

УДК 66.047

Запропоновано процес фільтраційного сушіння березового шпону у пакеті та приведені експериментальні дослідження процесу внутрішньодифузійного перенесення вологи. Наведено розв'язок диференційного рівняння внутрішньої дифузії для тоненької пластини скінчених розмірів для граничних умов першого роду, на основі якого визначений коефіцієнт внутрішньої дифузії вологи із листів шпону та встановлена його залежність від температури

Ключові слова: березовий шпон, дифузія, фільтраційне сушіння, коефіцієнт внутрішньої дифузії

Предложен процесс фильтрационной сушки березового шпона в пакете и приведены экспериментальные исследования внутридиффузионного переноса влаги. Приведено решение дифференциального уравнения внутренней диффузии для тоненькой пластины конечных размеров для граничных условий первого рода, на основании которого определен коэффициент внутренней диффузии влаги из листов шпона и установлена его зависимость от температуры

Ключевые слова: березовый шпон, диффузия, фильтрационная сушка, коэффициент внутренней диффузии

ВНУТРІШНЬОДИFUZІЙНЕ ПЕРЕНЕСЕННЯ ВОЛОГИ ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ БЕРЕЗОВОГО ШПОНУ

Д. П. Кіндзера

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: Kindzera74@ukr.net

В. М. Атаманюк

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: atamanyuk@ukr.net

Б. М. Микичак

Кандидат технічних наук*

E-mail: zf_nuht.bigmir.net

*Кафедра хімічної інженерії

Національний університет "Львівська політехніка"
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

Струганий шпон широко застосовується як личкувальний матеріал в меблевій промисловості. Технологія його виготовлення є багатостадійною та енергоємною. Найвищими затратами енергії характеризується стадія сушіння останнього від вологовмісту 120...40 % до 6...12 % [1, 2]. В зв'язку з недосконалістю технологічного обладнання та низькою ефективністю використання теплової енергії [3–5], необхідними є дослідження альтернативних методів сушіння шпону з точними розрахунками та обґрунтуванням технологічних параметрів процесу із подальшим створенням раціональних конструкцій енергоощадних сушильних установок, які б забезпечували інтенсивне сушіння та високу якість шпону. Фільтраційне сушіння шпону у пакетах дає змогу максимально використовувати сушильний потенціал теплового агента, і, відповідно, в порівнянні з існуючим обладнанням, знизити енергетичні затрати на процес сушіння і забезпечити високу якість висушеного шпону [6].

Явища перенесення вологи під час фільтраційного сушіння шпону у пакеті визначаються як закономірностями зовнішньодифузійного, так і закономірностями внутрішньодифузійного процесів. Після видалення вологи з поверхневого шару листів шпону у процесі фільтраційного сушіння настає період, швидкість якого визначається підведенням

вологи з середини матеріалу. Волога дифундує у капілярах деревини до зовнішньої поверхні листів і переходить у пароподібний стан із поверхні, що контактує з тепловим агентом. Під час цього відбувається заглиблення зони випаровування. Внутрішньодифузійні процеси є значно тривалішими в часі, у порівнянні зі зовнішньодифузійними, і для аналізу останніх необхідним є визначення коефіцієнта дифузії вологи до поверхні матеріалу [7]. Коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w враховує не лише молекулярну дифузію, але і інші методи переміщення вологи, у тому числі переведення її у пароподібний стан і визначення останнього є важливим, однак доволі складним завданням. Важливо також визначити зміну даного коефіцієнта залежно від температури, оскільки це підвищує точність розрахунків.

2. Аналіз джерел літератури та постановка задачі

На основі проведеного аналізу робіт щодо внутрішньодифузійних перенесень вологи під час сушіння, відзначено, що виникає проблема під час моделювання останніх. Авторами робіт [8–10] внутрішньодифузійні процеси перенесення вологи досліджувались для різних дисперсних матеріалів. Автором роботи [8] на основі проведених досліджень та апроксимації даних визначено коефіцієнти внутрішньої дифузії вологи із частинок подрібненої

“енергетичної” верби (частинок циліндричної форми) та встановлена залежність останнього від температури теплового агенту:

$$D_w^t = D_w^{293} + 0,427 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 293). \quad (1)$$

Встановлено, що значення коефіцієнта дифузії вологи в навколишнє середовище під час сушіння залежить від структурної будови частинок, вологовмісту та температури теплового агента.

В роботі [9] вивчалися процеси дифузії вологи з частинок кулястої форми, розроблено математичну модель розподілу вологи у частинці під час її сушіння та отримано розв’язок диференціального рівняння, що дає змогу визначити характер розподілення вологовмісту у порах твердої частинки під час другого періоду сушіння та встановлено залежність D_w від зовнішньої гідродинаміки:

$$\frac{D_w}{D_0} = 2,77 \cdot 10^{-2} \cdot Re^{0,32}, \quad (2)$$

у межах зміни числа Рейнольдса $650 \leq Re \leq 2200$.

В роботі [10] описано процес внутрішньої дифузійного масоперенесення під час сушіння сирцевої гранули шлакового гравію, що має також кулясту форму, однак значно відрізняється своєю внутрішньою структурою та пористістю від попередніх матеріалів. Автором визначено коефіцієнти внутрішньої дифузії вологи із частинок та встановлена залежність цього коефіцієнта від температури теплового агенту:

$$D_w^t = D_w^{293} + 2,5 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 293). \quad (3)$$

Наведені у цих роботах залежності є справедливими лише для досліджуваних матеріалів, які характеризуються певною пористістю та внутрішньою структурою і застосовувати їх для розрахунку коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи під час фільтраційного сушіння березового шпону у пакеті не можна, тому дослідження внутрішньодифузійних процесів фільтраційного сушіння шпону є актуальною задачею.

3. Мета та завдання досліджень

Метою роботи є експериментальне дослідження внутрішньодифузійного перенесення вологи у листі березового шпону під час його фільтраційного сушіння у пакеті.

Для досягнення поставленої мети необхідно експериментально дослідити кінетику фільтраційного сушіння струганого березового шпону у пакеті та визначити коефіцієнти внутрішньої дифузії вологи залежно від температури теплового агенту.

4. Експериментальні дослідження внутрішньодифузійного перенесення вологи

Об’єктом досліджень виступали листи лущеного березового шпону товщиною 1,5 мм, початкова середня вологість яких складала 58 % і була обумовлена

наявністю в шпоні вільної (капілярної) вологи, яка містилася в порожнинах клітин та міжклітинних проміжках та зв’язаної вологи, яка знаходилася у клітинах.

Експериментальні дослідження внутрішньої дифузійних процесів перенесення вологи під час фільтраційного сушіння березового шпону у пакеті проводили на експериментальній установці та згідно розроблених методик [6]. Висота листа шпону 30 мм (в напрямку руху теплового агенту) була вибрана з метою забезпечення участі всієї поверхні листа у тепло- і масообміні, а також постійності температура теплового агенту вздовж всієї поверхні листа. Пакет шпону формували із листів лущеного березового шпону розміром 100x30x1,5 мм. Розмір пакету, утвореного з листів шпону з склотекстолітовими прокладками, товщиною 0,8 мм між останніми, становив 100x100x30 мм.

Розподілення вологовмісту у твердому тілі у випадку нестационарної молекулярної дифузії описується другим законом Фіка [11]:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w^c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w^c}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

Висота та ширина листа шпону у пакеті значно перевищує його товщину δ , тому можемо розглядати його як необмежену пластину (рис. 1). Позначимо товщину листа шпону $2 \cdot \delta^*$, а кожну з половинок через δ^* . Якщо прийняти, що товщина листа співпадає з віссю x , то вологовміст змінюється з часом лише відносно осі x ,

тобто $\frac{\partial^2 w^c}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 w^c}{\partial z^2} = 0$.

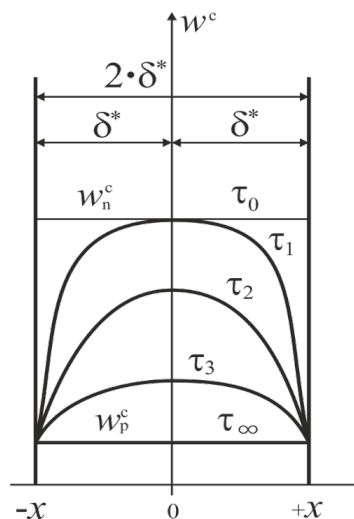


Рис. 1. Схема розподілу вологовмісту по товщині листа шпону

У початковий момент часу τ_0 вологовміст однаковий по товщині листа шпону і дорівнює w_n^c . Процес сушіння можливий до стану рівноваги (рівноважний вологовміст w_p^c). Розподіл вологовмісту по товщині листа шпону за інших часових проміжків сушіння (τ_1, τ_2, τ_3) є параболічним, оскільки нагрівання листа відбувається рівномірно з обох сторін за рахунок

теплого агента. Тому задача є симетричною відносно осі абсцис.

Диференціальне рівняння (4) для листа шпону прийме вигляд:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \frac{\partial^2 w^c}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0, -\delta < x < +\delta). \quad (5)$$

З крайовими умовами:

$$w^c(x, 0) = w_n^c. \quad (6)$$

З метою визначення граничних умов, орієнтовно визначимо число Біо $(Bi = \frac{\beta \cdot \delta}{D_w})$, яке характеризує зовнішньо- ($Bi < 50$) чи внутрішньодифузійну ($Bi > 50$) область протікання процесу.

Для визначення числа Біо визначимо найменший коефіцієнт масовиддачі $\beta = 0,05 \frac{M}{C}$ для $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м [6]. Аналіз багатьох робіт [6–10] щодо сушіння вологих матеріалів показує, що коефіцієнт внутрішньої дифузії знаходиться в межах $D_w \approx 10^{-9} \div 10^{-12} \frac{M}{C}$. Прийmemo найбільше значення $D_w = 10^{-9} \frac{M}{C}$. Тоді число Біо буде дорівнювати:

$$Bi = \frac{0,05 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-9}} = 7,5 \cdot 10^4.$$

Зважаючи на отримане значення числа Біо, режим сушіння для наших умов є внутрішньодифузійним, що дає змогу скористатися граничними умовами першого роду:

$$w^c(\pm\delta, \tau) = w_p^c. \quad (7)$$

Симетричний розподіл значень вологовмісту w^c дає змогу записати другу граничну умову:

$$\frac{\partial w(0, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (8)$$

Розв'язок рівняння (5) з крайовими умовами (6)–(8) можна представити аналогічно до задачі про теплопровідність [12] і для наших умов може бути записаний у наступному вигляді:

$$\frac{w^c - w_p^c}{w_{кр}^c - w_p^c} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos \mu_n \cdot \frac{x}{\delta} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo}, \quad (9)$$

де $A_n = \frac{2}{\mu_n} \cdot (-1)^{n+1}$;

$Fo = \frac{D_w \cdot \tau}{\delta^2}$ – критерій Фур'є;

μ_n – корені характеристичного рівняння,

$$\mu_n = (2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2}.$$

Розв'язок рівняння (9) дає змогу визначити вологовміст у кожній точці листа шпону у будь-який момент часу τ , що значно підвищує точність подальших розрахунків. Очевидно, що експериментально визначити розподіл вологовмісту є неможливо, тому що у експериментальних дослідженнях визначається його середнє значення $\bar{\omega}^c$ у листі шпону для певного часу τ .

Середній вологовміст $\bar{\omega}^c$ може бути визначений згідно залежності:

$$\bar{w}^c = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w^c(x, \tau) dx. \quad (10)$$

Використовуючи залежність (9) з врахуванням (10), одержимо розв'язок для визначення середнього вологовмісту $\bar{\omega}^c$ у часі:

$$\frac{\bar{w}^c - w_p^c}{w_{кр}^c - w_p^c} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo}, \quad (11)$$

де $B_n = \frac{8}{(2 \cdot n - 1)^2 \cdot \pi^2}$.

Залежність (11) можна використати для визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи D_w у листах лущеного березового шпону.

Відомо, що для регулярного режиму достатньо скористатися лише першим членом коренів характеристичного рівняння, тоді (11) можна представити у вигляді:

$$\frac{\bar{w}^c - w_p^c}{w_{кр}^c - w_p^c} = B_1 \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo}, \quad (12)$$

де $B_1 = \frac{8}{\pi^2}$; $\mu_1 = \frac{\pi}{2}$.

Прологарифмувавши залежність (12) отримаємо:

$$\ln \left(\frac{\bar{w}^c - w_p^c}{w_{кр}^c - w_p^c} \right) = \ln B_1 - \mu_1^2 \cdot Fo, \quad (13)$$

у напівлогарифмічній системі координат залежність (13) представляє собою рівняння прямої лінії відносно часу, з якої можна визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w , як тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис.

Для визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії D_w залежно від температури, лист шпону з розмірами 100x100x1,5 мм з початковим середнім вологовмістом $\omega^c = 16 \pm 0,5$ % поміщали у контейнер і висушували за різних температур ($T = 323, 353, 373$ і 393 К). Результати експерименту наведені на рис. 2.

Експериментальні дані (рис. 2) представляли у вигляді графічної залежності від часу сушіння (рис. 3), яка має лінійну залежність для всіх досліджуваних температур (323, 353, 373, 393 К), що підтверджує правомірність використання лише першого члена суми залежності (11).

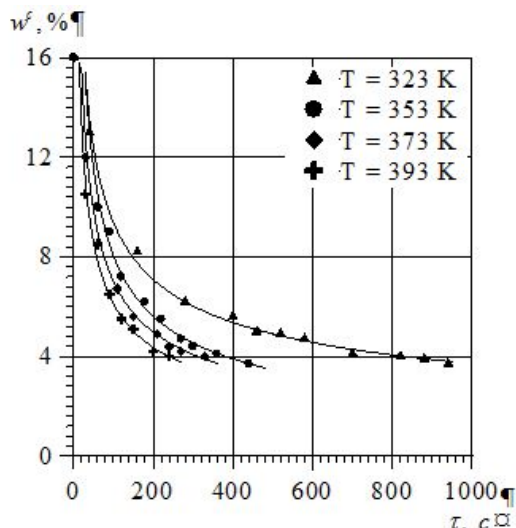


Рис. 2. Кінетика фільтраційного сушіння шпону у пакеті за різних температур теплового агенту

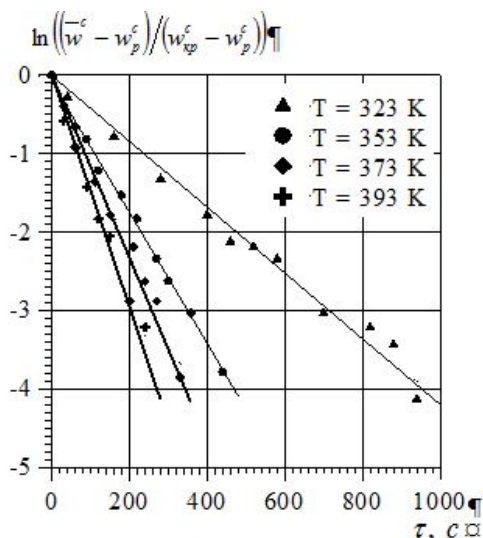


Рис. 3. Залежність $\ln\left(\frac{w^c - w_p^c}{w_{kp}^c - w_p^c}\right)$ від часу сушіння луценого березового шпону τ

Враховуючи те, що:

$$\text{tg}\alpha = \mu_1^2 \cdot \frac{D_w}{\delta^2}, \tag{14}$$

за тангенсом кута нахилу прямих до осі абсцис визначали коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w :

$$D_w = \frac{\text{tg}\alpha \cdot \delta^2}{\mu_1^2} = \frac{4 \cdot \text{tg}\alpha \cdot \delta^2}{\pi^2}. \tag{15}$$

Визначені коефіцієнти внутрішньої дифузії D_w вологи наведено у табл. 1. та у вигляді графічної залежності $D_w^* = f(T)$ (рис. 4). Очевидно, що температурний фактор має найбільш значимий вплив на коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w .

З рис. 4 видно, що із зростанням температури теплового агенту значення коефіцієнту внутрішньої дифузії D_w вологи з листа шпону зростає лінійно.

Таблиця 1

Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи D_w від температури

T, K	323	353	373	393
$D_w^* \cdot 10^9$	0,96	1,91	2,66	3,37

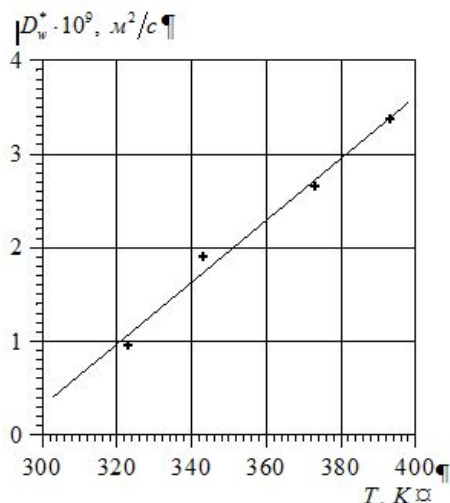


Рис. 4. Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії D_w^* від температури для листів луценого березового шпону T

Апроксимація експериментальних даних, наведених на рис. 4, лінійною функцією дала змогу отримати розрахункову залежність:

$$D_w^t = D_w^{293} + 33 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293). \tag{16}$$

Одержану залежність (16) можна використовувати для розрахунку внутрішнього волого перенесення в межах зміни температури теплового агенту $300 \leq T \leq 400$ K, а також для розрахунку часу фільтраційного сушіння листів шпону у пакеті у другому періоді.

5. Висновки

Експериментально досліджено кінетику фільтраційного сушіння струганого березового шпону у пакеті. Встановлено, що процес сушіння відбувається у другому періоді і носить внутрішньодифузійний характер. Наведено розв'язок диференційного рівняння внутрішньої дифузії для умов задачі першого роду. Визначений коефіцієнт внутрішньої дифузії вологи із листів березового струганого шпону та встановлена його залежність від температури теплового агенту. Запропонована розрахункова залежність (16) дає змогу визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії залежно від температури теплового агенту з точністю $\pm 9,7\%$.

Література

- Бехта, П. А. Виробництво і обробка луценого та струганого шпону [Текст] / П. А. Бехта. – Київ, 1995. – 296 с.

2. Бехта, П. А. Виробництво шпону [Текст] / П. А. Бехта. – Київ, 2003. – 256 с.
3. Білей, П. В. Ефективність використання теплової енергії під час виготовлення шпону і фанери [Текст] / П. В. Білей, І. В. Петришак, І. А. Соколовський // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук-техн. пр. – 2008. Вип. 18.9. – Львів, – С.121-118.
4. Озарків, І. М. Кінетика і динаміка процесу сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів [Текст] / І. М. Озарків, І. А. Соколовський, О. І. Озарків, В. С.Козар. // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук-техн. пр. – 2012. Вип. 22.1. – Львів, – С.346-343.
5. Мисак, Й. С. Розрахунок температурно-вологісних полів в радіаційній сушарці на основі рівняння теплового балансу та кінетики процесу сушіння [Текст] / Й. С. Мисак, І. М. Озарків, В. С. Джигирей, О. М. Кушпін, О. І. Озарків. // Вісник інженерної академії наук України, – 2008. Київ, – №3–4 С. 280-284.
6. Мукучак, В. External heat-and-mass transfer during drying of packed birch peeled veneer [Текст] / В. Мукучак, Р. Білей, Д. Кіндзера. // Chemistry and Chemical Technology. Vol. 7, No 2. – Lviv, 2013. – P. 195-191.
7. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой [Текст] / С. П. Рудобашта. – Москва, 1980. – 248 с.
8. Мосюк, М. І. Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої «енергетичної» верби в стаціонарному шарі [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08. / М. І. Мосюк; [Національний університет «Львівська Політехніка» МОН України]. – Львів, 2012. – 22 с.
9. Атаманюк, В. М. Внутрішньодифузійне масоперенесення під час сушіння кам'яного вугілля. [Текст] / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладный журнал. Том 31, № 2. – Київ, 2009. – С. 36 – 41.
10. Atamanyuk, V. Intradiffusion mass transfer during drying of slag gravel raw granule. [Текст] / V. Atamanyuk, Ya. Gumnitsky, I. Barna // Chemistry & Chemical Technology Vol. 7, No 4, – Lviv, 2013. – P.129-137.
11. Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. [Текст] / Н. И. Гельперин. – Москва, 1981. – 812 с.
12. Лыков, А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – Москва, 1967. – 599 с.