кінетику зневоднення. Зміна швидкості руху теплоносія у пористій структурі газопроникного матеріалу описується залежностями [1]

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{1}{\varepsilon^3} (a v + b v^2); \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_c - B \bar{W}, \quad (2)$$

де  $\Delta P$  — гідравлічний опір, Па;  $H$  — товщина зразка, м;  $\varepsilon$  — текучий вільний об'єм;  $v$  — швидкість руху (фільтрації) повітря, м/с;  $\bar{W}$  — відповідно середня вологість матеріалу, %;  $a, b, B$  — коефіцієнти пропорційності.

Із рівняння (1) випливає, що гідравлічний опір матеріалу залежить від товщини стінки шару, швидкості і величини вільного об'єму  $\varepsilon$ , який в свою чергу, залежить від вологості матеріалу  $\bar{W}$ . Характеристика вентилятора (або вакуумного насоса) у певних границях зміни продуктивності також виражається лінійною апроксимацією

$$\Delta P = M' - N v. \quad (3)$$

Рівняння (1—3) приводять до залежності, яка у неявній формі зв'язує швидкість теплоносія і вологість матеріалу

$$\varepsilon(v) = \left[ \frac{(a v + b v^2) H}{M - N v} \right] = \varepsilon_c - B \bar{W}, \quad (4)$$

де  $M, N$  — коефіцієнти пропорційності;  $\varepsilon_c$  — вільний об'єм сухого матеріалу.

Експериментально отримана залежність коефіцієнта масовіддачі для класу плоских газопроникних матеріалів.

$$K = \beta v, \quad (5)$$

де  $\beta$  — коефіцієнт пропорційності.

Для цього класу матеріалів рівняння, що визначають кінетику сушіння, має вигляд:

$$-\frac{\partial W}{\partial \tau} = mv(1 - \varphi); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = n(1 - \varphi); \quad (7)$$

$$m = 100\beta_1 SP_S, \quad n = \beta SP_S \frac{1}{0,622} \frac{\rho_M}{\rho_B}, \quad (8)$$

де  $\varphi, \varphi_0$  — відповідно поточне та початкове значення відносної вологості;  $S$  — питома поверхня одиниці маси, м<sup>2</sup>/кг;  $P_S$  — тиск насиченої пари, Па;  $\rho_M, \rho_B$  — відповідно густина сухого матеріалу та густина повітря, кг/м<sup>3</sup>.

При  $z = 0, \varphi = \varphi_0 = \text{const}$ ; при  $t = 0, W = W_0$  рівняння (6) інтегрується безпосередньо як

$$W_{z=0} = W_0 - m(1 - \varphi_0) \int_0^\tau v d\tau, \quad (9)$$

де  $W_0$  — початкова вологість, %;  $\tau$  — поточний час, с.

Розв'язання системи (6), (7) з граничними умовами  $\begin{cases} t = 0, & W = W_0 \\ Z = 0, & \varphi = \varphi_0 \end{cases}$  має вигляд

$$1 - \frac{\bar{W}}{W_0} = \alpha e^{-nz} \int_0^\tau W d\tau; \quad (10)$$

$$1 - \frac{\bar{W}}{W_0} = \alpha \frac{1 - e^{-nH}}{nH} \int_0^\tau v d\tau; \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{m(1 - \varphi_0)}{W_0},$$

де  $H$  — товщина стінки матеріалу, м.

Підставляючи рівняння (4) і (11) і диференціюючи їх за часом, отримуємо

$$\varepsilon'(v) \frac{dv}{d\tau} = B\alpha W_0 v_0 \frac{1 - e^{-nH}}{nH}. \quad (12)$$

З рівняння (12) випливає, що

$$\int_{v_0}^v \frac{\varepsilon'(v) dv}{v} = B\alpha W_0 \frac{1 - e^{-nH}}{nH} \tau. \quad (13)$$

Якщо  $\varepsilon' = \text{const}$ ,  $\varepsilon' = \frac{d\varepsilon}{dv}$ , то (11), (13) інтегрується безпосередньо:

$$v = v_0 e^{\tau K}; \quad (14)$$

$$1 - \frac{\bar{W}}{W_0} = \eta \left( e^{\tau K} - 1 \right), \quad (15)$$

де

$$\tau_K = \frac{\varepsilon}{B\alpha W_0} \cdot \frac{nH}{1 - e^{-nH}}; \quad (16)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon v_0}{B W_0}. \quad (17)$$

Використання отриманої математичної моделі показує її відповідність експериментальним даним.

Узагальнення експериментальних даних згідно отриманої математичної моделі дозволило отримати залежність коефіцієнта масовіддачі  $K$  від швидкості руху теплоносія в інтервалі зміни швидкостей  $v$  — 0,5 м/с.

$$K = 6,35 \cdot 10^{-9} v. \quad (18)$$

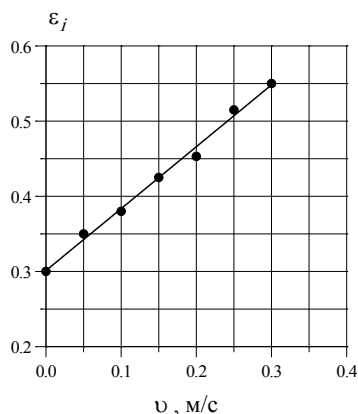


Рис. 2. Залежність вільного об'єму картону від швидкості

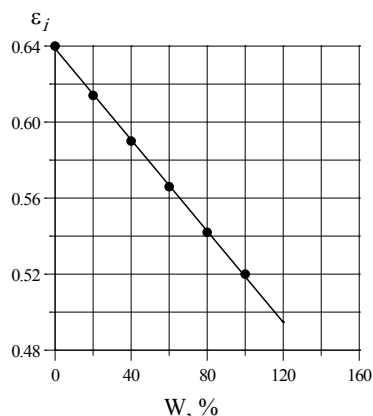


Рис. 3. Залежність вільного об'єму картону від вологості

На рис. 2, 3 показані залежності вільного об'єму картону від швидкості руху теплоносія і вологості матеріалу, які розраховані за отриманими залежностями і добре узгоджуються з дослідними даними.

### Висновки

Отримано залежності, які дозволяють прогнозувати кінетику процесу сушіння з урахуванням зміни швидкості руху теплоносія при фільтраційному зневодненні газопроникних матеріалів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аксельруд Г. А., Ханьк Я. Н., Балабан С. Н. Гидродинамика при движении воздуха через разностенные газопроницаемые материалы. Львов. — 1988. — 5 с. Деп. В ЦНИИТЭИ 28.03.88, № 2125—ЛП.
2. Аксельруд Г. А., Ханьк Я. Н. Фильтрационная сушка плоских газопроницаемых объектов // Теорет. основы хим. технологии. 1990. — Т. 24. — № 3. — С. 402—405.

**Ханьк Ярослав Миколайович** — завідувач кафедри; **Ханьк Андрій Ярославович** — інженер; **Римар Тетяна Іванівна** — аспірант.

Кафедра хімічної інженерії, Національний університет "Львівська політехніка"

**Ковальчук Олександр Васильович** — завідувач кафедри хімії

Вінницький державний педагогічний університет