

УДК 66.047 Проф. Я.М. Ханик, д-р техн. наук; пошукувач Б.М. Микичак;
доц. Д.П. Кіндзера – НУ "Львівська політехніка";
доц. Я.Д. Ярош, канд. техн. наук – Державний
аграрно-екологічний ун-ет м. Житомир

КОНВЕКТИВНЕ СУШІННЯ ШПОНУ ТА ПРОБЛЕМИ УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наводимо проблему узагальнення результатів сушіння конвективним методом і порівнюємо його основні характеристики з характеристиками фільтраційного процесу сушіння.

Ключові слова: конвекція, сушіння, фільтраційне сушіння, період.

*Prof. Ya.M. Khanyk; competitor B.M. Mukuchak; assoc. prof. D.P. Kindzera –
NU "Lviv polytechnica; assoc. prof. Ya.D. Yarosh – State university
of agrarian and ecology*

Convection drying of veneer and problems of extension results

The problem of extension results of drying by convections method and comparison the basic its characteristics with characteristics of filtration process of drying.

Keywords: convection, drying, filtration drying, period.

Постановка проблеми. При конвективному сушінні матеріалів в умовах першого періоду на швидкість протікання процесу, як відомо [1], впливають швидкість підведення тепла до поверхні матеріалу, що висушується і швидкість відведення випаруваної вологи з його поверхні. Швидкість підведення тепла до поверхні матеріалу характеризується коефіцієнтом тепловіддачі α і різницею температур теплоносія і поверхні матеріалу. Основна складність виникає при визначенні коефіцієнта тепловіддачі α . Внаслідок складної залежності коефіцієнта тепловіддачі від великого числа чинників неможливо аналітично отримати розрахункову залежність для розрахунку α . Лише шляхом узагальнення дослідних даних з допомогою теорії подібності [2] можна отримати узагальнене рівняння для типових випадків тепловіддачі, яке дає змогу розрахувати α для умов конкретної задачі. Однак, для визначення коефіцієнта тепловіддачі необхідно знати температурний градієнт біля стінки матеріалу. Вихідною залежністю для узагальнення дослідних даних щодо тепловіддачі є загальний закон розподілення температур в потоці, який вира-

жається диференціальним рівнянням конвективного теплообміну [3], яке отримуємо, виходячи з наступних міркувань.

Аналіз останніх досліджень. Виділимо в потоці теплоносія елементарний паралелепіпед з ребрами dx , dy , dz . Прийmemo, що густина теплоносія ρ , коефіцієнт теплопровідності λ і питома теплоємність C_p постійні. Температура потоку змінюється вздовж граней паралелепіпеда. Проекції швидкості руху потоку ω на осі координат x , y , z становлять відповідно ω_x , ω_y , ω_z . Все тепло, що підводиться до потоку іде на зміну ентальпії. Тепло, переноситься в потоці шляхом конвекції і теплопровідності [3].

Кількість тепла що вноситься в елементарний об'єм dV описуємо рівнянням [3]:

$$dQ_{\text{кон}} = -\rho \cdot C_p \left(\frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z \right) dV \cdot d\tau. \quad (1)$$

Кількість тепла, що вноситься в паралелепіпед за час $d\tau$ шляхом теплопровідності становить:

$$dQ_{\text{менл}} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dV \cdot d\tau. \quad (2)$$

В сушарці кількість тепла, що підводиться конвекцією і теплопровідністю:

$$dQ_{\text{кон}} + dQ_{\text{менл}} = -\rho \cdot C_p \left(\frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z \right) dV d\tau = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dV d\tau. \quad (3)$$

Підведене тепло рівне відповідній зміні ентальпії паралелепіпеда [3]:

$$dQ = C_p \cdot \rho \cdot dV \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau. \quad (4)$$

У підсумку отримаємо [3]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

де $a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$.

Рівняння (5) виражає в найбільш загальному вигляді розподілення температур у рухомому середовищі. Аналітичний розв'язок рівняння (5) в загальному вигляді не можна отримати. Використовуючи теорію подібності [2], рівняння (5) може бути замінено критеріальним рівнянням (рівнянням безрозмірних комплексів):

$$Nu = f \left(\text{Re}, \text{Pr}, \frac{L_1}{L_0}, \dots, \frac{L_n}{L_0} \right); \quad Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}; \quad \text{Pr} = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}, \quad (6)$$

де: Nu – критерій Нуссельта; Pr – критерій Прандтля, L_1, \dots, L_n – основні геометричні розміри. Критеріальні рівняння представляють у вигляді:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = C \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^n \cdot \left(\frac{l}{d} \right)^p, \quad (7)$$

де: C, m, n, p – величини, що визначаються із досліду.

Диференціальне рівняння конвективного масообміну має вигляд [3]:

$$w_x \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

і виражає закон розподілення концентрації цього компонента в рухомому середовищі при встановленому потоці масообміну.

Рівняння (8) зі структури аналогічне рівнянню конвективного теплообміну (5) і відрізняється лише градієнтом (замість температурного градієнта входить градієнт концентрації) [3]. У диференціальному рівнянні масообміну в рухомому середовищі, (8) окрім концентрації, змінною є швидкість потоку. Тому, його необхідно розглядати сумісно з диференціальним рівнянням Нав'є-Стокса і рівнянням нерозривності потоку [3].

$$\text{Рівняння Нав'є-Стокса:} \quad \begin{cases} \rho \frac{dw_x}{d\tau} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot w_x; \\ \rho \frac{dw_y}{d\tau} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot w_y; \\ \rho \frac{dw_z}{d\tau} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot w_z. \end{cases} \quad (9)$$

Рівняння нерозривності потоку

$$\text{Якщо } \frac{\partial P}{\partial \tau} = 0,$$

$$\text{тобто} \quad \left(\frac{\partial(\rho \cdot w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w_z)}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

Однак ця система рівнянь не має аналітичного розв'язку і для отримання розрахункових залежностей масообміну використовують перетворення диференційного рівняння конвективного масообміну у рухомому середовищі. Застосовуючи теорію подібності, отримують критеріальні рівняння для розрахунку коефіцієнта масообміну [3].

Постановка завдання. Ми провели дослідження кінетики сушіння листових матеріалів (шпону), отримавши при цьому залежності зміни вологості в часі. Однак для прогнозування процесу важливе значення має створення математичних моделей або використання існуючих.

Коли процес протікає як у першому, так і в другому періодах сушіння і кінетична крива складається з періоду постійної і падаючої швидкостей, проходить поверхнею матеріалу, а пара, яка утворюється дифундує в навколишнє середовище. Таким чином, характер протікання процесу визначається механізмом перенесення вологи в матеріалі і механізмом перенесення вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище через пограничний шар, який розміщений біля самої поверхні матеріалу. Потік вологи в матеріалі описуємо рівнянням:

$$j = \alpha_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla u - \alpha_m^T \cdot \rho_0 \cdot \nabla T - K_p \cdot \nabla P \quad (11)$$

де: α_m – коефіцієнт дифузії вологи, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_0 – густина сухого скелету тіла, $\text{кг}/\text{м}^3$; K_p – величина, що характеризує молярне перенесення вологи під впливом градієнту тиску; α_m^T – коефіцієнт термодифузії у вологому тілі, $\text{м}^2/\text{с}$; ∇P – градієнт парціального тиску парів вологи, Па; ∇u і ∇T – відповідно, фіксовані значення вологості і температури, % та $^\circ\text{C}$.

В ізотермічних умовах і при малих перепадах температури в пограничному шарі вологого повітря різницю хімічних потенціалів можна замінити різницею парціальних тисків [1]:

$$j = \alpha_p \cdot (P_n - P_c), \quad (12)$$

де: α_p – коефіцієнт вологообміну, $\text{с}/\text{м}$; $(P_n - P_c)$ – різниця парціальних тисків, Па.

Підведення тепла до поверхні матеріалу в період постійної швидкості в процесі конвективного теплообміну описуємо рівнянням [3]:

$$q_n = \alpha_q \cdot (t_c - t_n), \quad (13)$$

де: q_n – густина потоку тепла, $\text{Вт}/\text{м}^2$; α_q – коефіцієнт теплообміну, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; t_c – температура теплоносія, $^\circ\text{C}$; t_n – температура поверхні матеріалу, $^\circ\text{C}$.

Тобто, у період постійної швидкості сушіння між залежностями теплообміну і масообміну існує взаємозв'язок. Якщо все тепло необхідне для випаровування вологи, підводиться з навколишнього середовища тільки шляхом конвективного теплообміну, а температура матеріалу залишається постійною $dt/d\tau = 0$, то інтенсивність випаровування пропорційна густині потоку тепла на поверхні тіла [1]:

$$j_n = \frac{q_n}{r} = \frac{N}{100} \cdot R_v \cdot \frac{\rho_0}{r} = \left(\frac{dW}{d\tau} \right)_0 \cdot \frac{R_v \cdot \rho_0}{100 \cdot r}, \quad (14)$$

де: N – швидкість сушіння в періоді постійної швидкості, %/с; $N = (dW/d\tau)_0$; R_v – відношення об'єму тіла до його поверхні, $\text{м}^3/\text{м}^2$; ρ_0 – густина тіла, $\text{кг}/\text{м}^3$; r – питома теплота пароутворення, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Рівняння (14) після перетворень можна представити у вигляді залежності:

$$\frac{\alpha_q}{r} \cdot (t_c - t_n) = \alpha_p \cdot (P_n - P_c) = \frac{N \cdot \rho_0 \cdot R_v}{100 \cdot r}. \quad (15)$$

Як видно з рівняння (15), швидкість сушіння в першому періоді можна розрахувати як за залежність Дальтона, так і за залежністю Ньютона. Максимальні величини швидкості руху теплоносія обумовлюються співвідношенням швидкості процесу і енергетичними затратами на сушіння. Максимальна температура теплоносія обумовлюється як термічною стійкістю висушуваного матеріалу і енергетичними затратами, так і технологічними показниками. В разі сушіння матеріалу у першому періоді, інтенсивність процесу можна прирівняти до інтенсивності випаровування води з вільної поверхні при однакових режимах [1]. Такий тепло – масообмінний процес описуємо рівнянням:

$$\begin{cases} q_n = \alpha_n \cdot (t_c - t_n) = Nu_q \cdot \frac{\lambda_g}{l} \cdot (t_c - t_n); \\ j_n = \alpha_p \cdot (P_n - P_c) = Nu_m \cdot \frac{D_p}{l} \cdot (P_n - P_c), \end{cases} \quad (16)$$

де: λ_g – коефіцієнт теплопровідності вологого повітря, Вт/м·°С; D_p – коефіцієнт дифузії пари в повітрі, віднесений до різниці тисків, с/м; l – довжина поверхні тіла вздовж потоку газу, м. Індeksi "П" і "С" – означають поверхню тіла і навколишнє середовище.

У період постійної швидкості сушіння температура матеріалу постійна і все тепло передане матеріалу, йде на випаровування вологи, тому, згідно з законом збереження енергії, можна записати:

$$q_n = j_n \cdot r, \quad (17)$$

або
$$q_n = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot N \cdot \frac{1}{100}, \quad (18)$$

де: j_n – інтенсивність випаровування, %/с·м²; q_n – інтенсивність теплообміну, Вт/м²; N – швидкість сушіння в першому періоді, %/с.

За величиною швидкості сушіння N можна визначити інтенсивність теплообміну q_n і, навпаки, знаючи інтенсивність теплообміну q_n , можна визначити швидкість сушіння N . Виходячи з викладених вище міркувань, у роботі А.В. Ликова [1] наведено критеріальну залежність для розрахунку постійної швидкості сушіння:

$$Ki_{q0} = Ki_{m0} \cdot Lu \cdot K_0. \quad (18)$$

Теплообмінний і масообмінний критерії Кірпічова дорівнюють:

$$Ki_{q0} = \frac{q_n \cdot R_v}{\lambda \cdot T_c}; \quad (19)$$

$$Ki_{m0} = \frac{j_n \cdot R_v}{\alpha_m \cdot \rho_0 \cdot \bar{U}_0}, \quad (20)$$

де: λ – коефіцієнт теплопровідності вологого тіла, Вт/м·К; \bar{U}_0 – вологовміст тіла, кг/кг. У (18) змінні Lu і K_0 визначаються за такими формулами:

$$Lu = \frac{\alpha_m}{\alpha}, \quad K_0 = \frac{r \cdot \bar{U}_0}{c \cdot T_c}, \quad (21), (22)$$

де: Lu – критерій Ликова; K_0 – критерій Косовича; α – коефіцієнт теплопровідності вологого тіла, м²/с; c – питома теплоємність вологого тіла, Дж/кг·°С.

Рівняння (17) і (18) є основними залежностями для періоду постійної швидкості. Наведені залежності (17) і (18) є складними для практичного застосування. Причини незручності полягають у тому, що вони повинні бути доповнені рівнянням для розрахунку q_n і j_n , а точніше, для розрахунку коефіцієнтів масовіддачі та тепловіддачі, які по-своєму залежать не тільки від швидкості руху теплоносія, але й від фізичних властивостей газового потоку, вологого тіла, його геометрії і методу контактування з потоком. У критерій

K_i входить величина інтенсивності сушіння j_n в першому періоді, яка по своєму залежить від q_n , а коли брати в основу швидкість сушіння N в першому періоді, то необхідно мати залежності, які описують її взаємозв'язок з параметрами сушіння. Крім цього, такі фізичні величини, які входять у критерій як λ , α , C будуть мінятися в часі зі зміною вологості матеріалу. Власне через це виникає необхідність у додаткових залежностях, необхідних для використання рівняння (18) в інженерних розрахунках при прогнозуванні кінетики сушіння в першому періоді.

Якщо кінетика процесу досліджуваного матеріалу характеризується наявністю як першого, так і другого періодів, то для узагальнення результатів у другому періоді використовують приблизне рівняння сушіння з мінімальною кількістю констант [1]. Для того, щоб скористатися основним рівнянням кінетики сушіння, необхідно знати залежність між вологістю тіла і часом [1, 3]. Цю залежність можна отримати шляхом розв'язку системи диференціальних рівнянь волого- і теплоперенесення, для цього необхідно знати залежність коефіцієнтів перенесення вологості і зміни температури. Задача є складною в аналітичному відношенні, оскільки вона є не лінійною, тому і є практичною цінністю щодо отримання приблизної, але достатньо надійної залежності з мінімальною кількістю констант, які визначаються експериментально і добре описують процес зміни вологості матеріалу у другому періоді. Виходячи із складеного вище, узагальнення результатів кінетики сушіння в умовах падаючої швидкості базується на приблизному рівнянні сушіння для другого періоду і узагальненні швидкості сушіння у першому періоді у вигляді степеневі функції.

Рівняння сушіння у другому періоді має вигляд [1]:

$$-\frac{dW}{d\tau} = K(W - W_p); \quad (23)$$

$$K = \frac{N}{W_{kp} - W_p} = \chi \cdot N, \quad (24)$$

де: N – швидкість сушіння у першому періоді, %/с; K – коефіцієнт сушіння, який залежить від режиму сушіння і прямо пропорційний швидкості сушіння у першому періоді, 1/с; W , W_p , W_{kp} – відповідно поточна, рівноважна і критична вологості, %; χ – відносний коефіцієнт сушіння, який залежить від властивостей матеріалу і початкової вологості, 1/%.

Інтегрування рівняння (23) дає можливість отримати залежність

$$\frac{W - W_p}{W_{kp} - W_p} = \exp(-K(\tau - \tau_{kp})) = \exp(-\chi \cdot N(\tau - \tau_{kp})). \quad (25)$$

Щоб визначити значення коефіцієнта K , рівняння (25) необхідно представити у координатах $\lg(W - W_{kp}) = f(\tau)$. Тангенс кута нахилу прямої чисельно рівний коефіцієнту сушіння K .

$$K = \frac{2,3 [\lg(W_1 - W_p) - \lg(W_2 - W_p)]}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (26)$$

де: W_1, W_2 – поточні значення вологості у другому періоді в моменти часу τ_1 і τ_2 відповідно.

Кінетику сушіння матеріалу у першому періоді описуємо рівнянням, яке дійсне для умов $W \geq W_{кр}$:

$$W = W_0 - N \cdot \tau, \quad (27)$$

де: W_0 – початкова вологість, %; W – поточна вологість, %.

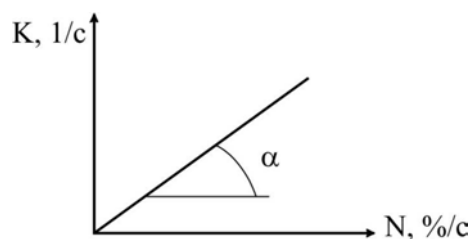
При досягненні $W_{кр}$:

$$W_{кр} = W_0 - N \cdot \tau_{кр}. \quad (28)$$

Час, якому відповідає $W_{кр}$, визначаємо з рівняння:

$$\tau_{кр} = \frac{W_0 - W_{кр}}{N}. \quad (29)$$

Щоб узагальнити результати кінетики сушіння у другому періоді необхідно визначити відносний коефіцієнт сушіння χ із графічної залежності $K = f(N)$, звідки $\text{tg } \alpha = \chi$.



Кінетичне рівняння матиме вигляд:

$$\frac{W - W_{кр}}{W_{кр} - W_p} = e^{-K \cdot (\tau - \tau_{кр})} = e^{\chi \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})}. \quad (30)$$

Залежність (30) дійсна для умови $W < W_{кр}$. Для того, щоб скористатися рівнянням (30), необхідно встановити залежність швидкості сушіння у першому періоді (дійсна для умови $W \geq W_{кр}$) від параметрів процесу, яка в загальному вигляді може бути представлена:

$$N = A \cdot t^m \cdot \omega^n, \quad (31)$$

де: A, m, n , – відповідно, коефіцієнт пропорційності і показники степені; ω – швидкість руху теплоносія, м/с; t – температура теплоносія, °С.

Вивчення кінетики сушіння зразків шпону, діаметром $d=10 \cdot 10^{-2}$ м проводилося при різних температурах, швидкостях руху теплоносія і товщинах стінки зразків. Початкова вологість для досліджуваного матеріалу $W_0=58$ %. Результати дослідження кінетики сушіння зразків при різних параметрах наведено на рис. 1-3, із яких випливає, що процес характеризується наявністю як першого, так і другого періодів.

На рис. 1 наведено результати дослідження впливу швидкості руху теплоносія на кінетику сушіння. Так, при збільшенні швидкості руху теплоносія з 1 до 3 м/с, при одній і тій же температурі, час сушіння зменшується з 16 до 9 хвилин до досягнення рівноважної вологості. Тобто, в діапазоні зміни швидкостей, при яких проводилися дослідження, швидкість сушіння в пер-

шому періоді істотно залежить від гідродинамічних умов і меншою мірою це відноситься до другого періоду.

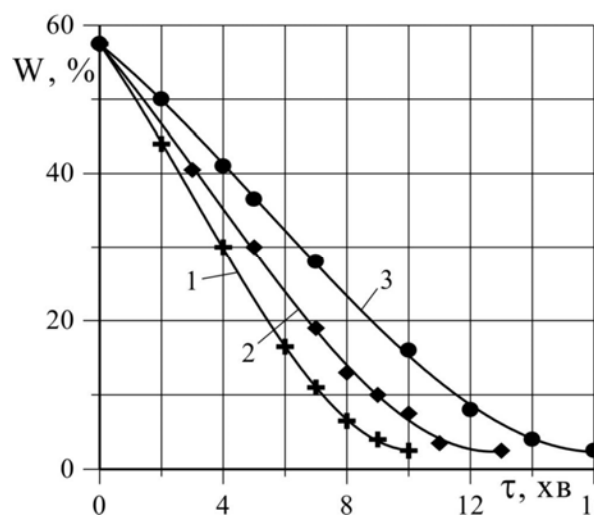


Рис. 1. Вплив швидкості теплоносія на кінетику сушіння шпону:
 $t = 120^{\circ}\text{C}$; $H = 1,5 \cdot 10^{-3}$; 1 – $\omega = 3$ м/с; 2 – $\omega = 2$ м/с; 3 – $\omega = 1$ м/с

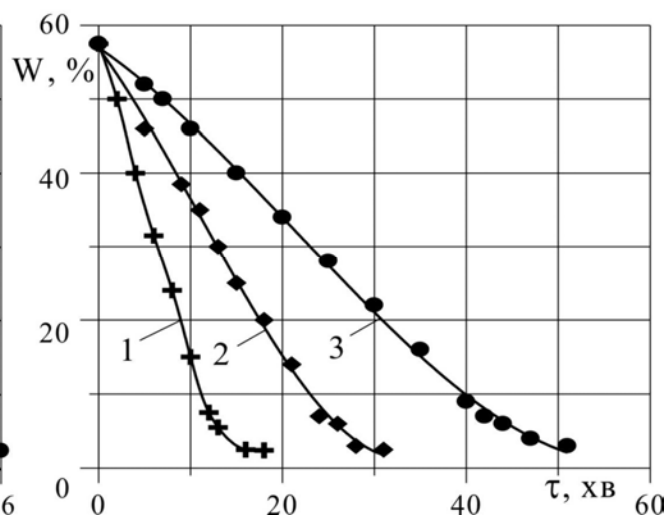


Рис. 2. Вплив температури на кінетику сушіння шпону:
 $\omega = 1$ м/с; $H = 1,5 \cdot 10^{-3}$; 1 – $t = 120^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 86^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 50^{\circ}\text{C}$

На кінетику сушіння істотно впливає і температура теплоносія (рис. 2). Як видно з отриманих результатів, зростання температури (в інтервалі температур, при яких проводились дослідження) має не однаковий вплив на швидкість сушіння на всьому інтервалі зміни вологості. Так, час сушіння матеріалу в першому періоді від початкової вологості $W_0 = 57\%$ до вологості 25% при збільшенні температури з 50 до 80°C (на 30°C) зменшується з 28 до 15 хв., а при збільшенні з 80 до 120°C тривалість процесу зменшується на 7 хв. (з 15 до 8 хв.). Однак, слід відзначити, що вплив збільшення температури теплоносія спостерігається і у другому періоді (рис. 2). Збільшення швидкості сушіння в першому періоді зі збільшенням швидкості руху теплоносія і температури призводить до того, що в процесі сушіння відбувається безперервне підведення вологи із внутрішніх до поверхневих шарів матеріалу, внаслідок чого зменшується вологість не тільки на поверхні, але і у внутрішньому об'ємі. У найпростішому випадку випаровування проходить на поверхні матеріалу, а пара, яка утворюється, дифундує в навколишнє середовище.

На рис. 3 наведено результати дослідження впливу товщини стінки шпону на кінетику сушіння. Збільшення товщини стінки шпону істотно впливає на тривалість процесу. Для товщини зразка $H = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м сушіння триває 18 хвилин, при $H = 3 \cdot 10^{-3}$ м – 32 хвилини, а при $H = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м – 48 хвилин. Тобто, збільшення товщини стінки у 3 рази приводить до збільшення тривалості конвективного сушіння у $3,4$ рази. Таке явище пояснюється як фізико-хімічними властивостями матеріалу, так і механізмом перенесення вологи. При збільшенні товщини стінки, збільшується опір перенесення вологи до поверхні матеріалу, що негативно впливає і на зовнішній масообмін. Шпон є теплоізолятором і коефіцієнт теплопровідності залежить від вологості матеріалу. Коли у верхніх шарах матеріалу (поверхня листа) вологість зменшується, їх

теплопровідність також зменшується, а температура зростає. Різниця температур поверхні матеріалу і середовища зменшується і, відповідно, зменшується й інтенсивність підведення тепла конвективним методом до поверхні листа. Як наслідок, інтенсивність випаровування вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище також зменшується (рівняння (14) і (15)).

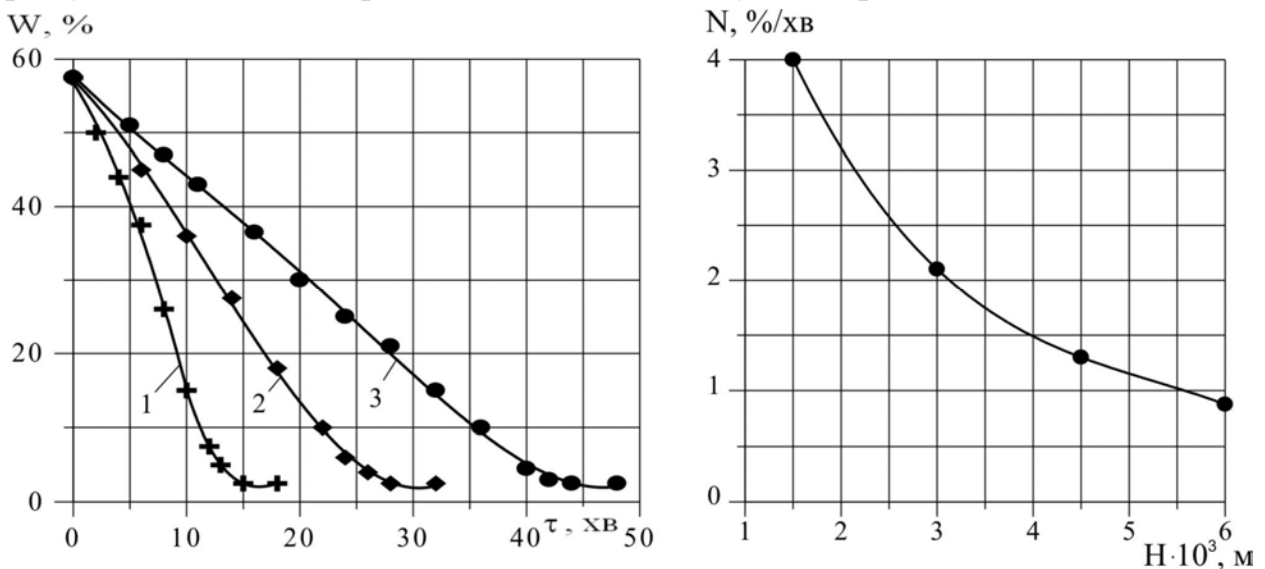


Рис. 3. Вплив товщини шпону на кінетику сушіння:
 $\omega = 1 \text{ м/с}; t = 120^\circ\text{C}; 1 - H = 1,5 \cdot 10^{-3}; 2 - H = 3 \cdot 10^{-3}; 3 - H = 4,5 \cdot 10^{-3}$

Рис. 4. Вплив товщини стінки шпону на швидкість сушіння в першому періоді:
 $\omega = 1 \text{ м/с}; t = 120^\circ\text{C}$

На рис. 4 наведено графічну залежність зміни швидкості сушіння у першому періоді від товщини стінки шпону, яка свідчить про значний вплив геометричних розмірів матеріалу на кінетику процесу. Так при $H = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ швидкість сушіння $N = 4,25 \text{ \%/хв.}$, а при товщині $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $N = 1,25 \text{ \%/хв.}$ Наведені результати досліджень свідчать про те, що режими сушіння, параметри теплоносія, геометричні розміри шару істотно впливають на тривалість зневоднення.

Кінетику сушіння зразків у першому періоді описуємо рівнянням (27), яке дійсне для умов $W > W_{кр}$. Критичній вологості на кінетичній кривій відповідає критичне значення часу, яке обчислюємо за рівнянням (29) тобто нам невідомі дві величини $W_{кр}$ і $\tau_{кр}$.

Із графічних залежностей рис. (1-3) визначаємо швидкість сушіння у першому періоді. На основі узагальнення результатів кінетики процесу у першому періоді отримуємо розрахункову залежність:

$$N = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^{1,43} \cdot \omega^{0,44}, \quad (32)$$

яка дає змогу прогнозувати процес сушіння в першому періоді для $H = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $W > W_{кр}$, $W > 20\%$.

Визначивши для кожної кінетичної кривої N і K , будуємо залежність у координатах $K - N$ і визначаємо відносний коефіцієнт χ , який для досліджуваного матеріалу рівний $\chi = 0,0591 \%$ ($K = \chi \cdot N$).

Для розрахунку значень $\tau = \tau_{кр}$, які міняються для різних умов, оскільки $\tau_{кр}$ залежить від швидкості сушіння у першому періоді (рівняння 29), необ-

хідно визначити критичну вологість $W_{кр}$, яка для більшості випадків приблизно є величиною постійною. Для визначення $W_{кр}$ і коефіцієнта сушіння K будуємо кінетичні криві в координатах $lg(W - W_p) - \tau$ і визначаємо критичну вологість, яка для досліджуваного матеріалу приблизно рівна $W_{кр} \approx 20\%$. Рівноважна вологість в інтервалі температур, при яких велися дослідження $W_p \approx 2\%$. Із графічних координат $lg(W - W_p) - \tau$ згідно з рівнянням (33), розраховуємо коефіцієнти сушіння K для різних режимів процесів.

Таким чином рівняння, яке описує зміну вологості шпону у другому періоді, має такий вигляд:

$$\frac{W - W_p}{20 - W_p} = \exp[-0,059N(\tau - \tau_{кр})] = \frac{W - W_p}{18} = \exp[-0,059 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} t^{1,43} \cdot \omega^{0,44} (8 - \tau_{кр})]. \quad (33)$$

Отримані рівняння (32) і (33) добре узгоджуються з дослідними даними і дають змогу прогнозувати кінетику конвективного сушіння. Відносна похибка не перевищує 12-15 %.

Висновок. Дослідження кінетики конвективного сушіння шпону показує, що при правильно організованому процесі тепломасообміну процес у промислових умовах може бути значно інтенсифікований. Основний недолік, який впливає із аналізу роботи конвективних заводських установок (м. Львів) нерівномірність омивання поверхонь матеріалу теплоносієм. Отримані кінетичні коефіцієнти і розрахункові залежності, які дають змогу прогнозувати кінетику процесу конвективного сушіння шпону.

Література

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
2. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. – М.: Высш. шк., 1977. – 328 с.
3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 783 с.