

Література

1. Яцюк А.И. Новый абразивный инструмент для шлифования древесины. – ДАН УССР, № 11, 1961. – С. 35-39.
2. Яцюк А.И. Новый способ механической обработки древесины. – Львов: Высшая школа, 1975. – 253 с.
3. Грицышин С.И. Потай А.А. Особенности шлифования-калибрования плит из стеблей хлопчатника абразивными цилиндрами. Совершенствование технологии и оборудования лесопильно-деревообр. производств. – Тез. докл. к научно-техн. конф. 21-25 сент., 1992, Архангельск, 1992. – С. 39-40.
4. Кійко О.А., Грицюк Ю.І. Порівняльна оцінка кінематичних особливостей роботи жорстких та еластичних шліфувальних інструментів у деревообробці// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2000, вип. 9.13. – С. 113-122.

УДК 647.047

Доц. І.М. Озарків, канд. техн. наук – УкрДЛТУ

ОСНОВНІ РІВНЯННЯ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛА І МАСИ В ПРОЦЕСАХ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНВЕКТИВНО-РАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ ШПОНУ

Наведені основні рівняння тепловологоперенесення в процесі сушіння листових матеріалів при комбінованому (конвективно-радіаційному) способі підведення теплоти, які є базою для діагностики і прогнозування теплообмінних характеристик.

Doc. I.M. Ozarkiv – USUFWT

The main equations of heat and mass transfer in convective-radiation veneer drying study

The main equations of heat and mass transfer in the process of wooden sheets drying combined (convective-radiative) method of heat feeding. These equations are recommended as the basis for heat and mass interchange forecast.

Теоретичні основи сушіння вологих тіл базуються на теорії перенесення тепла і вологи, розробленої О.В. Ликовим та його школою [1,2]. Хоча, окремі випадки розв'язання систем рівнянь перенесення тепла і маси, як і експериментальні дослідження впливу різних факторів на інтенсивність тепломасообміну в процесі сушіння різних матеріалів проведені І.В. Кречетовим, Ю.А. Михайловим, П.Д. Лебедевим, А.С. Гінзбургом, В.В. Красніковим, С.Г. Ільясовим, П.С. Серговським, Г.С. Шубіним, В.А. Книшем, О. Крішером, В.В. Красновим, М.Ю. Лур'є, П.В. Білеєм та багатьма іншими.

Тому зупинимося на основних висновках і положеннях теорії тепломасообміну, які будуть мати пряме відношення до аналізу і розрахунку процесів сушіння плоских листових матеріалів, зокрема й шпону. Особливу цінність будуть мати розв'язки диференціальних рівнянь тепло- й вологоперенесення, які будуть виражені в безрозмірній критеріальній формі, що дозволить повно і досить просто дослідити вплив окремих параметрів як на інтенсивність процесу сушіння, так і знайти співвідношення між важливими тепломасообмінними характеристиками процесу сушіння. Адже обробка експериментальних даних в узагальнених безрозмірних змінних дозволить перенести закономірності одиничних дослідів на цілі групи подібних фізичних

явищ. У зв'язку з чим розглянемо деякі розв'язки диференціальних рівнянь тепломасоперенесення при початкових і крайових умовах в процесі конвективно-радіаційного сушіння необмеженої пластини, оскільки шпон, як листовий матеріал малої товщини із значною поверхнею випаровування, представляє собою саме необмежену пластину.

Відомо, що в процесі конвективного сушіння необмеженої пластини певної товщини ($S=2R$), коли тепло- і вологообмін із оточуючим середовищем (агентом сушіння) здійснюється із двох протилежно розташованих поверхонь, а переміщення вологи всередині тіла одночасно супроводжується фазовими перетвореннями, то крайові (граничні) умови в критеріальній формі можуть бути представлені рівняннями вигляду:

$$Ki_m + Pn \frac{\partial T(1, F_0)}{\partial X} - \frac{\partial \theta(1, F_0)}{\partial X} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T(1, F_0)}{\partial X} - Bi[1 - T(1, F_0)] + [1 - \varepsilon]KoLuKi_m = 0, \quad (2)$$

де: $Ki_m \left(Ki_m = \frac{q'_m R}{a'_m \rho_\delta \Delta U} = \frac{q'_m R}{a'_m \rho_0 U_0} \right)$ – масообмінний критерій Кірпічова, який

чисельно дорівнює відношенню кількості вологи, що випаровується на поверхні матеріалу, до кількості вологи, що підводиться до неї; $F_0 (F_0 = a\tau/R^2)$

– критерій Фур'є, який характеризує розвиток процесу зміни температур в на-

грівуючому тілі; $Bi \left(Bi = \frac{\alpha}{\lambda_M R} \right)$ – теплообмінний критерій Біо, що виражає

зміну температури всередині тіла під дією зовнішнього теплообміну; його розглядають як міру відношення температурного перепаду в стінці до температурного тиску; ε – коефіцієнт фазового перетворення, який визначає частку вологи, що переміщується у вигляді пари ($\varepsilon = 1$) або в рідкому стані ($\varepsilon = 0$);

$Ko \left(Ko = \frac{r\Delta U}{C\Delta t} \right)$ – критерій Косовича, який характеризує відношення теплоти,

що затрачена на випаровування вологи ($r\Delta U$), до питомого тепла, що затра-

чене на нагрівання вологого матеріалу ($C\Delta t$); $Lu \left(Lu = \frac{a'_m}{a} \right)$ – критерій Ли-

кова, який дорівнює відношенню коефіцієнта дифузії теплоти і характеризує інтенсивність зміни поля потенціалу вологоперенесення відносно зміни поля температури, тобто показує релаксацію поля вологості на поле температур.

В аналітичних розв'язках, іноді, як узагальнюючу зміну використовують критерій Федорова $\left(Fe = \varepsilon Ko Pn = \frac{\varepsilon \delta r}{C} \right)$, який не залежить від виборів

потенціалів тепломасоперенесення і визначається тільки коефіцієнтами ε , δ (δ – термоградієнтний коефіцієнт) і термодинамічними характеристиками r і C (r – питома теплота фазового перетворення, C – приведена питома теплоємність матеріалу).

В свою чергу, розподілення температури і вологості всередині шпону в початковий момент часу сушіння можна прийняти рівномірним по всьому об'єму, тобто початкові умови запишуться як

$$T(X, \tau_0 = 0) = O(X, 0) = 0, \quad (3)$$

де X – безрозмірна координата, $X = x/R$; x – віддаль від центральної осі до точки.

Математична модель тепломасоперенесення в безрозмірній формі для необмеженої пластини, згідно з [1], може бути представлена у такому вигляді:

$$\frac{\partial T(X, Fo)}{\partial Fo} = (1 - \varepsilon Ko Pn Lu) \frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2} - \varepsilon Ko Lu \frac{\partial^2 \theta(X, Fo)}{\partial X^2}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta(X, Fo)}{\partial Fo} = Lu \frac{\partial^2 \theta(X, Fo)}{\partial X^2} - Pn Lu \frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2}. \quad (5)$$

Тому, розв'язки рівнянь (4), (5) при крайових умовах (1), (2) і початкових умовах рівномірного [див. рівняння (3)] або параболоподібного розподілення потенціалів перенесення в тілі, коли останнє описується рівнянням

$$T(X, 0) = -[1 - X^2(W; \theta(X, 0))] = -(1 - X^2)W, \quad (6)$$

для симетричних полів температури і вологовмісту

$$\frac{\partial T(0, F_0)}{\partial X} = \frac{\partial \theta(0, F_0)}{\partial X} = 0; T(0, F_0) \neq 0 \text{ і } \theta(0, F_0) \neq \infty, \quad (7)$$

отримані О.В. Ликовим [1] шляхом інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є, які для нестационарних потенціалів конвективного тепло-масоперенесення мають вигляд:

$$T(X, Fo) = (1 - \varepsilon) Ko Lu \frac{Ki_m}{Bi} - \frac{1}{2} Ko Lu Ki_m \left(1 - X^2 + \frac{2}{Bi} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 C_{ni} \cos v_i \mu_n \exp(-\mu_n^2 Fo) - \frac{\varepsilon Ko Lu Ki_m}{v_2^2 - v_1^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 C_{mi} \cos v_i \mu_m \exp(-\mu_m^2 Fo); \quad (8)$$

$$\theta(X, Fo) = Ki_m \left[Lu Fo - \frac{1}{2} (1 + \varepsilon Ko Pn Lu) \left(\frac{1}{3} - X^2 \right) + \frac{1}{\varepsilon Ko} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 C_{ni} (1 - v_i^2) \cos v_i \mu_n \times \right. \\ \left. \times \exp(-\mu_n^2 Fo) + \frac{Ki_m}{v_2^2 - v_1^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 C_{mi} (1 - v_i^2) \cos v_i \mu_m \exp(-\mu_m^2 Fo) \right], \quad (9)$$

де: μ_n, μ_m – корені відповідних характеристичних рівнянь [1]; C_{ni}, C_{mi} – коефіцієнти, які приймаються залежно від значень окремих критеріїв подібності [2];

v_1, v_2 – коефіцієнти, які залежать від критеріїв $Lu \left(v_1^2 = \frac{1}{Lu}; v_2^2 = 1 \right)$ і $\varepsilon Ko Pn$.

Симплекси W і V , що входять до рівняння (6), визначаються

$$W = \frac{t_{\Pi} - t_{Ц}}{t_C - t_{\Pi}}; \quad V = \frac{\theta_{Ц} - \theta_{\Pi}}{\theta_{\Pi} - \theta_P} \quad (10)$$

і характеризують нерівномірність початкового розподілення потенціалів тепло-і масоперенесення.

Аналіз отриманих розв'язків показує, що безмежні суми, які входять в рівняння (8) і (9) дуже швидко сходяться. Це значить, що із цієї суми для практичних розрахунків, починаючи з $Fo = 0,20 \dots 0,30$, достатньо використати два характеристичні корені і відповідну їм кількість додаючих рядів. Для значень $Fo \geq 0,30$ розрахунків нестационарних полів потенціалів перенесення тепла і маси проводять за формулами:

$$T(X, Fo) \approx 1 - \varepsilon Ko K_1 - \frac{\varepsilon Ko Lu Ki_m}{2} \left(1 - X^2 + \frac{2}{Bi} \right) - \sum_{n=1}^2 \sum_{l=1}^2 C_{n_l} \cos v_{l_i} \mu_n \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (11)$$

$$\theta(X, Fo) \approx Ki_m Lu Fo - \frac{1 + \varepsilon Ko Pn Lu}{2} \left(\frac{1}{3} - X^2 \right) + \frac{1}{\varepsilon Ko} \sum_{n=1}^2 \sum_{l=1}^2 C_{n_l} (1 - v_{l_i}^2) \cos v_{l_i} \mu_n \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (12)$$

Із рівнянь (11) і (12) можна отримати дуже важливі розв'язки для аналізу і розрахунку конвективно-радіаційного сушіння шпону.

Зокрема, для періоду постійної швидкості сушіння, коли в середині шпону має місце стаціонарне розподілення температури, швидкосхідними рядами сум рівнянь (11) і (12) можна знехтувати.

Тоді, можна записати

$$T = \frac{t_{noch} - t_0}{t_c - t_0} = 1 - \varepsilon Ko K_1 - \frac{1}{2} \varepsilon Ko Lu Ki_m \left(1 - X^2 - \frac{2}{Bi} \right); \quad (13)$$

$$\theta = \frac{U_{noch} - U}{U_{noch} - U_p} = Ki_m Lu Fo - \frac{1}{2} (1 + \varepsilon Ko Pn Lu) \left(\frac{1}{3} - X^2 \right); \quad (14)$$

$$K_1 = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} Lu \frac{Ki}{Bi_1}, \quad (15)$$

де $Ki \left(Ki = \frac{q(\tau)R}{\lambda \Delta T} \right)$ – теплообмінний критерій Кірпичова.

Для середніх теплообмінних потенціалів перенесення тепла і маси розв'язок рівнянь (13) і (14) можна представити таким чином:

$$T = \frac{t_{noch} - t_0}{t_c - t_0} = 1 - \varepsilon Ko \bar{Ki} - \frac{1}{2} \varepsilon Ko Lu Ki_m \left(\frac{2}{3} + \frac{2}{Bi} \right) = 1 - Ko Lu Ki_m \left(\frac{1}{3} \varepsilon + \frac{1}{Bi} \right); \quad (16)$$

$$\theta = \frac{U_{noch} - U}{U_{noch} - U_p} = Ki_m Lu Fo = Ki_m Fo_m, \quad (17)$$

$$Ki_m = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} Lu \frac{Ki_m}{Bi}, \quad (18)$$

де $Fo_m = Lu Fo$ – гігрометричний критерій Фур'є.

Співвідношення (16) і (17) представляють собою рівняння кінетики сушіння, які дозволяють отримати ряд важливих розв'язків для визначення швидкості і тривалості сушіння шпону, коли відомі зміна середньої температури і коефіцієнти перенесення тепла і маси. Так, наприклад, масообмінний критерій Кірпичова рівний

$$Ki_m = \frac{t_c - \bar{t}}{KoLu(t_c - t_0)(1/Bi + 1/3 \cdot \varepsilon)} \quad (19)$$

і таким чином, швидкість сушіння буде рівна

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{100\alpha(t_c - \bar{t}_x)}{\rho_B Rr(1/Bi + 0,33\varepsilon)}, \quad (20)$$

де $\frac{dW}{d\tau} \left(\frac{dW}{d\tau} = \frac{dU}{d\tau} \cdot 100 \right)$ – швидкість сушіння матеріалу, %/с.

У випадку, коли $\varepsilon = 0$ (коли волога переміщуються у рідкому виді), то рівняння (20) набуде виду

$$N = \frac{dW}{d\tau} = \frac{100\alpha(t_c - \bar{t})}{\rho_B rR}. \quad (21)$$

Співвідношення (14) представляє собою рівняння кривої сушіння, яке для першого періоду дає можливість отримати формулу для визначення тривалості сушіння, тобто

$$\tau_1 = \frac{rR\rho_B(W_{II} - W_{KP})}{100\alpha(t_c - \bar{t})}, \quad (22)$$

де W_{II} , W_{KP} – відповідно початкова і критична вологість шпону.

Таким чином, щоб визначити швидкість сушіння N і тривалість сушіння в першому періоді, коли із матеріалу випаровується вільна волога, слід, крім режимних параметрів конвективного сушіння (температури середовища t_c , температури мокрого термометра $t_m = t_x$, початкової вологості W_{II} , питомої теплоти перетворення r , товщини матеріалу, базової густини ρ_B), знати параметри, які можуть бути отримані тільки в результаті експериментальних досліджень (коефіцієнт теплообміну α , критичну вологість W_{KP}).

Співвідношення (13) і (14) дають можливість отримати розв'язки для визначення температури і вологості в будь-якій точці об'єкта сушіння, як і для критичного вологовмісту.

Зокрема, для поверхні матеріалу, коли $X = \frac{x}{R} = 1$, отримаємо

$$\frac{t_{поч} - t_0}{t_c - t_0} = 1 - KoLu \frac{Ki_m}{Bi}; \quad (23)$$

$$\frac{U_{поч} - U_{пов}}{U_{поч} - U_p} = Ki_m LuFo + \frac{1}{3} (Ki_m + \varepsilon KoPnLuKi_m), \quad (24)$$

а для центру матеріалу ($X=0$)

$$\frac{t_{ц} - t_0}{t_c - t_0} = 1 - KoLuKi_m \left(\frac{1}{3} \varepsilon + \frac{1}{Bi} \right); \quad (25)$$

$$\frac{U_{поч} - U_{ц}}{U_{поч} - U_p} = Ki_m LuFo - \frac{1}{6} (Ki_m + \varepsilon KoLuKi_m). \quad (26)$$

Тоді, для перепаду вологості і температури між поверхневими і центральними шарами, тобто середини матеріалу, можна записати

$$\frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}}{t_{\text{с}} - t_0} = \frac{1}{2} - \varepsilon K i_m K o L u, \quad (27)$$

$$\frac{U_{\text{ц}} - U_{\text{пов}}}{U_{\text{поч}} - U_{\text{р}}} = \frac{1}{2} K i_m (1 + \varepsilon P n K o L u). \quad (28)$$

В розмірному виді співвідношення (27) і (28) перепишуться

$$(t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}) = \frac{r q'_m R \varepsilon}{2 \lambda}; \quad (29)$$

$$(U_{\text{ц}} - U_{\text{пов}}) = \frac{q'_m R}{2 a'_m \rho_B} + \delta (t_{\text{п}} - t_{\text{ц}}). \quad (30)$$

Таким чином, якщо критерій фазового перетворення рівний нулю ($\varepsilon = 0$), то перепад температури в матеріалі відсутній, а температура матеріалу рівна температурі мокрого термометра, тобто

$$t(X, \tau) = t_M = t_{\text{с}} - \frac{r q'_m}{\alpha} = \text{const}. \quad (31)$$

Для визначення критичної вологості матеріалу можна використати рівняння (17). Тоді, можна записати

$$U_{\text{кр}} = U_{\text{поч}} - K i_m F o_{\text{кр}} L u (U_{\text{поч}} - U_{\text{р}}), \quad (32)$$

а з врахуванням останнього рівняння отримаємо

$$U_{\text{кр}} = U_{\text{пов}} + \frac{1}{3} (K i_m + \varepsilon K o L u K i_m P n) (U_{\text{поч}} - U_{\text{р}}). \quad (33)$$

Таким чином, теорія тепло-і масообміну дозволяє отримати рівняння, які мають велике теоретичне і практичне значення, оскільки дозволяють за середнім значенням температури шпону і коефіцієнтами перенесення тепла визначити швидкість сушіння, а значить звести розрахунок масообміну до розрахунку теплообміну.

Література

1. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
2. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.