

*УДК 66.047 Пошукувач Б.М. Микичак; проф. Я.М. Ханик, д-р техн. наук;
доц. Д.П. Кіндзера, д-р техн. наук; асист. Я.Д. Ярош, канд. техн. наук –
НУ "Львівська політехніка"*

КІНЕТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШННЯ СТРУГАНОВОГО ШПОНУ

Наведено результати досліджень кінетики фільтраційного та конвективного сушіння струганого шпону, проведено узагальнення результатів і визначено кінетичні коефіцієнти.

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

Competitor *V.M. Mukuchak; prof. Ya.M. Khanyk; assoc. prof. D.P. Kindzera; assist. Ya.D. Yarosh – NU "L'vivs'ka Politekhnika"*

The kinetic of the filtration drying of veneer

The results of researches of kinetic of the filtration drying and the konvektion drying of veneer, generalization of results is conducted and coefficients are certain in the article

Keywords: convection, drying, filtration drying, period.

Постановка питання. Фільтраційний процес сушіння, який реалізується за рахунок створення перепаду тисків по обидва боки газопроникного матеріалу, що обумовлює рух теплоносія через його капіляри і канали, має низку переваг перед наявними методами сушіння, зокрема перед конвективним [2, 3]. Це стосується також фільтраційного сушіння струганого шпону, який в промислових умовах сушиться конвективним, кондуктивним та іншими комбінованими методами [4], які характеризуються значними питомими енергетичними затратами, тривалістю процесу, а також низькою якістю висушеного матеріалу.

Мета дослідження – застосування фільтраційного процесу для сушіння струганого шпону.

Висока інтенсивність фільтраційного процесу сушіння пояснюється низькою причин. Перша і, основна причина, полягає в тому, що процес сушіння протікає не на геометричній поверхні матеріалу, а на внутрішній, яка на порядок або два перевищує зовнішню поверхню матеріалу. Дерево має низьку газопроникність, про що свідчить гідродинаміка процесу. Однак шпон характеризується наявністю штучної пористості, яка виникає в процесі утворення листового матеріалу. Поверхня штучної і природної пористості шпону утворює внутрішню поверхню матеріалу.

Другою причиною інтенсифікації сушіння, що відбувається на внутрішній поверхні шпону, є заміна молекулярної дифузії вологи молярною, тобто відбувається внутрішньокапілярний тепломасообмін. При фільтраційному сушінні градієнт концентрацій значно перевищує аналогічну величину при конвективному сушінні, оскільки товщиною стінки в цьому випадку є не товщина стінки виробу, а товщина міжкапілярного скелету.

За підвищених температур у випадку фільтраційного сушіння термодифузія сприяє рухові вологи в напрямку руху теплоносія. Фільтраційний тепломасообмін має ту особливість, що енергія теплового агента майже повністю використовується. На відміну від конвективного сушіння, при фільтраційному процесі температура теплоносія на виході із матеріалу практично дорівнює температурі мокрого термометра. Використання фільтраційного сушіння шпону, який є теплоізолятором, надзвичайно ефективне і має ще одну істотну перевагу перед конвективним сушінням. При конвективному процесі сушіння у першому періоді, коли температура поверхні шпону дорівнює температурі мокрого термометра, рушійна сила теплообміну ($t_{\text{середовища}} - t_{\text{поверхні}}$) є величиною постійною. Однак після досягнення гігроскопічної вологості на поверхні матеріалу процес сушіння лімітується молекулярною дифузією. Ко-

ефіцієнт дифузії залежить від температури матеріалу. Оскільки поверхневі шари шпону висихають, то їх коефіцієнт теплопровідності зменшується і тепло погано передається у внутрішні шари матеріалу. Одночасно зменшується рушійна сила конвективного тепломасообміну, оскільки суха поверхня шпону нагрівається і різниця температур теплоносія і поверхні шпону зменшується. Все це призводить до зростання тривалості процесу при конвективному сушінні і до значних питомих енерговитрат. При фільтраційному сушінні таке явище відсутнє, оскільки процес характеризується зональним механізмом тепломасообміну і теплоносії контактує з вологою поверхнею рухомої зони тепломасообміну.

Проаналізовані вище переваги фільтраційного сушіння перед конвективним призводять до різкої інтенсифікації фільтраційного сушіння з одночасним зменшенням питомих енерговитрат.

Результати досліджень. Експериментальне вивчення кінетики сушіння струганого шпону в діапазоні зміни вологості 58-10 %, проводилось при зміні параметрів теплоносія $t = 50-120\text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta P = 9800-78400\text{ Па}$ та товщини стінки останнього $H = 1,5-4,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$. Результати досліджень графічно представлено на рис. 1-3.

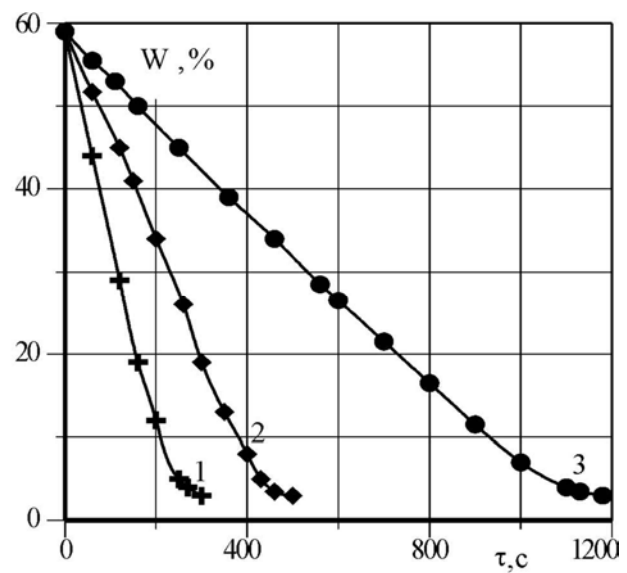
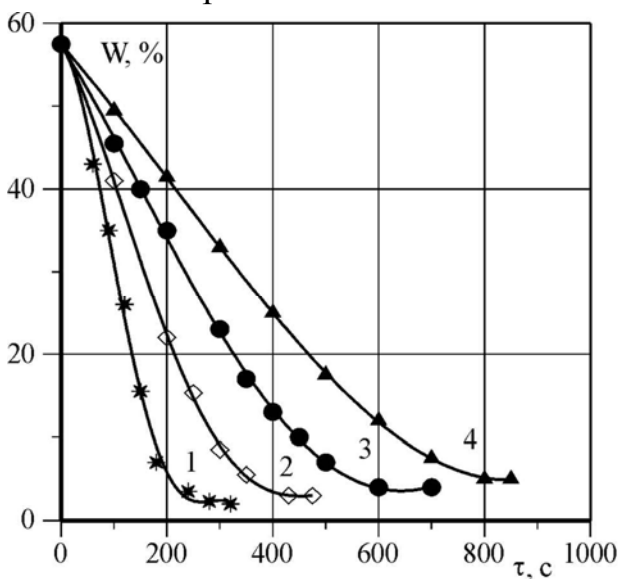


Рис. 1. Вплив температури на кінетику сушіння струганого шпону:
 $\Delta P = 78400\text{ Па}$; $H = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 1 – $t = 120\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $t = 80\text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 2. Вплив товщини зразків на кінетику сушіння: $\Delta P = 78400\text{ Па}$; $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$;
 1 – $H = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 2 – $H = 3 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 3 – $H = 4,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$

Згідно з отриманими результатами досліджень, кінетичні криві фільтраційного сушіння шпону характеризуються наявністю першого та другого умовних періодів. Дослідження кінетики сушіння проводились при вказаних вище параметрах теплоносія і геометричних розмірах матеріалу. Отримані результати використовувались для визначення кінетичних коефіцієнтів, які входять в рівняння кінетики процесу.

На рис. 1 показано кінетичні криві фільтраційного сушіння струганого шпону за різних температур теплоносія. Результати дослідження свідчать про те, що зміна температури істотно впливає на швидкість сушіння як у першо-

му, так і у другому умовних періодах. У діапазоні зміни вологості шпону 58-10 %, при температурі $t = 120^\circ\text{C}$ тривалість процесу становить $\tau = 170$ с, за $t = 80^\circ\text{C}$ $\tau = 280$ с, а за 50°C час сушіння дорівнює $\tau = 450$ с, тобто при зменшенні $t_1/t_2 = 120/80 = 1,5$ раза тривалість процесу зростає в 1,6 раза, а при зменшенні $t_1/t_3 = 120/50 = 2,4$ раза тривалість процесу сушіння зростає приблизно в 3,2 раза.

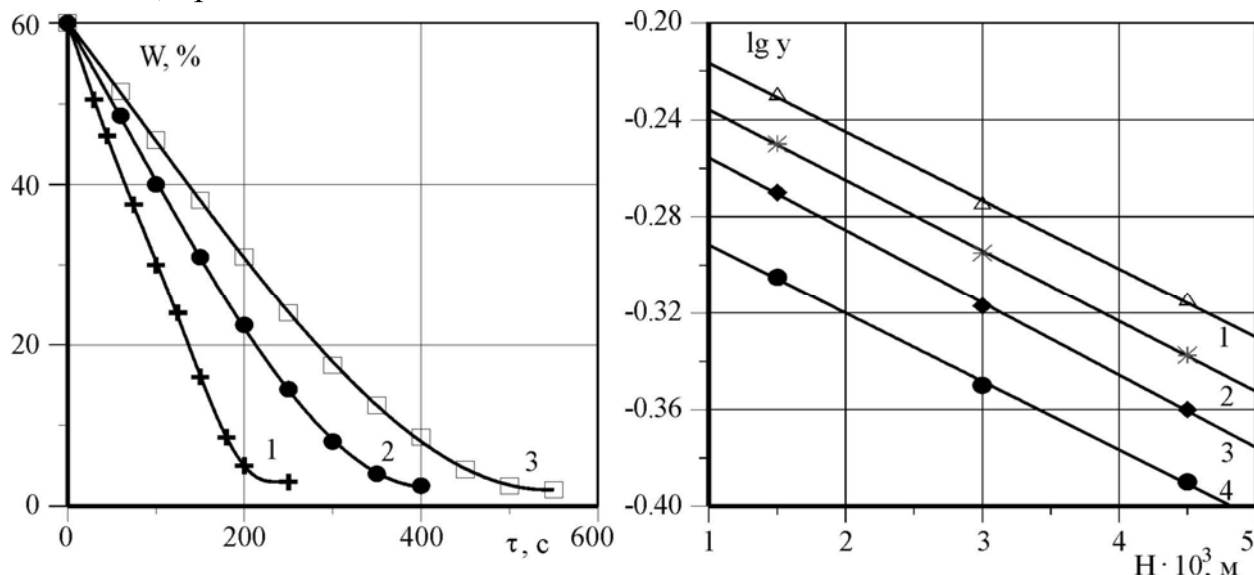


Рис. 3. Вплив перепаду тисків на кінетику сушіння: $H = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $t = 120^\circ\text{C}$,
 1 – $\Delta P = 78400 \text{ Па}$; 2 – $\Delta P = 29400 \text{ Па}$; 3 – $\Delta P = 9800 \text{ Па}$

Рис. 4. Узагальнення результатів кінетики сушіння шпону: 1 – $T = 120^\circ\text{C}$;
 $\Delta P = 78400 \text{ Па}$; 2 – $T = 80^\circ\text{C}$; $\Delta P = 78400 \text{ Па}$; 3 – $T = 50^\circ\text{C}$; $\Delta P = 78400 \text{ Па}$;
 4 – $T = 120^\circ\text{C}$; $\Delta P = 9800 \text{ Па}$

Вплив зростання температури на скорочення тривалості процесу у першому умовному періоді пояснюється різницею температур між теплоносієм і стінками пористої структури ($t_{cep} - t_{cm}$). Як відомо [1], швидкість перенесення тепла від внутрішньої поверхні матеріалу при фільтраційному процесі описується залежністю:

$$Q = \alpha \cdot F(t_{cep} - t_{cm}), \quad (1)$$

де: Q – швидкість перенесення тепла до внутрішньої поверхні шпону, Вт; α – коефіцієнт тепловіддачі у пористій структурі шпону, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; F – поверхня теплообміну, м^2 .

Інтенсифікація сушіння під час зростання температури проведення процесу також зумовлена наявністю термодифузії, яка сприяє переміщенню вологи в напрямку руху теплоносія і компенсує, певною мірою, негативний вплив на процес сушіння загальної концентраційної дифузії.

Підвищення температури теплоносія також сприяє механічному винесенню вологи у вигляді дрібнодисперсної фази (туману) з матеріалу за рахунок нагрівання та зменшення в'язкості останньої в зоні сушіння.

Вплив збільшення температури теплоносія на зменшення тривалості сушіння у другому умовному періоді пояснюється збільшенням коефіцієнта молекулярної дифузії вологи із скелету матеріалу до наскрізних капілярів і каналів.

На рис. 2 наведено результати досліджень товщини матеріалу на кінетику процесу, які свідчать про те, що збільшення товщини стінки шпону спричинює значне збільшення часу сушіння. Зростання товщини стінки шпону у два рази призводить до зростання тривалості процесу у 2,4 раза, а при збільшенні товщини стінки шпону у 3 рази тривалість процесу сушіння зростає більше, ніж у 5 разів. При одному і тому самому перепаді тисків через збільшення товщини стінки шпону зменшується швидкість руху теплоносія і, відповідно, зменшується інтенсивність підведення теплової енергії в зону сушіння. На рис. 3 показано кінетичні залежності впливу перепаду тисків на кінетику сушіння. Згідно з кінетичними кривими, при $\Delta P = 78400$ Па тривалість процесу сушіння становить 180 с, а за $\Delta P = 9800$ Па – 380 с, тобто тривалість процесу сушіння зростає у 2,1 раза при збільшенні ΔP у 8 разів.

Процес фільтраційного сушіння шпону протікає в першому та другому умовних періодах, тому узагальнення результатів досліджень проводились відповідно до кінетичних залежностей, наведених у [2, 3]. Представляючи результати експериментальних досліджень в координатах $\lg y - H$ (рис. 4), визначили кінетичні коефіцієнти "a" та " α ", які входять в залежність, що описує кінетику сушіння шпону в першому умовному періоді [2]:

$$\frac{W}{W_0} = 1 - \alpha \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H} \quad (2)$$

Кінетичний коефіцієнт " α " визначаємо за тангенсом кута нахилу прямих, наведених на рис. 4, тому $\alpha = \text{tg } \delta / 0,434$.

У нашому випадку, виходячи із наявних експериментальних даних, $a = 1480$ 1/м. Кінетичний коефіцієнт " α " залежить від параметрів процесу і визначається на перетині прямих з ординатою, $\alpha = [1/c]$. Узагальнення кінетичного коефіцієнта " α " можна задати рівнянням:

$$\alpha = A \cdot t^m \cdot \Delta P^n \quad (3)$$

Виходячи з експериментальних даних (рис. 4), складаємо систему рівнянь, внаслідок розв'язання якої знаходимо значення коефіцієнта "A" та показників степеней "m" та "n":

$$\begin{cases} \lg \alpha_1 = \lg A + m \cdot \lg t_1 + n \cdot \lg \Delta P_1 \\ \lg \alpha_2 = \lg A + m \cdot \lg t_2 + n \cdot \lg \Delta P_2 \\ \lg \alpha_3 = \lg A + m \cdot \lg t_4 + n \cdot \lg \Delta P_4 \end{cases} \quad (4)$$

В результаті розв'язання системи рівнянь (4), отримали значення $A = 0,3$; $m = 0,16$; $n = 0,09$, з врахуванням яких залежність (3) для узагальнення кінетичного коефіцієнта " α " може бути представлена як

$$\alpha = 0,3 \cdot t^{0,16} \cdot \Delta P^{0,09} \quad (5)$$

Тоді кінетичне рівняння (2) з врахуванням (5) можна представити у вигляді залежності

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 0,3 \cdot \Delta t^{0,16} \cdot \Delta P^{0,09} \cdot \tau \cdot e^{-1480 \cdot H} \quad (6)$$

яка описує кінетику сушіння до $W > W_{кр}$, (до досягнення критичної вологості). Представляючи дослідні дані в координатах $\lg(W - W_p) - \tau$ (рис. 5), знайдене значення критичної вологості для досліджуваного шпону $W_{кр} = 16\%$.

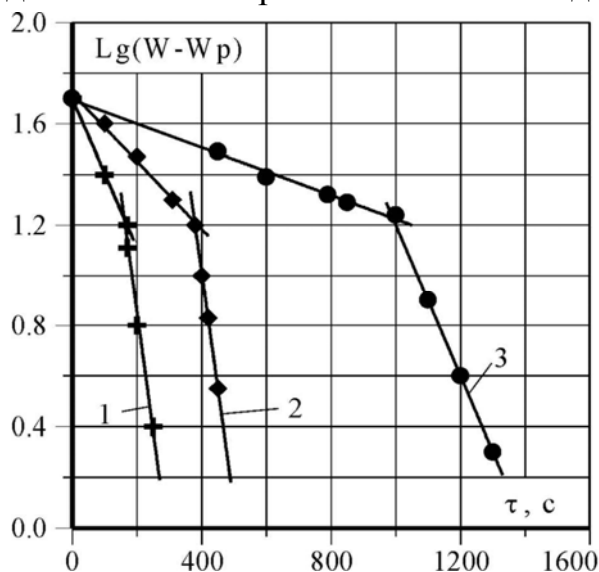


Рис. 5. Визначення критичної вологості $W_{кр}$ і коефіцієнтів сушіння "К":
 $\Delta P = 78400 \text{ Па}$; $t = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 – $H = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; 2 – $H = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; 3 – $H = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

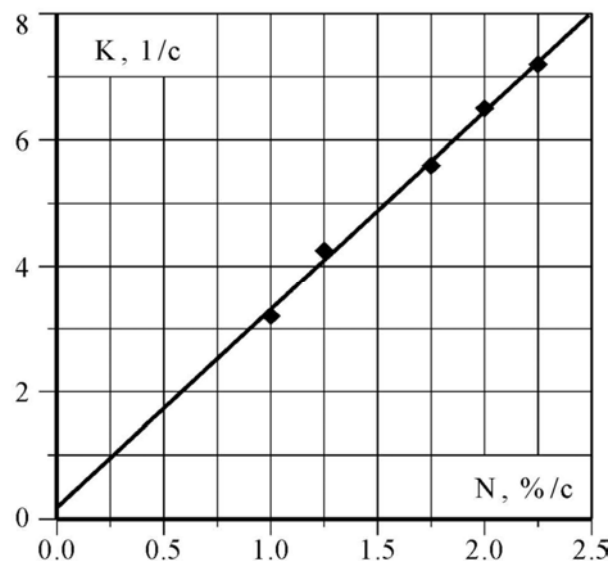


Рис. 6. Визначення відносного коефіцієнта сушіння χ

Кінетика сушіння другого періоду описується рівнянням [1]

$$\frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = e^{-K(\tau - \tau_{кр})} = e^{-\chi \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})}. \quad (7)$$

Рівноважна вологість W_p для досліджуваного матеріалу становить $\approx 2\%$. Однак нам не відомі відносний коефіцієнт сушіння χ , швидкість сушіння у першому періоді N та критична тривалість процесу сушіння $\tau_{кр}$. З літератури [1] відомо, що $N = (W_0 - W_{кр}) / \tau_{кр}$.

Значення $\tau_{кр}$ може бути розраховано за допомогою такого рівняння

$$\tau_{кр} = \frac{1}{\alpha \cdot e^{-\alpha \cdot H}} \left(1 - \frac{W_{кр}}{W_0} \right). \quad (8)$$

Для визначення відносного коефіцієнта сушіння χ , необхідно для кожної кінетичної кривої визначити швидкість сушіння в першому періоді N і коефіцієнт сушіння "К". Швидкість сушіння N визначаємо $N = W_0 \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot H}$.

Коефіцієнт сушіння "К" визначається графоаналогічним методом (рис. 5) як тангенс кута нахилу кривих нижче критичного значення вологості $W_{кр}$. На основі отриманих результатів будуюмо графічну залежність $K = \chi \cdot N$ (рис. 6).

За тангенсом кута нахилу прямої (рис. 6) визначаємо $\chi = 3,09 \cdot 10^{-2}$, 1/°.

$$\tau_{кр} = \frac{W_0 - W_{кр}}{W_0 \cdot A \cdot t^n \cdot \Delta P^m \cdot e^{-\alpha \cdot H}} = \frac{W_0 - 16}{W_0 \cdot 0,3 \cdot t^{0,16} \cdot \Delta P^{0,09} \cdot e^{-1480 \cdot H}}. \quad (9)$$

Рівняння другого періоду для досліджуваного матеріалу матиме такий вигляд:

$$\frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = \exp \left[-3,09 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3 \cdot 58 \cdot \Delta t^{0,16} \Delta P^{0,09} e^{-1480(\tau - \tau_{кр})} \right] =$$

$$= \exp \left[-0,54 t^{0,16} \cdot \Delta P^{0,09} e^{-1480(\tau - \tau_{кр})} \right]. \quad (10)$$

Рівняння справедливе для умов $W < W_{кр}$; $\tau > \tau_{кр}$.

Загальна тривалість процесу сушіння до досягнення рівноважної або будь-якої вологості для досліджуваного матеріалу визначається за такою залежністю:

$$\tau = \frac{58 - W_p}{N} - \frac{1 + 2,31 \lg \chi(W - W_p)}{\chi \cdot N} = \frac{58 - W_p}{W_0 \alpha e^{-a \cdot H}} - \frac{1 + 2,31 \lg \chi(W - W_p)}{3,09 \cdot 10^{-2} \cdot W_0 \alpha e^{-a \cdot H}} =$$

$$= \frac{58 - 2}{58 \cdot 0,3 \cdot t^{0,16} \Delta P^{0,09} e^{-1480 \cdot H}} - \frac{1 + 2,31 \lg 3,09 \cdot 10^{-2} (W - 2)}{3,09 \cdot 10^{-2} \cdot 58 \cdot 0,3 \cdot t^{0,16} \Delta P^{0,09} e^{-1480 \cdot H}}.$$

Таким чином,
$$\tau = \frac{3,21}{t^{0,16} \Delta P^{0,09} e^{-1480 \cdot H}} - \frac{1 + 2,31 \lg 3,09 \cdot 10^{-2} (W - 2)}{0,54 \cdot t^{0,16} \Delta P^{0,09} e^{-1480 \cdot H}}. \quad (11)$$

Зіставлення розрахункових і дослідних значень вологостей для першого і другого умовних періодів свідчать про адекватність розрахункових і дослідних даних. Відносна похибка не перевищує 15 %. Рівняння (6) і (10) дають змогу прогнозувати перебіг процесу і розрахувати основні розміри сушильних апаратів, а з врахуванням залежності гідродинаміки процесу – розрахувати енергетичні затрати на процес.

Отримані результати з кінетики фільтраційного сушіння шпону показують, що при однакових температурних режимах сушіння, тривалість фільтраційного процесу є значно меншою ніж конвективного (див. табл. 1-8), що обумовлено відмінностями механізмів конвективного і фільтраційного тепломасообмінів.

Сушіння шпону фільтраційним і конвективним методами проводилися при м'яких температурних режимах. Максимальна температура теплоносія не перевищувала 120 °С. Такі режими забезпечують високу якість шпону, низькі питомі енергетичні затрати на проведення процесу. Процес конвективного сушіння шпону вивчався з метою встановлення впливу окремих факторів на кінетику процесу, тривалість процесу сушіння залежно від гідродинамічних і температурних параметрів теплоносія, а також з метою порівняння кінетичних і енергетичних показників фільтраційного і конвективного процесів сушіння.

Для фільтраційного сушіння шпону тривалість процесу залежно від температури теплоносія (в інтервалі зміни вологості матеріалу 58-10 %) наведено в табл. 1.

Табл. 1. Залежність тривалості фільтраційного процесу сушіння від температури теплоносія ($\Delta P = 78400 \text{ Па}$; $H = 1,5 \cdot 10^3 \text{ м}$)

t = 120 °С	t = 80 °С	T = 50 °С
τ = 180 с	τ = 290 с	T = 450 с

Залежно від перепаду тисків тривалість фільтраційного процесу сушіння наведено в табл. 2.

Табл. 2. Залежність тривалості фільтраційного процесу сушіння від перепаду тисків ($t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $H = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$)

$\Delta P = 78400\text{ Па};$	$\Delta P = 29400\text{ Па}$	$\Delta P = 9800\text{ Па}$
$\tau = 180\text{ с}$	$\tau = 300\text{ с}$	$\tau = 375\text{ с}$

На тривалість фільтраційного сушіння істотно впливає товщина стінки шпону. Вплив товщини стінки шпону на тривалість процесу наведено в табл. 3.

Табл. 3. Залежність тривалості фільтраційного процесу сушіння від товщини стінки шпону ($t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta P = 78400\text{ Па}$)

$H = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$	$H = 3,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}$	$H = 4,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$
$\tau = 180\text{ с}$	$\tau = 390\text{ с}$	$T = 950\text{ с}$

Тривалість конвективного процесу сушіння шпону залежно від температури теплоносія та швидкості руху останнього наведено у табл. 4 та 5, а при різних товщинах стінки шпону – в табл. 6.

Табл. 4. Тривалість конвективного сушіння залежно від температури теплоносія ($\omega = 1\text{ м/с}$; $H = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$)

$t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
720 с	1380 с	3120 с

Табл. 5. Тривалість конвективного сушіння залежно від швидкості руху теплоносія ($t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $H = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$)

$\omega = 1\text{ м/с}$	$\omega = 2\text{ м/с}$	$\omega = 3\text{ м/с}$
720 с	540 с	350 с

Табл. 6. Тривалість конвективного сушіння залежно від товщини стінки шпону ($\omega = 1\text{ м/с}$; $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$)

$H = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$	$H = 3,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}$	$H = 4,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$
720 с	1260 с	1980 с

У табл. 7 та 8 наведено порівняльні кінетичні характеристики фільтраційного і конвективного сушіння за різних температур та товщин стінок шпону за тривалістю процесу в інтервалі зміни вологості 58-10%. $\tau_{\text{кон}}$ – тривалість конвективного сушіння, с; τ_{φ} – тривалість фільтраційного сушіння, с.

Табл. 7. Порівняльні кінетичні характеристики фільтраційного і конвективного процесу сушіння залежно від температури теплоносія ($H = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$)

$t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\frac{\tau_{\text{кон}}}{\tau_{\varphi}} = \frac{3120}{450} = 6,9$	$\frac{\tau_{\text{кон}}}{\tau_{\varphi}} = \frac{1380}{290} = 4,75$	$\frac{\tau_{\text{кон}}}{\tau_{\varphi}} = \frac{720}{180} = 4,0$

У табл. 8 наведено порівняльну характеристику за тривалістю фільтраційного та конвективного процесів сушіння залежно від товщини матеріалу.

Табл. 8. Порівняльні кінетичні характеристики фільтраційного і конвективного процесу сушіння залежно від товщини стінки шпону ($t = 120\text{ }^\circ\text{C}$)

$H = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м	$H = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м	$H = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м
$\frac{\tau_{\text{кон}}}{\tau_{\varphi}} = \frac{720}{180} = 4$	$\frac{\tau_{\text{кон}}}{\tau_{\varphi}} = \frac{1260}{380} = 3,3$	$\frac{\tau_{\text{кон}}}{\tau_{\varphi}} = \frac{1980}{950} = 2,1$

Висновки. На основі порівняння кінетичних характеристик можна зробити висновок, що за однакових параметрів теплоносія і геометричних розмірів шпону, тривалість процесу сушіння фільтраційним методом порівняно з конвективним зростає від 2,1 до 6,9 разів. Отримані кінетичні залежності дають змогу прогнозувати процес зневоднення шпону і з врахуванням гідродинаміки процесу розрахувати питомі енерговитрати при різних режимних параметрах.

Література

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
2. Аксельруд Г.А., Ханьк Я.Н. Фильтрационная сушка плоских газопроницаемых объектов// Теоретические основы химической технологии. – 1990, т.24, № 3. – С. 402-405.
3. Аксельруд Г.А., Ханьк Я.Н., Топчий В.И. Кинетика фильтрационного процесса сушки// Химическая технология. – 1986, № 5. – С. 41-46.
4. Бехта П.А. Виробництво і обробка луценого та струганого шпону. – К.: ІСДО, 1995. – 296 с.