

ХІМІЯ. ХІМІЧНА, БІОЛОГІЧНА ТА ХАРЧОВА ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.047

С.Балабан¹, канд. техн. наук; Я.Ханик², докт. техн. наук;

Ю.Рассказов¹

¹ Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя,

² Національний університет "Львівська політехніка"

ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ ГАЗОПРОНИКНОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРІАЛУ НА ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР ПРОДУВАННЮ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА ЧЕРЕЗ ЙОГО СТРУКТУРУ

Доведено можливість використання двочленного рівняння типу Форхеймера для проведення розрахунків біжучих значень гідравлічного опору фільтрації сушильного агента через газопроникний волокнистий матеріал в залежності від його вологості і параметрів сушильного агента.

Умовні позначення

ΔP - гідравлічний опір матеріалу, Па;

ΔP_c - гідравлічний опір сухого матеріалу, Па;

H - товщина матеріалу, м;

a - питома поверхня, м²/м³;

ε - пористість матеріалу, м³/м³;

ε_c - пористість сухого матеріалу, м³/м³;

μ - вязкість сушильного агента, Па·с;

ρ - густина сушильного агента, кг/м³;

w_0 - фіктивна швидкість фільтрації сушильного агента, м/с;

W - біжуча вологість матеріалу, %;

W_0^1 - приведена початкова вологість матеріалу, %;

W_p - рівноважна вологість матеріалу, %;

T - температура сушильного агента, К;

$T = 273^\circ$ К;

τ - час сушіння, с;

α, β - кінетичні коефіцієнти;

x, y, A, t - числові коефіцієнти.

Вступ. Для інтенсифікації процесу сушіння газопроникних матеріалів і досягнення значної економії теплової енергії дослідники часто пропонують використовувати у виробництві фільтраційне сушіння. У цьому випадку за допомогою вентиляційного обладнання створюють різницю тиску з двох сторін плоских матеріалів або виробів складної форми. Сушильний агент під дією різниці тисків проходить через структуру пор та капілярів об'єкта, що сушиться, віддає своє тепло, насичується вологою і виводиться з нього. Інтенсифікація сушіння досягається за рахунок багаторазового збільшення поверхні тепломасообміну, більш повного використання теплової енергії сушильного агента і заміни молекулярної дифузії вологи до поверхні матеріалу внутрікапілярним конвективним сушінням.

Аналіз стану питання. Теоретичні і експериментальні дослідження показують, що під час фільтраційного сушіння в матеріалі проходять нестационарні гідродинамічні і тепло-масообмінні процеси. При цьому вологість матеріалу і гідравлічний опір руху сушильного агента через пори і капіляри зменшуються від максимальних значень на початку сушіння до мінімальних при досягненні матеріалом рівноважної вологості $W = W_0$.

Експериментально доведено, що процес фільтраційного сушіння складається з трьох періодів. Для першого періоду характерне механічне витиснення вологи з макропор матеріалу першими порціями сушильного агента. Такий процес можна подати як інтенсивне поршневе витиснення сушильним агентом певної кількості вологи, в результаті чого в повністю заповнених рідиною макрокапілярах утворюються вільні канали. Гідравлічний опір продуванню сушильного агента при цьому швидко зменшується. Але у структурі матеріалу ще залишається значна кількість вологи, яка затримується як за рахунок адсорбційних сил, так і завдяки наявності тупикових каналів, з яких вологи не витискається. В каналах складної форми потоки сушильного агента турбулізуються, розривають плівку вологи і у вигляді туману і дрібних крапель виносять вологу із структури матеріалу. Такі процеси протікають в елементарному шарі і переміщуються у товщині матеріалу за напрямом руху сушильного агента. У міру того, як даний процес переміщується у глибину матеріалу, що сушиться, у верхніх шарах вологи з мікрокапілярів і тупикових пор випаровується. Але на даному етапі сушіння кількість механічно витисненої вологи значно перевищує кількість вологи, що випаровується.

Під час другого періоду фільтраційного сушіння спостерігається як механічне винесення вологи так і її випаровування. При цьому інтенсивність механічного винесення вологи зменшується, а кількість випарованої вологи збільшується. Спільне протікання даних процесів відбувається таким чином, що протягом усього періоду сумарна кількість видаленої вологи за одиницю часу залишається практично постійною.

Протягом третього періоду спостерігається випаровування вологи з пор і капілярів матеріалу, що сушиться. При цьому швидкість сушіння зменшується.

Для групи досліджуваних волокнистих матеріалів перший період фільтраційного сушіння продовжується від 5 до 25 секунд. При цьому вологість матеріалу зменшується від 350%-300% до 150%-90%. Другий період фільтраційного сушіння може продовжуватися від 300 сек. до 25 сек. При цьому вологість матеріалу зменшується до 5%. Практично для досліджуваної групи матеріалів це є рівноважна вологість. Тобто продовжувати фільтраційне сушіння в періоді падаючої швидкості сушіння не доцільно.

Для одержання аналітичної залежності між біжучою вологістю матеріалу, його геометричними характеристиками і параметрами сушильного агента запропоновано [1,2] модель ідеального витиснення. Вона базується на диференціальних рівняннях матеріального балансу в шарі і кінетики процесу сушіння. Розв'язання таких рівнянь дозволяє отримати рівняння кінетики сушіння у вигляді

$$W = (1 - \alpha \cdot e^{-\beta \cdot H} \cdot \tau) \cdot W_0. \quad (1)$$

Для дослідження залежностей між гідродинамічними параметрами запропоновано капілярну модель [3]. При цьому встановлення залежності між гідродинамічними і масообмінними процесами, які відбуваються під час фільтраційного сушіння матеріалу, є складною задачею.

Відомо [4], що для організації фільтраційного сушіння, важливе значення має вивчення закономірностей зміни гідравлічного опору сухих матеріалів в залежності від фіктивної швидкості фільтрації сушильного агента. Для опису цих закономірностей доцільно використовувати двочленне рівняння Форхеймера у вигляді

$$\frac{\Delta P}{H} = x \cdot \frac{a^2 \mu}{\varepsilon^3} \cdot w_0 + y \cdot \frac{a \rho}{\varepsilon^3} \cdot w_0. \quad (2)$$

При цьому коефіцієнти x і y не є постійними, а залежать від пористості ε і питомої поверхні a досліджуваних волокнистих матеріалів.

Мета дослідження – встановити залежності між гідродинамічними і масообмінними процесами, які протікають при фільтраційному сушінні.

Результати дослідження. Аналіз рівняння (2) показує, що із зміною пористості матеріалу змінюється його гідравлічний опір фільтрації сушильного агента через структуру матеріалу. А пористість матеріалу залежить від його вологості. Для одного із типів матеріалів, що характеризуються волокнистою будовою, на основі експериментальних даних, які наведені на рис.1, встановлено, що цю залежність у загальному вигляді можна записати

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - mW. \quad (3)$$

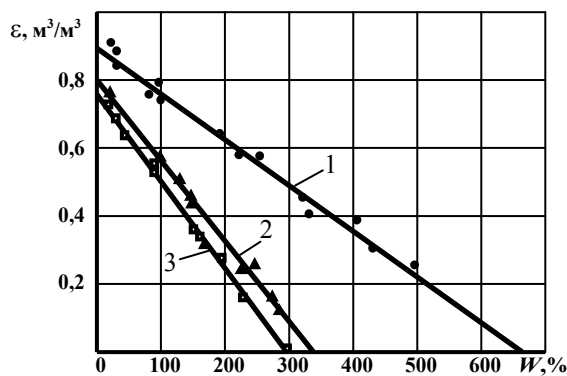


Рис. 1. Вплив вологості на пористість матеріалу:

- 1 – $\varepsilon = 0,895 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $a = 879 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{м}^3$;
- 2 – $\varepsilon = 0,797 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $a = 580 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{м}^3$;
- 3 – $\varepsilon = 0,760 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $a = 530 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{м}^3$

Тоді рівняння (2) набуде вигляду:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{x \cdot a^2 \cdot \mu \cdot w_0 + y \cdot a \cdot \rho \cdot w_0^2}{(\varepsilon_0 - m \cdot W)^3}. \quad (4)$$

Таким чином, рівняння (1) і (4) дозволяють проводити розрахунки біжучих значень гідравлічного опору фільтрації сушильного агента через структуру матеріалу і параметрів сушильного агента.

В табл.1 наведені результати визначення експериментальним шляхом величин коефіцієнтів, що використовуються у рівняннях (1) і (2) для типу волокнистих матеріалів, які досліджуються. Відомо [5], що для даного типу матеріалів, залежність між кінетичним коефіцієнтом α і параметрами сушильного агента має вигляд

$$\alpha = A \cdot \Delta P_c \cdot (T - T_0). \quad (5)$$

Таблиця 1

Залежність значень коефіцієнтів від пористості ε і питомої поверхні a матеріалів з волокнистою будовою

№ п/п	$\varepsilon_c, \text{ м}^3/\text{м}^3$	$a, \text{ м}^2/\text{м}^3$	A	β	$x \cdot 10^{-5}$	$y \cdot 10^{-3}$	m
1	0,895	8790308	$2,4 \cdot 10^{-7}$	36,7	2,78	1,4	0,138
2	0,797	5803160	$2,1 \cdot 10^{-8}$	54,9	23,44	5,1	0,250
3	0,760	5303460	-	-	18,57	5,6	0,262

Відповідність залежності $\Delta P = f(W)$, яку ми одержали за допомогою рівнянь (1), (2) і (5), її експериментальним значенням перевіримо на прикладі сушіння

волокнистого матеріалу пористістю $\varepsilon_c = 0,797 \text{ м}^3/\text{м}^3$ і питомою поверхнею $a = 5803160 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Для цього рівняння (1) і (4) запишемо відповідно

$$W = [1 - 2,1 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta P_c \cdot (T - T_0) \cdot e^{-5,49 \cdot H} \cdot \tau] \cdot W_0^1 \quad (6)$$

і

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{23,44 \cdot 10^{-5} \cdot a^2 \cdot \mu \cdot w_0 + 5,1 \cdot 10^{-3} \cdot a \cdot \rho \cdot w_0^2}{(0,797 - 0,25 \cdot W)^3} \quad (7)$$

Результати експериментальних досліджень кінетики сушіння і гідравлічного опору вологих зразків матеріалу фільтрації сушильного агента показані на рис.2. Експериментальну залежність $\Delta P = f(W)$, показану на рис.3 у вигляді точок, одержуємо шляхом відкладання значень W і ΔP при однаковому часі сушіння.

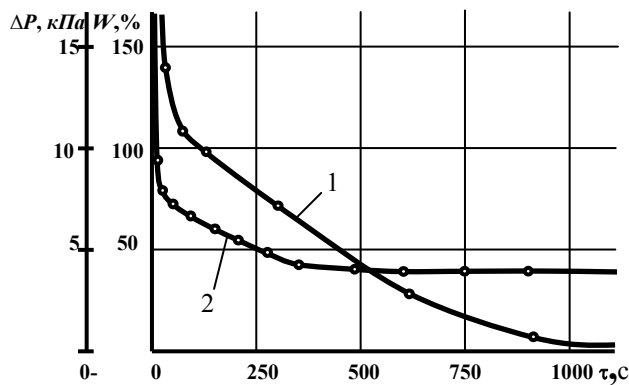


Рис. 2. Результати дослідження кінетики сушіння і біжучих значень гідравлічного опору фільтрації сушильного агента через структуру матеріалу пристрою пористістю $\varepsilon = 0,797 \text{ м}^3/\text{м}^3$ і питомою поверхнею $a = 580 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{м}^3$:
1 – $W = f(\tau)$; 2 – $\Delta P = f(\tau)$

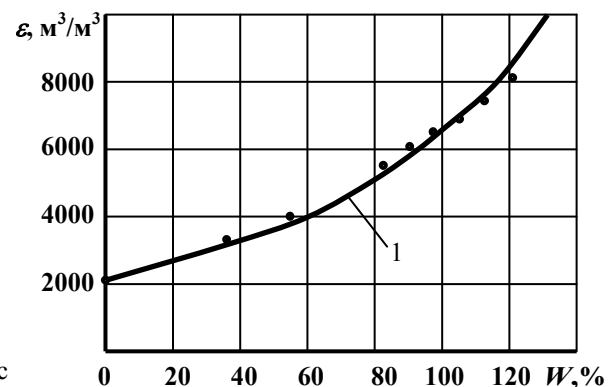


Рис. 3 Вплив вологості на гідравлічний опір матеріалу:
1 – розрахункова залежність; $T = 353^\circ \text{ К}$

Значення залежності $\Delta P = f(W)$, що одержані за допомогою рівнянь (6) і (7), показані на рис.3 у вигляді суцільної лінії. Як видно з рис.3, залежності $\Delta P = f(W)$, одержані розрахунковим і експериментальним шляхом, добре узгоджуються між собою у інтервалі зміни вологості $0 \leq W \leq 110\%$.

Висновки. Наведені результати досліджень підтверджують припущення про те, що між гідродинамічними і масообмінними процесами, які протікають при фільтраційному сушінні, існує взаємний зв'язок, який у першому наближенні можна описати рівняннями (1) і (4). Вказані рівняння можна використовувати для виконання інженерних розрахунків при організації процесу фільтраційного сушіння матеріалів, близьких за будовою і властивостями до матеріалів, що розглянуті у даній роботі.

Для проведення запропонованих розрахунків фільтраційного сушіння необхідні точні значення пористості і питомої поверхні матеріалів, що піддаються сушінню. Для вирішення даної проблеми розроблено спосіб визначення об'єму порового простору і пористості матеріалу. При цьому для досліджень використовують дві робочі рідини, що характеризуються різними змочувальними характеристиками по відношенню до матеріалу і не розчиняються одна в одній.

The possibility to apply binomial equation of the Forhemer type to calculate the hydraulic filtration resistance of the drying agent through the gas penetrating fibre material depending on the humidity and parameters of the drying agent, is proved.

Література

1. Ханьк Я.Н. Исследование сушки газопроницаемых материалов фильтрационным способом. Автореф. дис. канд. техн. наук. –К.: КПИ, 1980.-32 с.
2. Аксельруд Г.А., Ханьк Я.Н., Балабан С.Н.// Химическая технология. -№4(148).-1986.-С.38-42.
3. Аксельруд Г.А., Ханьк Я.Н., Топчий В.И.// ИФЖ. Т.Л.-№6.-1986.-С.959-963.
4. Аксельруд Г.А., Ханьк Я.Н., Балабан С.Н.// Известия вузов. Технология текстильной промышленности.-№3.-1988.-С.84-87.
5. Балабан С.М. Фильтрационная сушка теплоизоляционных материалов. Автореф. дис. канд. техн. наук. –Львов: ЛПИ, 1989.-16 с.

Одержано 23.02.2005 р.