

3. Семенишин Є.М., Троцький В.І., Федорчук-Мороз В.І. Кінетика екстрагування олії з насіння щиріці загнutoї// Вісник НУ "Львівська політехніка": Хімія, технології речовин та їх застосування. – 2003, № 488. – С. 200-205.

4. Семенишин Є.М., Троцький В.І., Гойсак Н.М., Сеньків В.М. Механізм і кінетика екстрагування олії з насіння ріпаку і виноградної кісточки. Тези доповідей X міжнародної конференції "Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв" (ISCE-99), Львів, 1999. – С. 65-66.

УДК 66.047

*Проф. Я.М. Ханик, д-р техн. наук;
інж. В.М. Кузьма – НУ "Львівська політехніка";
доц. В.М. Гербей, канд. техн. наук – УкрДЛТУ*

ГІДРОДИНАМІКА ПРИ СУШІННІ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ ВИМУШЕНОГО РУХУ ТЕПЛОНОСІЯ КРІЗЬ ПОРИСТУ СТРУКТУРУ

Розглянуто результати теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки при сушінні листових матеріалів шляхом вимушеного руху теплоносія крізь пористу їх структуру.

*Prof. Ya.M. Khanyk; eng. V.M. Kuzma – NU "L'vivs'ka politekhnika";
doc. V.M. Gerbey – USUFWT*

Hydrodynamics at drying deciduous materials by compulsory movement of the heat-transfer medium through their porous structure

In clause is considered results of theoretical and experimental researches of hydrodynamics at drying deciduous materials by compulsory movement of the heat-transfer medium through their porous structure.

Постановка питання. Метод сушіння листових матеріалів, названий "фільтраційним процесом" при обезводненні листових матеріалів різної структурної модифікації і різної природи, описаний в літературі [1].

Він має ряд істотних переваг перед звичайним конвективним сушінням таких причин:

- наявності великої внутрішньої поверхні тепло-масообміну, яка на порядок-два перевищує геометричну поверхню висушеного матеріалу;
- значних градієнтів концентрацій;
- часткового механічного витіснення і винесення вологи, практично без затрат теплової енергії;
- практично повного використання теплової енергії носія.

Такі характерні особливості "фільтраційного сушіння" дають змогу вести процес при "м'яких" режимах, досягти високої якості висушеного матеріалу, при значній його інтенсифікації порівняно з іншими методами при одночасному зниженні питомих енергетичних затрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що такий процес може бути успішно використаний при сушінні листових деревинних матеріалів і матеріалів, сировиною для виготовлення яких є деревина. Однак при застосуванні вказаного методу для сушіння деревини необхідно вивчити гідродинаміку процесу як по сухому матеріалу, так і по вологому. Оскільки гідродинамікою визначаються як енергетичні затрати на сушіння (величина перепаду

тисків) листових матеріалів, так і кінетичні особливості сушіння, які визначаються швидкістю руху теплоносія через капілярно-пористу структуру.

Постановка завдання. Співвідношення між швидкістю руху теплоносія і необхідним перепадом тисків для забезпечення необхідної швидкості руху теплового агента визначається доцільність застосування методу в тому, чи іншому випадку.

При вивченні гідродинаміки по сухому матеріалу встановлюється взаємозв'язок між гідравлічним опором матеріалу, швидкістю руху газу через пористу структуру і товщиною стінки, тобто $\Delta P = f(\omega, H)$. Волога гідродинаміка – вивчення зміни гідравлічного опору, швидкості руху теплоносія і вологості матеріалу в часі в процесі сушіння. У даному випадку має місце нестационарне фільтраційне сушіння, оскільки $\Delta P = \varphi(\tau)$, $\omega = \psi(\tau)$, $\xi = (\tau)$, а ΔP , ω і H однозначно зв'язані між собою.

Нижче наводяться результати теоретичних і експериментальних досліджень гідродинаміки по сухому матеріалу, оскільки в процесі такого сушіння при досягненні рівноважної вологості гідравлічний опір і швидкості руху теплоносія через матеріал приблизно дорівнюють аналогічним величинам сухого досліджуваного об'єкту і результати такого дослідження дають можливість спрогнозувати кінетику сушіння і енергетичні затрати на реалізацію обезводнення.

Одним із важливих питань при вивченні гідродинаміки сухого матеріалу є питання узагальнення результатів досліджень і отримання розрахункових залежностей, які дають змогу розрахувати гідравлічний опір матеріалу залежно від швидкості руху теплоносія і його фізичних властивостей, геометричних розмірів об'єкту, його структурних особливостей.

Аналізуючи літературні джерела, можна зробити висновок, що із великої кількості емпіричних залежностей найбільш зручною є інтерполяційна залежність [2]:

$$\frac{\Delta P}{H} = A\omega + B\omega^2, \quad (1)$$

у якій $A \sim \mu$ а $B \sim \rho$.

Залежність (1) придатна для розрахунку гідравлічного опору зернистого шару будь-якої структури, яка враховує одночасний вплив інерційних і в'язкісних сил. Можливі два крайні випадки [2], коли домінує інерційний або в'язкісний режими. Виходячи з позиції капілярної моделі за межами в'язкісного режиму залежність (1) можна побачити у вигляді:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\rho\omega^2}{2} \cdot \frac{a}{\varepsilon} \cdot f, \quad (2)$$

де f – коефіцієнт тертя в каналі на одиницю довжини зернистого шару.

$$f = \alpha + \frac{\beta}{Re}. \quad (3)$$

Враховуючи те, що дійсна швидкість $\omega_d = \omega / \varepsilon$, а довжина каналу шару дорівнює H_0 / H і використовуючи еквівалентний критерій Re_e , отримаємо:

$$\frac{\Delta P}{H} = f_e \cdot \frac{\alpha}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2}, \quad (4)$$

$$f_e = \alpha \cdot \left(\frac{H_0}{H} \right)^3 \cdot \frac{\beta}{Re_e} \cdot \left(\frac{H}{H} \right)^2. \quad (5)$$

З позиції зовнішньої задачі гідродинаміки для інерційного режиму:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\rho}{c} \cdot \lambda \cdot \varphi(\varepsilon) \cdot n \cdot \rho. \quad (6)$$

Найбільш поширеною практичною залежністю, виходячи з позиції внутрішньої задачі гідродинаміки, є залежність Ергана (2):

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \omega}{d^2} + 1.75 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \omega^2}{d}. \quad (7)$$

Коефіцієнти 150 і 1,75 отримані на основі узагальнення багаточисленних експериментальних даних.

Вибір інтерполяційних залежностей (6) і (7) для узагальнення результатів по гідродинаміці при русі повітря через сухі листові газопроникні матеріали базується на таких допущеннях:

- при русі газу через газопроникні листові матеріали відсутній різкий перехід від ламінарного до турбулентного режимів. Такий перехід є плавним. Крім цього, при одній і тій же фіктивній швидкості руху газу через газопроникний об'єкт внаслідок наявності капілярів різних діаметрів має місце одночасно ламінарний і турбулентний режими. Тому виникає складність з визначенням режиму руху газу і відповідно розрахунку залежності $\alpha = f(Re)$. Інтерполяційна залежність є універсальною, оскільки одночасно враховує вплив сил в'язкості та інерції, відпадає необхідність визначати $\alpha = f(Re)$ і ряд інших величин;
- при узагальненні експериментальних даних за допомогою рівняння (1) необхідно розрахувати лише коефіцієнт пропорційності А і В.

Однак виникає питання можливості застосування рівнянь в розгорнутому вигляді для розрахунку гідравлічного опору листових газопроникних матеріалів, знаючи їх структурні характеристики. Для зернистих матеріалів, як стверджується в роботі [3], числові значення коефіцієнтів, що входять у величини "А" і "В", мають постійне значення.

Як показали наші дослідження, при вивченні гідродинаміки картонів і шпону використання рівняння (1) із вказаними числовими коефіцієнтами, які входять у величини А і В, рівняння (1) неможливе, оскільки числові значення коефіцієнтів змінюються залежно від структурної модифікації газопроникного матеріалу. Спроба узагальнення числових коефіцієнтів залежно від зміни питомої поверхні "α" і пористості "ε" не дало позитивних результатів, тому що загальна питома поверхня матеріалу і його ефективна питома поверхня відрізняються за величиною.

Більш повну характеристику структури листового газопроникного матеріалу дає величина коефіцієнта проникності:

$$k_n = \frac{\omega \cdot \mu \cdot H}{\Delta P}. \quad (8)$$

Вивчення гідродинаміки досліджуваних матеріалів показало, що величина коефіцієнта проникності k_n перебуває в межах $5 \cdot 10^{-14} \div 1,48 \cdot 10^{-13}$ і числові значення коефіцієнта пропорційності, що входять у величини А і В, є функціями величини коефіцієнта k_n .

Рівняння (1) доцільно переписати у вигляді:

$$\frac{\Delta P}{H} = x \cdot \mu \cdot \omega + y \cdot \rho \omega^2, \quad (9)$$

$$x = \frac{x' \cdot \alpha^2}{\varepsilon^3}, \quad y = \frac{y' \cdot \alpha}{\varepsilon^3}. \quad (10)$$

У результаті проведених досліджень встановлено, що в загальному вигляді залежність x і y від коефіцієнта проникності описується рівняннями, що добре узгоджуються з експериментальними даними.

$$\chi = \exp(m - n \cdot k_n) \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

$$\gamma = \exp(k - e \cdot k_n) \cdot \varepsilon. \quad (12)$$

В границях зміни $k_n = 2 \cdot 10^{-11} \div 45 \cdot 10^{-11}$

$$x = \exp(2.5 - 9.61 \cdot 10^9 \cdot k_n), \quad (13)$$

$$y = \exp(11.8 - 7.1 \cdot 10^9 \cdot k_n). \quad (14)$$

Залежності (13) і (14) добре узгоджуються з дослідними даними. Відносна похибка не перевищує 15 %.

На основі отриманих результатів встановлено:

- використовуючи безпосередньо рівняння (1) прогнозування гідродинаміки сухих газопроникних матеріалів неможливо;
- числові значення коефіцієнтів, що входять в рівняння (1), не є величинами постійними;
- коефіцієнти пропорційності x і y є функціями коефіцієнта проникності.

У наведених вище формулах введено такі позначення: ΔP – перепад тисків, Па; ω – швидкість руху теплоносія, м/с; H – товщина шару матеріалу, м; τ – час, с; w – текуча вологість матеріалу, %; A , B – коефіцієнти пропорційності; μ – в'язкість газу, Па·с; ρ – густина газу, кг/м³; α – питома поверхня, м²/кг; ε – вільний об'єм матеріалу; Re – критерій Рейнольда; H_0/H – відношення каналу до висоти шару; α , β – коефіцієнти пропорційності; d – діаметр частинки, м; x' , y' – числові значення коефіцієнтів; m , n , k , e – числові значення коефіцієнтів, що входять у величини x і y .

Література

1. Аксельруд Г.А., Ханік Я.М. Математическая модель фильтрационной сушки плоских объектов// Chemical Engineering. Problems of momentum, Heat and Mass Transfer, Wroclaw. – 1988, № 52. – Р. 65-67.
2. Азрив М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Изд-во "Химия", 1979. – 176.
3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Изд-во "Химия", 1972. – 784.