

елькометричного методу [3,4]. Запропонований давач складається з системи високопотенціальних і низькопотенціальних електродів у вигляді компланарних концентричних кілець, закріплених на ізоляційній основі; високопотенціальний і віддалені від нього низькопотенціальні електроди виготовлені у вигляді суцільних кілець. При цьому віддалі між електродами вибрана такою, що робочі ємності між високопотенціальним і кожним низькопотенціальним електродами були рівними між собою.

За допомогою розробленого давача було проведено експериментальне дослідження на чорнових заготовках меблевого виробництва (хвоя, бук, дуб). Як показали експериментальні дослідження, глибина проникнення електромагнітного поля приблизно дорівнює віддалі між електродами. Самі ж віддалі між електродами відповідно дорівнювали: 2, 4, 6 і 20 мм. Приблизно таким же параметрам дорівнювала ширина "а" низькопотенціальних електродів.

Давач ставився на вказаний вище досліджуваний матеріал і підключався до приладу Е12-1, за допомогою якого фіксувалась робоча ємність. Дослідження проводилось при різній вологості чорнових заготовок меблевого виробництва, що дозволило побудувати градуйовані криві, які відображають залежність вологості в матеріалі від робочої ємності. Отримані градуйовані криві зображені на рис. 1 – для бука (є ще градуйовані криві для хвої і дуба).

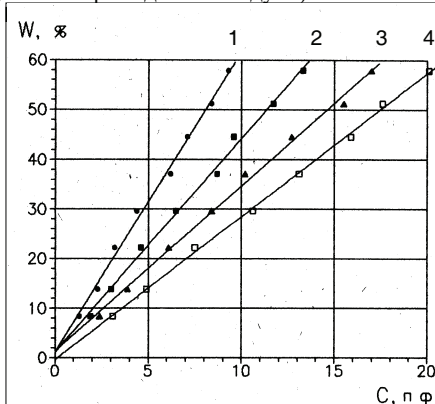


Рис. 1. Градуйовані криві визначення вологості по товщині матеріалу для бука: 1,2,3,4 – глибина проникнення електромагнітного поля відповідно: 2 мм, 4 мм, 8 мм, 20 мм

Таким чином, знаючи середню вологість на кожній з вищевказаних глибин в матеріалі (в довільно вибраний момент часу), можна побудувати поле розподілу вологості в матеріалі по його товщині.

Література

1. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 431 с.
2. Исследование и оптимизация теплопереноса в сушильно-термических процессах. Сб. научных трудов. – Минск: ИТМО, 1983. – 147 с.
3. Берлинер М.А. Измерения влажности. – М.: Энергия, 1983. – 396 с.
4. А. с. 711450 (СССР). Первичный преобразователь влажности/Ройфе Б.В. / – Оpubл. в Б. И., 1980, № 27/22.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЗВ'ЯЗАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ КОНВЕКТИВНОМУ ВИСУШУВАННІ ДЕРЕВИНИ

Дослідження числовим методом процесу конвективного висушування деревини у формі бруска при змінних режимах на основі математичної моделі зв'язаного тепломасообміну.

Prof. Z. Mazzyak, doc. I. Ilkyv, doc. O. Krehovetsky – NU "Lvivs'ka Politekhnikha"

Mathematical model of conected heat – mass – changing during convective drying of wooding

Investigating by digital method process of convective drying of wood in the formed shape in the variable regimes by the mathematic model connected heat-mass exchange.

Під час конвективного висушування вологий матеріал контактує з гарячим газовим середовищем, отримує від нього тепло, яке витрачається на нагрівання матеріалу і випаровування вологи. Таким чином зміна агрегатного стану маси вологи впливає на формування температурного поля в матеріалі. Характер температурного поля в свою чергу визначає термодифузійний потік вологи, який часто є гальмом при русі вологи в напрямі до поверхні твердого пористого матеріалу, яким і є деревина, за рахунок дифузії.

Такий взаємозумовлений вплив можливо кількісно оцінити з допомогою системи диференціальних рівнянь тепломасопереносу [1], яка для матеріалу у формі бруска записується так:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_T \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \frac{e_c}{C} \frac{\partial U}{\partial \tau} \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + a_m \delta \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

В деяких випадках доцільно проводити процес висушування з використанням методу теплових хвиль [2]. При цьому зміна температури газового середовища t_c може оцінюватися з допомогою залежності згідно з законом простого гармонійного коливання

$$t_c = t_y + \Delta t \cdot \cos 2\pi \nu \tau \quad (2)$$

де: t_y – температура заданого рівня центра, град; Δt – половина амплітуди, град; ν – частота коливання, 1/с; τ – час, с.

Застосування такого режиму висушування деревини дозволяє інтенсифікувати внутрішній масоперенос, який визначає швидкість процесу в цілому. Для цього систему (1) необхідно доповнити відповідними крайовими умовами.

Початкові умови

$$t|_{\tau=0} = t_0 = \text{const}; \quad U|_{\tau=0} = U_0 = \text{const}; \quad (3)$$

Умови симетрії

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0} = 0. \quad (4)$$

Граничні умови:

а) вологий стан на поверхні

$$B \cdot P_s (1 - \varphi) = -a_m \rho_0 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=R_i} + \delta \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=R_i} \right] \quad (5)$$

$$\alpha(t_y + \Delta t \cdot \cos 2\pi \nu \tau) = \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=R_i} + (1 - \varepsilon) r_c B P_s (1 - \varphi);$$

б) гігроскопічний стан на поверхні

$$K \cdot R_i (W - U_p) = -a_m \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=R_i} + \delta \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=R_i} \right] \quad (6)$$

$$\alpha(t_y + \Delta t \cdot \cos 2\pi \nu \tau) = \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=R_i} + (1 - \varepsilon) r_c K R_i (W - U_p)$$

$$W = \frac{1}{R_1 R_2} \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} U dx dy,$$

де: i – приймає значення 1 або 2, відповідно до якого проводяться розрахунки по висоті та ширині бруска, тобто при R_1 і R_2 ; α – коефіцієнт тепловіддачі; λ – коефіцієнт теплопровідності; a_m – коефіцієнт вологопровідності; B – коефіцієнт випаровування; P_s – пружність насиченої водяної пари при температурі поверхні матеріалу; δ – коефіцієнт термодифузії; K – коефіцієнт швидкості сушіння; W – середній по об'єму вологовміст матеріалу; a_T – коефіцієнт температуропровідності; x, y – поточні лінійні розміри бруска; U_p – рівноважний вологовміст бруска.

Для того, щоб було можливо розв'язати системи диференціальних рівнянь числовим способом з допомогою обчислювальної техніки її було замінено еквівалентними рівняннями в кінцевих різницях [3, 4]. В результаті заміни система рівнянь тепломасопереносу для бруска набула такого вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{t_{i,j,k+1} - t_{i,j,k}}{l} &= a_T \left(\frac{t_{i-1,j,k} - 2t_{i,j,k} + t_{i+1,j,k}}{h^2} + \frac{t_{i,j-1,k} - 2t_{i,j,k} + t_{i,j+1,k}}{h^2} \right) + \\ &+ \frac{\varepsilon r_c}{C} \frac{U_{i,j,k+1} - U_{i,j,k}}{l} \\ \frac{U_{i,j,k+1} - U_{i,j,k}}{l} &= a_m \left(\frac{U_{i-1,j,k} - 2U_{i,j,k} + U_{i+1,j,k}}{h^2} + \frac{U_{i,j-1,k} - 2U_{i,j,k} + U_{i,j+1,k}}{h^2} \right) + \\ &+ a_m \delta \left(\frac{t_{i-1,j,k} - 2t_{i,j,k} + t_{i+1,j,k}}{h^2} + \frac{t_{i,j-1,k} - 2t_{i,j,k} + t_{i,j+1,k}}{h^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Початкова умова – перші лінійки матриць, що відповідають початковому моменту часу, заповнюються цифрами, які дорівнюють значенням констант t_0 і U_0 .

Умови симетрії

$$\begin{aligned} t_{0,j,k} &= t_{1,j,k} & U_{0,j,k} &= U_{1,j,k} \\ t_{i,0,k} &= t_{i,1,k} & U_{i,0,k} &= U_{i,1,k} \end{aligned} \quad (8)$$

Граничні умови:

а) вологий стан

$$B \cdot P_s (1 - \varphi) = -a_m \rho_0 \frac{U_{n-1,j,k} - U_{n,j,k}}{h} - a_m \rho_0 \delta \frac{t_{n-1,j,k} - t_{n,j,k}}{h} \quad (9)$$

$$\alpha(t_y + \Delta t \cdot \cos 2\pi \nu l k - t_{n,j,k}) = \lambda \frac{t_{n-1,j,k} - t_{n,j,k}}{h} + (1 - \varepsilon) r_c B P_s (1 - \varphi);$$

б) гігроскопічний стан

$$K R (W - U_p) = -a_m \rho_0 \frac{U_{n-1,j,k} - U_{n,j,k}}{h} - a_m \rho_0 \delta \frac{t_{n-1,j,k} - t_{n,j,k}}{h} \quad (10)$$

$$\alpha(t_y + \Delta t \cdot \cos 2\pi \nu l k - t_{n,j,k}) = \lambda \frac{t_{n-1,j,k} - t_{n,j,k}}{h} + (1 - \varepsilon) r_c K R (W - U_p)$$

Середня вологість в матеріалі

$$W = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m U_{i,j}. \quad (11)$$

Розрахунок наведеної вище моделі в кінцевих різницях проводився на комп'ютері за допомогою програми, в якій організовано резервування необхідних масивів, відкриття файлів вхідних і вихідних даних, ввід і друкування вхідних даних для їх контролю, організація процесу обчислень параметрів температури, вологості і середньої вологості, їх друкування у вигляді масивів чи графіків.

Оскільки процес сушіння деревини є досить тривалим, а для точності розрахунку параметрам, які відображають кількість секунд в одному кроці та віддалі між точками не можна присвоювати великих значень (дослідження показали, що вони, відповідно, повинні бути меншими 100 с та 2 мм), то для того, щоб отримати в процесі розрахунку середню вологість меншою 8 %, треба зробити більше 10000 кроків обчислень.

Стандартний опис масивів за температурою і вологістю (T і U) для одного з варіантів розв'язку такої задачі набуває такого вигляду:

$$T(IM, JM, 10000), U(IM, JM, 10000) \quad (12)$$

де: IM, JM – кількість точок по горизонталі і вертикалі відповідно в матриці температури і вологості. Тому для спрощення та прискорення вирішення цієї задачі було замінено масиви (12) через одновимірні масиви: $T(IND)$, $U(IND)$

Пошук загального одновимірного індексу проводився за такою схемою:

$$IND = IM \cdot (j - 1) + i$$

Після завершення головної програми всі вхідні, проміжні та вихідні дані знаходяться у вихідному файлі. При необхідності їх можна роздрукувати.

Література

1. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло и массопереноса. – М.: Теплоэнергиздат, 1963. – 535 с.
2. Мазяк З.Ю. Тепло и массоперенос в пористых телах при переменных потенциалах в среде. – К.: Вища школа, 1979. – 120 с.
3. Коллац Л.Н. Численные методы решения дифференциальных уравнений. – М.: Инлит, 1983. – 459 с.
4. Михайлов М.Д. Обобщенное решение задач тепло и массопереноса. В кн.: Математические и физические вопросы теломассообмена. – Минск: ИТМО, 1973, – С. 135.

УДК 66.045

Инж. Б.М. Микичак; проф. Я.М. Ханик, д.т.н. – НУ "Львівська політехніка"; доц. В.М. Гербей, к.т.н. – УкрДЛТУ

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЛИСТОВИХ ДЕРЕВИННИХ МАТЕРІАЛІВ

Наведена кінетика дослідження листових деревинних матеріалів і кінетичні коефіцієнти, які входять в рівняння, що дозволяє прогнозувати процеси сушіння в першому умовному періоді.

Eng. B. Mykychak; prof. Ya. Hanyk – NU "Lvivs'ka Politekhnikha"; doc. V. Gerbey – USUFWT

Intensification the drying of wood in the formed shape

The kinetic of the investigation of the flat wooden materials and kinetic coefficients are presented.

Сушіння деревини і виробів із неї являє собою складну не тільки теплофізичну, але особливо технологічну проблему.

Якість висушуваної деревини у більшості випадків визначає собівартість кінцевої продукції і її якість, оскільки у багатьох випадках при існуючих методах сушіння значний відсоток сухої деревини не може бути використаний в подальшому виробництві. А враховуючи складність будови деревини, особливості зв'язку вологи з матеріалом розробити обґрунтовані режими сушіння з врахуванням внутрішнього вологоперенесення і зовнішнього масообміну є складною задачею [1].

Сушіння шпону, який широко використовується для виробництва меблів та інших виробів, є також складною технологічною і енергетичною проблемою. Найбільш поширені методи сушіння шпону – конвективний, кондуктивний, конвективно-кондуктивний, які характеризуються значними енергетичними затратами, низькою якістю висушеного матеріалу, громіздкістю і складністю сушильних агрегатів [2]. Незважаючи на низьку газопроникність деревини [3] істотно зменшити енергетичні затрати і підвищувати якість висушуваного шпону, збільшити продуктивність сушильного обладнання можна при застосуванні більш ефективних методів і технологій сушіння. Одним з таких методів є метод фільтраційного сушіння, який широко використовується для зневоднення листових газопроникних капілярно-пористих і капілярно-пористих колоїдних матеріалів, суть якого полягає в тому, що теплоносій під дією перепаду тисків рухається через капіляри і канали газопроникного об'єкту [4]. Застосування фільтраційного методу сушіння обґрунтовується і структурою шпону, яка значно відрізняється від структури су-

цільного дерева, наявністю мікро- і макротріщин, що виникають в процесі його виготовлення.

Механізм фільтраційного сушіння істотно відрізняється від механізму конвективного і конвективно-кондуктивного та інших існуючих методів. Особлива відмінність полягає в динаміці процесу. При такому сушінні теплоносій рухається через пористу структуру матеріалу і при цьому теплова енергія майже повністю використовується на випаровування вологи [5]. При вивченні процесу сушіння багатьох матеріалів фільтраційним методом було встановлено, що інтенсивність сушіння лімітується інтенсивністю підведення тепла [4].

Внутрішнє вологоперенесення, на відміну від конвективного процесу має менший вплив на кінетику сушіння при фільтраційному методі, оскільки процес тепло-масообміну протікає безпосередньо на поверхні капілярів і каналів пористої структури об'єкту, тобто наявний внутрішньо-капілярний масообмін з одночасним винесенням рідкої фази і парів вологи з матеріалу.

Для вивчення можливості інтенсифікації сушіння шпону використовується фільтраційний метод. З цієї метою проводилися дослідження із зразками березового шпону діаметром 0,1 м і товщиною $H=1,5 \cdot 10^{-3}$ м, які розміщувалися на перфорованій перегородці. Рух теплоносія через пористу структуру матеріалу зумовлювався перепадом тисків, який створювався за рахунок розрідження під перфорованою перегородкою.

Дослідження проводилися при температурах теплоносія 50-120° С перепадах тисків (0,2-0,85) 10^5 Па.

Кінетичні криві сушіння досліджуваного матеріалу характеризуються наявністю умовних першого і другого періодів, період механічного витіснення відсутній. Під час першого умовного періоду вологість матеріалу зменшується з початкової $W_0 = 60-65\%$ до критичної $W_{кр}$, яка для досліджуваного матеріалу приблизно дорівнює 16 %. Підвищення температури і перепаду тисків призводять до збільшення, а зростання товщини стінки матеріалу – до зменшення швидкості сушіння.

Час сушіння при $t=120^\circ\text{C}$ і $\Delta p = 0,82 \cdot 10^5$ Па. до $W=12-13\%$ становить 120–150 с (процес інтенсифікується в 4 рази) при одночасному зменшенні енергетичних затрат порівняно з існуючими методами і забезпеченні високої якості висушеного матеріалу (відсутність деформацій, розтріскування, перегрівання).

Для узагальнення результатів досліджень використана модель ідеального витіснення, яка описує зміну вологості у першому умовному періоді [4]. Модель в скороченому вигляді може бути представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial H} = a(1 - \varphi); \quad \frac{\partial W}{\partial \tau} = n(1 - \varphi); \quad a = \frac{Pmn}{0,622PS}; \quad n = SKP_8; \quad m = \frac{\rho F}{100m} \quad (1,2,3,4)$$

Розв'язування системи рівнянь (1) при певних допущеннях дозволяє отримати кінетичне рівняння [4] для першого умовного періоду

$$\frac{W}{W_0} = 1 - \alpha t e^{-a \cdot h} \quad (5)$$

де $\alpha, 1/c; a, 1/m$.