

**ІНЖЕНЕРНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ КОНВЕКТИВНОГО
СУШІННЯ ТОНКИХ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ, ШПОНУ І ДОЩЕЧОК**

Наводяться рівняння, отримані на основі сучасної загальної теорії сушіння тіл.

*Doc. I.M. Ozarkiv; V.P. Seledets, I.A. Sokolovsky, A.I. Matskiv,
S.A. Shevchuk – USUFWT*

**Method of determination of convective drying of thin lumber, veneer and
boards**

Equations, obtained on the basis of the present day theory of drying have been presented.

Процес сушіння є комплексним процесом переносу теплової енергії і речовини (рідини або пари), коли процеси тепло- і масообміну тісно взаємозв'язані між собою. Сам процес сушіння деревини являє собою типовий незворотний процес, при якому вологість (її кількісний вміст) змінюється як в об'ємі, так і в часі.

Розв'язок класичних і операційних методів рішення задач нестационарного тепло- і масопереносу дано в роботах О.В. Ликова, Ю.А. Михайлова, Т.Л. Перельмана, В.В. Краснікова, П.С. Сергоського, Г.С. Шубіна, І.В. Кречетова, В.А. Книша.

Використовуючи відомі закони збереження енергії і речовини [1], а також закони перенесення маси (рідини), можна отримати систему диференціальних рівнянь молярно-молекулярного тепло- і масопереносу, яка й буде математичною моделлю процесів тепло- і масообміну в процесі сушіння. Зокрема, у випадку низькотемпературного процесу сушіння така система математично виразиться таким чином

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= a \nabla^2 t + r \varepsilon \frac{C'_m}{C_q} a'_m \nabla^2 \theta; \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= a'_m \delta_i \nabla^2 t + a'_m \nabla^2 \theta, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності; a'_m – потенціал (коефіцієнт) вологості; r – питома теплота фазового переходу (теплота пароутворення); ε – критерій фазового перетворення (якщо в матеріалі переміщується рідина, то $\varepsilon = 0$; якщо тільки пара $\varepsilon = 1$); $C'_m (C_m = \partial U / \partial \theta)$ – питома ізотермічна масомісткість вологого матеріалу; C_q – питома теплоємність вологого матеріалу; δ_i – термоградієнтний коефіцієнт ($\delta_i = \partial U / \partial t$); θ – потенціал перенесення маси (вологи).

Для практичних розрахунків часу сушіння, як правило, використовують приблизні аналітичні формули, що отримані на основі експериментальних досліджень. Тому більшість з них має емпіричний характер і мають складний вигляд. У зв'язку з чим їх неможливо використовувати у промислових умовах.

Криві сушіння різних деревинних матеріалів мають різний характер, як і тривалості нагрівання; величина періодів постійної і спадаючої швидкостей сушіння залежать від товщини матеріалу. Період нагрівання для тонких пиломатері-

алів (шпон, стружка) становить дуже малу частку від загальної тривалості процесу сушіння (тому ним нехтують). В той час, під час сушіння товстих матеріалів (дошки, мебелів заготовки, бруси і т.п.) період нагрівання є регламентованим режимним параметром, тривалість якого визначається за методикою П.С. Сергоського і Г.С. Шубіна [2]. Період постійної швидкості сушіння може бути відсутнім для товстих матеріалів з відносно низьким вологовмістом, коли критична вологість деревини вища за початкову, тобто $U_{\Pi} < U_{KP}$.

Для періоду постійної швидкості сушіння залежність між часом і вологовмістом $[\tau = f(U)]$ має лінійний характер, тобто виражається рівнянням прямої лінії

$$\tau_1 = \frac{U_{\Pi} - U_{KP}}{N} \quad \text{або} \quad \tau_1 = \frac{W_{\Pi} - W_{KP}}{N}, \quad (2)$$

де U_{Π}, U_{KP} – відповідно початковий і критичний вологовміст, кг/кг; N – швидкість сушіння в першому періоді, кг/(кг·с) або (%/с); W_{Π}, W_{KP} – відповідно початкова і критична вологість.

Визначення тривалості сушіння в першому і другому періоді за рівнянням (2) можливе при наявності кореляційних залежностей N і $U_{KP} (W_{KP})$ від режиму сушіння і теплофізичних та геометричних параметрів об'єкту сушіння. Інакше кажучи, швидкість сушіння в першому періоді зв'язана із коефіцієнтом теплообміну α залежністю виду

$$N = \frac{100\alpha(t_c - t_m)}{\rho_b r R} = \frac{100Nu\lambda_c}{\rho_b r R l} (t_c - t_m), \quad (3)$$

де t_c, t_m – температура агента сушіння на сухому і мокрому термометрах; ρ_b – базова густина деревини; $R(R = V/F)$ – характерний розмір тіла, тобто відношення об'єму тіла до поверхні його випаровування; Nu – теплообмінний критерій Нусельта; λ_c – коефіцієнт теплопровідності агента сушіння; l – визначальний розмір (розмір матеріалу в напрямку руху агента сушіння).

Тоді, з вищеведеного рівняння (2) із врахуванням (3)

$$\tau_1 = \frac{(W_{\Pi} - W_{KP}) \cdot \rho_b \cdot R \cdot r}{100\alpha(t_c - t_m)} = \frac{(W_{\Pi} - W_{KP}) \cdot \rho_b \cdot r \cdot R \cdot l}{100Nu\lambda_c(t_c - t_m)} \quad (4)$$

Формулу (4) доцільно використовувати для відносно тонких сортиментів ($S_1 < 40 \text{ мм}$) як для низько-, так і високотемпературного процесів конвективного сушіння деревини.

У випадку сушіння товстих сортиментів необхідно враховувати поглиблення зони випаровування всередину матеріалу і передачу тепла в цій зоні за рахунок теплопровідності. Тому й розглянемо детально випадок конвективного сушіння матеріалу у формі необмеженої пластини. Нехай, в будь-який час сушіння зовнішня зона пластини товщиною x висохла від початкової вологості W_{Π} до кінцевої W_K вологості, а внутрішня (центральна) зона залишилась сирою ($W_{\Pi} > W_K$). Протягом певного проміжку часу $d\tau$ межа висихання переміститься всередину матеріалу на величину dx . Тоді об'єм матеріалу, який висихується за одиницю часу, з площею F буде становити $\frac{dx}{d\tau} F$, а кількість тепла, що затрачається на випаровування вологи за одиницю часу

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{dx}{d\tau} F \rho_B r \frac{W_{II} - W_K}{100}. \quad (5)$$

В свою чергу, швидкість переміщення зони висихання лімітується величиною теплового потоку, що поглинається шаром dx , і визначиться рівнянням теплопередачі [1]

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{F(t_c - t_{II,M})}{\frac{1}{\alpha} + \frac{x}{\lambda}}. \quad (6)$$

Прирівнявши праві сторони рівнянь (5) та (6) і проінтегрувавши в межах від $x=0$ до $x=R$, отримаємо вираз

$$\tau = \frac{\rho_B R S (W_{II} - W_{PER})}{200(t_c - t_{II,M})} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{S}{4\lambda_M} \right), \quad (7)$$

де W_{PER} – перехідна вологість $\left(W_{PER} = \frac{2W_{Г.Г.} + W_P}{3} \right)$, %.

Для матеріалів товщиною більше 70 мм в рівняння (7) доцільно замість товщини S ввести приведений розмір матеріалу, який враховує вплив випаровування з бокових кромок.

П.С. Серговський [3] для низькотемпературного процесу сушіння деревини, коли $(W_{II} > W_{Г.Г.})$, наводить рівняння

$$\tau = \frac{S^2}{24\alpha'_m} \left(1 + \frac{\pi^2}{HS} \right) \frac{W_{II} - W_{PER}}{W_{Г.Г.} - W_P}, \quad (8)$$

де $H(H = \alpha'_U / \alpha'_m)$ – відношення коефіцієнта вологообміну до коефіцієнта теплопровідності; $W_{Г.Г.}$ – границя гігроскопічності.

Необхідно зауважити, що перехідна вологість W_{PER} , яка відображає рівняння параболи, тобто

$$W_{PER} = \frac{2}{3} W_{Г.Г.} + \frac{1}{3} W_P \quad (9)$$

відзначає середню вологість матеріалу в той момент часу сушіння, коли вологість центру матеріалу досягає вологості границі гігроскопічності.

Відзначимо, що аналіз дослідних кривих сушіння показує: період падаючої швидкості сушіння починається значно раніше, ніж вологість досягне значення W_{PER} . Тому, для виявлення наявності періоду постійної швидкості сушіння необхідно встановити наявність критичної вологості (вологомісту) при даних режимних параметрах. Значення критичної вологості визначається за формулою

$$W_{KP} = W_{ПОВ.КР} + \frac{NR^2}{3\alpha'_m} = W_{ПОВ.КР} - \frac{q'_m R}{3\alpha'_m \rho_B}, \quad (10)$$

де: $W_{ПОВ.КР}$ – вологість поверхні матеріалу в критичній точці, %; N – швидкість сушіння в першому періоді, %/с; q'_m – інтенсивність випаровування в першому періоді, кг/(м²·с).

Необхідно нагадати, що критична вологість деревини прогнозує процес сушіння і є дуже важливим параметром.

У випадку, коли $W_{KP} > W_{II}$ ($W_{KP} < W_{II}$), то періоду постійної швидкості немає і весь процес сушіння проходить в періоді спадаючої швидкості сушіння.

Для періоду спадаючої швидкості сушіння можна використати рівняння [4]

$$\tau_2 = 2,3 \left(\frac{4R^2}{\pi^2 \alpha'_m} + \frac{R}{\alpha'_u} \right) \lg \frac{W_{KP} - W_P}{W_K - W_{KP}}, \quad (11)$$

де α'_u – коефіцієнт вологообміну, віднесений до різниці вологостей, м/с.

Якщо критична вологість менша за початкову, тобто $W_{KP} < W_{II}$, то в рівняння (11), замість W_{KP} , необхідно підставити значення початкової вологості W_{II} .

Необхідно наголосити, що залежно від величини масообмінного критерію Біо (Bi'_m) вплив виразів у дужках рівняння (11) буде різним. Так, наприклад, коли $Bi'_m > 100$, то другим членом в дужках можна нехтувати, тобто процес сушіння повністю визначається теплопровідністю. Коли $Bi'_m < 0,100$, то тоді першим членом в дужках можна знехтувати, тобто процес сушіння буде визначатися тільки зовнішнім вологообміном. На практиці, в реальних тілах $0,100 < Bi'_m < 100$; тому обидва члени в дужках будуть рівнозначними.

У зв'язку з тим, що режими сушіння пиломатеріалів в низькотемпературних камерах періодичної дії є ступінчастими, тобто режимні параметри (t_c, t_m, v) змінюються стрибкоподібно, то значення α'_m і W_P будуть залежати від режиму. Інакше кажучи, поетапний розрахунок є не досить зручним для виробничих умов.

Необхідно зауважити, що формули для визначення величини вологості поверхні в критичній точці $W_{П.КР}$ мають різний характер. Так, наприклад, Ю.В. Книш [4] рекомендує формулу виду

$$W_{П.КР} = 19 + 12,5 \left(\frac{100 - t_m}{100} \right) \exp\{0,51(t_m/100)\}, \quad (12)$$

Як показує обробка експериментальних досліджень, величину $W_{П.КР}$ доцільно визначати за отриманою нами формулою виду

$$W_{П.КР} = 32,5 - 0,135 t_m \quad \% \quad (13)$$

Інтенсивність випаровування в першому періоді визначається за співвідношенням виду

$$q'_m = \frac{\alpha}{r} (t_c - t_m) = \frac{Nu \lambda_c}{rl} (t_c - t_m), \quad (14)$$

Коефіцієнт теплообміну в періоді постійної швидкості сушіння різних сортиментів визначають [1]

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l_c}, \quad (15)$$

де λ_c – коефіцієнт теплопровідності агента сушіння.

Значення коефіцієнта λ_c при використанні пари, топкових газів, як агентів сушіння, приймається за відповідними таблицями, що наведені в технічній довідковій літературі, а для атмосферного повітря визначається за формулою [1]

$$\lambda_c = [4,67 - (4,16 + 2,45\varphi)] \cdot 10^{-2} \cdot (7,14 + 4,46\varphi) \cdot 10^{-5} \cdot T_c, \quad (16)$$

де: φ – відносна вологість (ступінь насичення повітря водяною парою), $\varphi = 0...1,0$; T_c – абсолютна температура, К.

При конвективному сушінні теплообмінний критерій Нусельта для періоду постійної швидкості сушіння визначається за критеріальним рівнянням виду [1]

$$Nu = 0,0641 Re^{0,80} \left(\frac{T_c}{T_m} \right)^2 Pr^{0,33}, \quad (17)$$

де: $Re = \frac{V_{II} \cdot l}{\nu_c}$ – критерій Рейнольдса; $Pr = \frac{\nu_c}{a}$ – критерій Прандтля (для повітря $Pr = 0,72$, а для пари $Pr = 1,1$).

Коефіцієнт кінематичної в'язкості вологого повітря знаходиться за формулою [1]

$$\nu_c = [0,113T_c - (18,24 + 7\varphi)] \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (18)$$

Питома теплота пароутворення r приймається за таблицями теплофізичних властивостей насиченої пари при відомій температурі мокрого термометра t_m , або визначається

$$r = 2490(1 - 0,001t_m) \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \quad (19)$$

Таким чином, знаючи інтенсивність сушіння (випаровування вологи з деревини) q'_m , можна визначити швидкість сушіння в першому періоді, тобто

$$N' = \frac{q'_m}{\rho_b R} \quad (20)$$

Для підрахунку коефіцієнта потенціалопровідності a'_m необхідно визначити напрям руху вологи в деревині при її сушінні. У випадку, коли в камері знаходяться дошки тангентального розпилу, то за напрямом переміщення потоку води приймається радіальний, і навпаки.

При змішаному вкладанні дошок у штабель необхідно приймати тангентальний потік води в матеріалі.

Величина коефіцієнта потенціалопровідності (вологодіпроводності) деревини визначають за формулою

$$a'_m = 23,5 \cdot 10^{-12} \left(\frac{T_m}{100} \right)^{23} \left(\frac{400}{\rho_b} \right)^{3,9} \left(1 + \frac{2V_{II}}{100} \frac{\sin \beta}{\sin 90^\circ} \right) \text{ см}^2/\text{с}, \quad (21)$$

де: V_{II} – вміст (%) серцевинних променів в загальній масі деревини (для сосни $V_{II} = 6\%$, вільхи – 5% , берези – 11% , клена – 15% , бука – 35% , дуба – 25%); β – кут, утворений дотичною до річного кільця і нормаллю, що проведена посередині ширини (для радіального потоку вологи – $\beta = 90^\circ$, а для тангентального – $\beta = 0^\circ$), град.

Середній коефіцієнт вологодіобміну a'_U для всього періоду спадаючої швидкості сушіння визначається

$$a'_U = \frac{N'R}{0,25} = \frac{NR}{25}. \quad (22)$$

Якщо $U_{KP} \geq U_{II} (W_{KP} \geq W_{II})$, то період постійної швидкості відсутній. Але, якщо $U_{KP} < U_{II}$, то тривалість періоду постійної швидкості сушіння становить

$$\tau_1 = \frac{U_{II} - U_{KP}}{N'} = \frac{(U_{II} - U_{KP}) \rho_b R}{q'_m}. \quad (23)$$

Таким чином, загальна тривалість сушіння може бути знайдена за виразом

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{U_{II} - U_{KP}}{N'} + 2,3 \left(\frac{4R^2}{\pi^2 a'_m} + \frac{R}{a'_U} \right) \lg \frac{U_{KP} - U_p}{U_K - U_p} \quad (24)$$

Останнє рівняння отримане на основі нестационарного тепломасопереносу, а також експериментального дослідження кінетики і динаміки процесу сушіння різних сортментів.

Література

1. Озарків І.М., Сорока Л.Я., Грицюк Ю.І. Основи аеродинаміки і тепломасообміну: Навч. посібник. – К.: ІЗМН, 1997. – 280 с.
2. Серговський П.С. Оборудование гидротермической обработки древесины. М.: Лесн.пром-сть.
3. Озарків І.М., Крамар В.Д., Соколовський І.А. Окремі рішення нестационарного перенесення тепла і маси (вологи) при конвективному сушінні деревини// Науковий вісник. – Львів. – 1999, вип. 9.5. – С. 79–82.
4. Кныш Ю.В. Интенсификация конвективной сушки пиломатериалов твердых лиственных пород древесины// Автореф....канд. тех. наук. – Львов, 1991. – 21 с.

УДК 674.093 Доц. Л.Н. Горбачова, к.т.н.; студ. О.М. Бартусевич – УкрДЛТУ ВПЛИВ РОЗМІРІВ ПИЛОВОЧНИКА НА ВИХІД ПИЛОПРОДУКЦІЇ ДЛЯ ДЕРЕВ'ЯНОГО БУДИНКОБУДУВАННЯ

Описується дослідження виходу пиломатеріалів для будинкобудування залежно від діаметру пиловочника.

Doc. L.N. Gorbachova, O.M Bartusevich – USUFWT

The influence of dimensions of dolttimber on exit timber for wood housebuilding

In this article is described the research of invention of timber for housebuilding depending on diameter of dolttimber.

Одним з найбільших ринків деревини і матеріалів на її основі є житлове будівництво. У зв'язку з значним збільшенням обсягів дерев'яного будинкобудування підприємствами будівельних матеріалів на заміну панельних і об'ємно-блочних конструкцій почата переорієнтація на виготовлення малоповерхових будинків. Пиломатеріали продовжують залишатись основною сировиною для виготовлення каркасів, конструкційної і чистової обшивки, погонажних і столярних виробів.

У багатьох випадках фанера і деревні плити замінюють пиломатеріали; не-деревні будівельні системи випробовувалися багато разів, починаючи з 30-х років [1], але показали свою нездатність. Будівельні деталі заводського виготовлення і готові вузли будинків виготовляють переважно з деревини.