

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ВОЛОГИ І ВНУТРІШНЬОГО НАПРУЖЕННЯ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗАГОТОВОК

*В статті розглянуті основні закономірності зміни вологи і внутрішніх напруг, що виникають в процесі сушіння деревини. Обґрунтовані особливості їх розрахунку дають можливість визначити раціональні параметри сушильного агента.*

### Постановка задачі

Застосовувані в відомих камерах періодичної дії режими сушіння деревини, з погляду тривалості процесу та якості отримуваної продукції і енергетичних витрат, є недостатньо оптимальними. Подальше вдосконалення режимів і технології сушіння, що сприяє підвищенню продуктивності сушильних камер і поліпшенню якості вихідної продукції – важлива практична задача.

### Аналіз досліджень та публікацій

В наукових роботах останніх років встановлено ряд важливих закономірностей, що пов'язані із визначенням напружень, які виникають всередині матеріалу в процесі сушіння [7,8]. Але, як показав проведений аналіз виконаних досліджень, запропоновані в них методи розрахунку не завжди дають можливість визначити їх дійсну величину і розрахувати раціональні параметри сушильного агента. Так, наприклад, в працях професора Б.І. Огаркова [5,6] при вирішенні одновісної задачі було запропоновано використовувати записаний в диференціальній формі закон деформування деревини, що відображає ефект переродження пружних деформацій в залишкові лише на першому етапі, а всі інші етапи сушіння ним не враховуються. Аналогічні дослідження процесів сушіння деревини тільки на початковій стадії наведені у роботах проф. П.С. Серговського.

### Формулювання цілей

Метою даної роботи є виявлення закономірностей зміни вологості і внутрішніх напруг, що виникають в процесі сушіння деревини, та обґрунтування методики розрахунку даного процесу. Таким чином, задачею цієї роботи є підбір таких параметрів сушильного агента, які призведуть до зменшення як тривалості сушіння, так і браку у готовій вихідній продукції.

### Викладення основного матеріалу

Найбільш ефективною і перспективною для сушіння деревини є стимулююча дія на потік вільної вологи. Рідина, що знаходиться в пористому тілі деревини, переміщується в ній завдяки таким чинникам, як: рух фільтрації під дією сили тяжіння, гідростатичний тиск і капілярне всмоктування. Величина капілярного тиску  $p_{\sigma}$  для увігнутого меніска змочуючої рідини радіусом  $r$  може бути визначена згідно співвідношенню Лапласа [1].

Перепад капілярного тиску  $\Delta p$  при неоднакових радіусах  $r_1$  та  $r_2$  по довжині капіляра, що створює рух рідини в капілярі, може бути визначена згідно відомою формули Лапласа:

$$\Delta p = -2 \cdot \sigma \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

де  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу.

Існує гіпотеза, що при сушінні деревини волога, яка знаходиться в капілярах  $r \leq 10^{-3}$  см, видаляється спочатку з крупніших, а потім з менших за радіусом капілярів. Внаслідок цього, зі зменшенням вологості деревини капілярний тиск поступово зростає, а тому потік вологи  $i_k$ , який переміщується у напрямі градієнта вологості, приблизно може бути прийнятий у відповідності із роботою [1] і представлений у вигляді наступної залежності:

$$i_k = -D_k \frac{dW}{dx} \quad (2)$$

де  $D_k$  — коефіцієнт капілярної вологопровідності.

До колоїдного тіла, тобто до деревини, можна застосувати закон Фіка [1,3], згідно якого за наявності градієнта гігроскопічної вологості на протязі часу  $t$  виникає дифузійний потік вологи у напрямі координати  $x$ :

$$i = \frac{dW}{dt} = -D \frac{dW}{dx} \quad (3)$$

де  $D$  - коефіцієнт дифузійної вологопровідності.

За потенціал перенесення вологи в деревині при ізотермічних умовах та при  $r \leq 10^{-2}$  мм можна прийняти градієнт вологості з різними коефіцієнтами вологопровідності, які є залежними від значень вологості деревини, її температури, напрямку потоку вологи, щільності деревини, її реологічних властивостей та інших чинників.

Термовологопровідністю на перенесення вологи в деревині при середніх і особливо при підвищених температурах процесу сушіння можна знехтувати. Враховуючи таке припущення, для одновимірної задачі можна застосувати лінійне (з постійними коефіцієнтами) диференціальне рівняння, аналогічне в основній частині рівнянню Фур'є для теплопровідності [3,4]:

$$-\frac{dW}{dt} = D_k \frac{d^2W}{dx^2} - D \frac{d^2W}{dx^2} + D_m \frac{d^2p}{dx^2} \quad (4)$$

де  $D$ ,  $D_k$ ,  $D_m$  - коефіцієнти капілярної, дифузійної і молярної вологопровідності, які для прийнятих інтервалів часу процесу сушіння, приймаються постійними;

$x$  - координата по товщині нескінченної пластини.

У наведеному рівнянні (4): ліва частина є швидкістю зміни локальної вологості  $W$  протягом часу  $t$  і характеризує криву сушіння; перший член правої частини — другу похідну розподілення вологості по товщині матеріалу з урахуванням капілярної вологопровідності; другий член – дифузійну вологопровідність; третій — молярну вологопровідність (коли температура деревини при атмосферному тиску наближається до 100°C або перевищує цю температуру). Дане рівняння доцільно для спрощення подальших розрахунків розглянути у наближеному вигляді

$$-\frac{dW}{dt} = D \frac{d^2W}{dx^2}, \quad (5)$$

з урахуванням лише дифузійної вологопровідності, що відноситься до випадків сушіння деревини з початковою вологістю нижче за межу гігроскопічності.

Аналіз рівняння (5) показав, що його розв'язок є також досить складним навіть при простих початкових і граничних умовах. Досягається певне спрощення, якщо знехтувати першим періодом сушіння, що не встановився в часі, а розглядати наступний регулярний режим, який протікає при постійному стані середовища і незмінному коефіцієнті вологопровідності по  $x$  і  $t$ , то можна одержати криву вологості деревини по товщині пластини (широкої дошки) у вигляді квадратичної параболи [1]:

$$W_k = W_u - \left(\frac{x}{B}\right)^2 (W_u - W_n) = W_u \left(\frac{x}{B}\right)^2 \cdot \Delta W \quad (6)$$

де  $W_k$  – локальна вологість деревини на відстані  $x$  від середньої площини пластини в напрямі перпендикулярному поверхні;  $B$  – половина товщини пластини;  $W_u$  – вологість в центрі пластини;  $W_n$  – вологість на поверхні пластини;  $W_u - W_n = \Delta W$  – найбільший перепад вологості по товщині пластини.

Враховуючи, що площа параболи складає 2/3 площі прямокутника тієї ж основи і висоти, то середня вологість  $W$  деревини в процесі сушіння можна визначити на основі максимальної її вологості в центральній частині дошки  $W_u$  і мінімальної на її поверхні  $W_n$ :

$$W = \frac{2}{3}(W_u - W_n) + W_n \quad (7)$$

Далі, якщо  $W_n$  замінити близькою їй  $W_p$  (при інтенсивній циркуляції повітря  $\frac{D}{\beta} \rightarrow 0$ ), то одержаний перепад вологості  $\Delta W = W_u - W_n$  по товщині матеріалу становитиме [1,9]:

$$\Delta W = \frac{2}{3}(W - W_p). \quad (8)$$

Мінімальну вологість всередині товщини матеріалу, можна визначити виходячи із рівняння (7):

$$W_u = \frac{3}{2} \cdot W - \frac{1}{2} W_n = \frac{1}{2}(3W - W_n) \quad (9)$$

Для визначення стадії і оцінки процесу, а також при розробці його автоматизації перспективним є початковий параметр  $\Delta C$  – перепад сушіння, що являє собою різницю між середньою вологістю  $W$  матеріалу, що вимірюється по контрольних його відрізках, і рівноважною вологістю сушильного агента, який визначається за показами психрометра. Згідно рівняння (8) маємо наступне:

$$\Delta C = \frac{2}{3} \cdot \Delta W, \text{ тобто } W - W_p = \frac{3}{2}(\Delta C), \quad (10)$$

тобто перепад сушіння  $\Delta C$  дорівнюватиме двом третинам перепаду вологості  $\Delta W$  або перепад вологості відповідатиме півторазовій величині перепаду сушіння.

Таким чином, рівняння кривої сушіння, що описує процес сушіння, а саме його тривалість, теоретично може бути представлено у вигляді формули (11) [3]:

$$t = A \cdot \lg \frac{W_k - W_p}{W - W_p} \quad (11)$$

де  $W$  - поточна вологість деревини, %;

$A$  - коефіцієнт, [1].

На рисунку наведено експериментальну криву процесу сушіння деревини (заготовки із дуба).

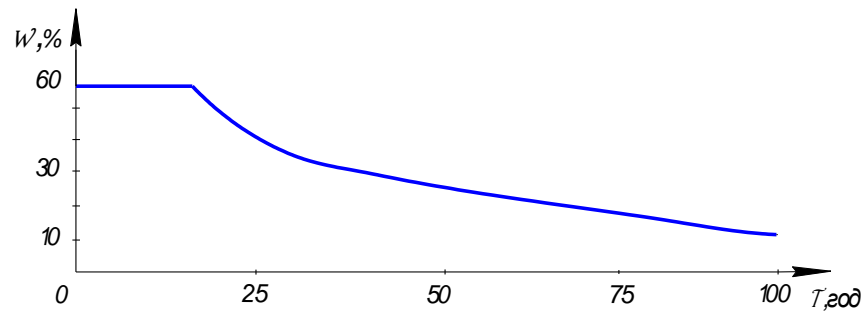
Інколи для наближеного розрахунку внутрішнього напруження використовується модель дошки з  $n$  стержнів товщиною  $a$ , жорстко зв'язаних по кінцях [2]. Тоді, у загальному випадку, для дошок характерний асиметричний розподіл вологості за їх товщиною. Виходячи із розв'язку одноосної статично невизначної задачі, можемо визначити, що напруження  $\sigma$  у  $i$ -ому стержні дорівнюватиме:

$$\sigma_i = E_i(\alpha \cdot \Delta W_i - \varepsilon_i^*) \quad (12)$$

де  $E_i$  - модуль пружності (показник жорсткості);

$\alpha$  - коефіцієнт висихання;

$\Delta W_i = W_{i_{\max}} - W_i$  - перепад вологості ( при  $W_{i_{\max}} \leq W_{n.n.}$  ).



**Рисунок. Експериментальна крива процесу сушіння деревини (заготовки із дуба)**

Як відомо, модуль пружності залежить від вологості і температури деревини. Врівноважуюча деформація  $\varepsilon_i^*$  може бути представлена рівнянням прямої:

$$\varepsilon_i^* = m - (i-1) \cdot k \cdot a \quad (13)$$

де  $m$  - врівноважуюча деформація першого стержня;

$k$  - кутовий коефіцієнт.

Значення  $m$  та  $k$  визначаються з умов рівноваги  $\sum_{i=1}^n \sigma_i (i-1) \cdot a = 0$ .

Визначення напруження в процесі сушіння на послідовних порівняно нетривалих етапах ( кроках ) може здійснюватися згідно наступної процедури.

Напруження на кожному заданому кроці розрахунку  $j$  дорівнюватиме:

$$\sigma_i^j = \sigma_i^{j-1} + \delta \sigma_i^j, \quad (14)$$

а прирости напруження в вибраному шарі  $i^j$  складатимуть:

$$\delta \sigma_i^j = \alpha \cdot E_i^j [\delta \Delta W_i^j - m = (i-1) \cdot k \cdot a], \quad (15)$$

де

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^{-j} \delta \Delta W_i^j \sum_{i=1}^n (i-1) E_i^{-j} - \sum_{i=1}^n (i-1) E_i^{-j} \delta \Delta W_i^j \sum_{i=1}^n E_i^j}{a \left\{ \sum_{i=1}^n (i-1)^2 E_i^{-j} \sum_{i=1}^n E_i^{-j} - \left[ \sum_{i=1}^n (i-1) E_i^{-j} \right]^2 \right\}};$$

$$m^j = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^{-j} \delta \Delta W_i^j + k^j a \sum_{i=1}^n (i-1) \cdot E_i^{-j}}{\sum_{i=1}^n E_i^{-j}};$$

$$E_i^{-j} = \frac{E_i^{j-1} + E_i^j}{2};$$

$$\delta \Delta W_i^j = \Delta W_i^j - \Delta W_i^{j-1}.$$

У випадку симетричного розподілу вологості, коли  $\varepsilon^* = m = const$  та  $k=0$ , із загального рівняння (17) отримуємо

$$\delta \sigma_{i^1}^j = \alpha E_{i^1}^{-j} \left( \delta \Delta W_{i^1}^j - \frac{\sum_{i=1}^n E_i^{-j} \cdot \delta \Delta W_i^j}{\sum_{i=1}^n E_i^j} \right). \quad (16)$$

Точність розрахунків підвищується із збільшенням числа стержнів в моделі і кількості кроків.

Отримані основні теоретичні залежності, що наведені у даній роботі, підтверджені експериментально.

### Висновки

Розглянуті закономірності визначення зміни вологості і внутрішніх напруг, що виникають в процесі сушіння, обґрунтовані особливості їх розрахунку дають можливість зіставити розрахункові напруги з відповідними межами міцності і встановити безпечні, з погляду досягнення цілісності матеріалу, встановити значення ступенів насиченості сушильного агента при різних температурах, а головне обґрунтувати його раціональні параметри.

### Література

1. Кречетов И.В. Сушка древесины.–М.: Лесная промышленность, 1980.– с.210.
2. Андрашек И.В., Басальга Е.В. Математико-статистическая модель процесса промежуточной влаготеплообработки при сушке древесины твердых листовых пород / Состояние и перспективы развития сушки древесины. Тезисы докладов к Всес. науч.-технич. совещанию. – Архангельск, сентябрь 1985. – с. 15.
3. Лыков А.В. Теория сушки . М., Энергия, 1968.— 156 с.
4. Лыков А.В. Тепло– и массообмен в процессах сушки. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956.– 464 с.
5. Огарков Б.И. Определение температурно–влажностных напряжений и деформаций в пластмассах и древесине //Машиностроение, № 6, 1966.– с.15.
6. Серговский П. С, Уголев Б.Н., Скуратов Н.В. Внутренние напряжения и режимы сушки древесины // Актуальные направления развития сушки древесины /Тезисы докладов Всес. конф., Архангельск, 1980.– с.63–72.
7. Лапшин Ю.Г. Исследование плоского напряженного состояния в начальный период сушки пиломатериалов. Автореф. дис. к.т.н. М., 1966,– С.12–16.
8. Уголев Б.Н. Внутренние напряжения в древесине при ее сушке. Гослесбумиздат, 1959.– с.115.
9. Богданов Е.С., Козлов В.А., Пейч М.Н. Справочник по сушке древесины.— М.: Лесн.пром-ть, 1981.– 192 с.