

А.М. Шостачук, асист.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ДЕРЕВИНИ ДУБА В ПРОЦЕСІ КОНВЕКТИВНО-НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО СУШІННЯ

(Представлено д.т.н., проф. І.Г. Грабаром)

Частина 1. Моделі внутрішніх напружень

Розглянуто основні фактори, що впливають на розподілення внутрішніх напружень в пиломатеріалах з деревини дуба при конвективно-надвисокочастотному сушінні, наведено алгоритм розрахунку та теоретичні моделі напруженого стану з різним ступенем наближення.

Головною вадою сушіння деревини великих поперечних перерізів твердолистяних порід, і дуба зокрема, є наявність поверхневих та торцевих тріщин. Наприклад, при традиційному конвективному сушінні [10] відсоток деревини з тріщинами після сушіння може складати від 12 % при розмірі поперечного перерізу $a = 22$ мм до 21,5 % при $a = 55$. При діелектричному нагріві основним видом браку є наявність внутрішніх тріщин. Ріст тріщин при сушінні деревини відбувається в площині, що утворена напрямками: радіальним відносно річних кілець та напрямком вздовж волокон. Видалення вологи при конвективно-надвисокочастотному сушінні відбувається в усьому об'ємі, і напруження розтягнення будуть обумовлені меншою вологістю внутрішніх шарів у порівнянні з поверхневими. В реальних умовах ці напруження не будуть рівномірно розподіленими внаслідок, в першу чергу, змінення вологості деревини вздовж волокон та в радіальному напрямку поперек волокон. Тобто реальна картина розподілення внутрішніх напружень є надзвичайно складною і забезпечення нерозповсюдження тріщин в одному з напрямків дасть змогу припустити відсутність росту тріщини в іншому напрямку. В протилежному випадку можна розглянути розвиток тріщини в двох нормально розташованих площинах. Тому обираємо схему навантаження, при якій на береги тріщини діє зовнішнє розподілене навантаження, при цьому розглянемо плоску задачу.

Внутрішні напруження досліджував Б.А. Поснов, який в роботі [7] запропонував формулу для визначення напружень в деревині при сушінні, але за нею для будь-якого x отримуємо напруження однакового знаку, що протирічить умовам рівноваги.

В загальній теорії сушіння, запропонованій А.В. Ликовим, розглянуто напруження в пластині з ізотропного пружного матеріалу, що всихає протягом всього процесу сушіння, і отримано формулу:

$$\sigma_x = \frac{\alpha_p E}{1 + \alpha_p W_n} \cdot (\bar{W} - W),$$

де α_p – коефіцієнт розбухання;

W_n – початкова вологість;

\bar{W} – середня вологість пластини;

W – вологість даного шару.

Б.Н. Угольов в роботі [2] розглянув механізм утворення вологісних напружень в необмеженій пластині, у якій випарення вологи відбувається з двох протилежних сторін. Були отримані формули для наступних допущень:

вологість по всій товщині дошки нижча точки насичення волокна;

вологість в поверхневих шарах нижча за точку насичення, а вологість внутрішніх шарів вища цієї межі і тут не спостерігається усушки;

несиметричне розподілення вологості відносно середини дошки;

враховано залежність коефіцієнта усушки та модуля пружності матеріалу від вологості.

Наприклад, для першого випадку отримана формула напружень:

$$\sigma_x = \alpha E (\bar{W} - W_n),$$

де співвідношення між коефіцієнтами усушки і розбухання є наступним:

$$\alpha = \frac{\alpha_p}{1 + W_{n.} \alpha_p}.$$

Таким чином, підсумовуючи вищенаведене, можна зробити наступні висновки:

а) отримано аналітичні формули для визначення вологісних напружень в матеріалі, який піддають сушінню;

б) в залежності від необхідної точності отриманого результату можна приймати коефіцієнти усушки та модуль пружності сталими величинами або такими, що є функціями вологості та напрямку.

Основною проблемою для визначення внутрішніх напружень в деревині, що піддають конвективно-надвисокочастотному сушінню, є отримання об'єктивної картини вологісних полів як функції від часу, початкової вологості, розмірів поперечних перерізів матеріалів, інтенсивності нагріву. Оскільки внутрішні напруження в деревині під час сушіння є наслідком нерівномірності видалення вологи, то перед створенням математичних моделей необхідно, на наш погляд, звернути увагу на наступні особливості, які визначають процес видалення вологи при конвективно-надвисокочастотному сушінні деревини дуба:

а) видалення зв'язаної вологи відбувається в центральних шарах бруса у порівнянні з поверхневими з більшою інтенсивністю, оскільки центральні шари мають більш високу температуру нагріву і капіляри центральних шарів швидше звільняються від вільної вологи, (стовп вільної вологи рухається від центра до поверхні), після чого починається видалення зв'язаної вологи;

б) при певних умовах (температура, швидкість та вологість повітря камери) вологість поверхневих шарів може бути меншою, ніж віддалених від поверхні шарів деревини;

в) на розподілення внутрішніх напружень в деревині при сушінні можуть впливати внутрішні напруження пиломатеріалів після розпиловки.

В роботах [6, 9] наведено результати проведених автором експериментальних досліджень та запропоновано моделі процесів видалення вологи при конвективно-надвисокочастотному сушінні деревини дуба. На основі цих робіт зроблено висновки, що фактори, які будуть визначати нерівномірність видалення зв'язаної вологи, є наступними: температура та градієнт температур в поперечному перерізі, розміри поперечного перерізу пиломатеріалів. Внутрішніми напруженнями в деревині перед початком сушіння на даному етапі будемо зневажати.

Розглянемо найпростішу модель напруженого стану, при цьому зробимо наступні допущення:

зв'язана волога починає видалятись в усьому перерізі одночасно;

інтенсивність випарення вологи з поверхні деревини не перевищує швидкості підводу вологи з внутрішніх шарів до поверхні;

інтенсивність видалення вологи визначається величинами температури деревини та градієнта температур в поперечному перерізі;

коефіцієнт усушки та модуль пружності не залежать від поточної вологості та координати поперечного перерізу.

Як показали результати теоретичних досліджень температурних полів [3], температурну криву у поперечному перерізі бруса, що піддають конвективно-надвисокочастотному сушінню, можна описати поліномом 2-го ступеня:

$$t(x) = a_2 x^2 + b_2 + c_2,$$

де x – відстань від центра поперечного перерізу до точки, в якій визначається температура;

a_2, b_2, c_2 – емпіричні коефіцієнти.

Зв'язану вологу ми представляли у вигляді умовної плівки, товщина h якої змінюється за законом:

$$\frac{dh}{d\tau} = kh^m, \quad (1)$$

де k, m – коефіцієнти. Емпірично знайдену залежність коефіцієнта k від температури представимо у вигляді:

$$k(\tau) = a_1(t(x))^2 + b_1 t(x) + c_1,$$

де a_1, b_1, c_1 – коефіцієнти.

У відповідності до прийнятого вище товщина плівки:

$$h(\tau, x) = ((h_0 + k\tau)(-m + 1))^{-\frac{1}{m+1}}.$$

Вологість деревини при умові, що в останній знаходиться тільки зв'язана волога:

$$W(\tau, x) = \frac{2rh(\tau, x) + (h(\tau, x))^2}{A}. \quad (2)$$

На рис. 1 представлено алгоритм розрахунку, а на рис. 2 – розподілення внутрішніх напружень в поперечному перерізі бруса з деревини дуба. Наближаючи отриману модель до реальних умов сушіння, необхідно враховувати, що вільна і зв'язана волога видалається одночасно. Тобто час видалення зв'язаної вологи в i -й точці поперечного перерізу буде визначатись:

$$\tau_i' = \tau - \tau_{\text{вільн}}, \quad (3)$$

де τ – час, упродовж якого видалялась зв'язана волога в даній точці без врахування видалення вільної вологи;

τ'_i – час, упродовж якого видалялась зв'язана волога в даній точці з врахуванням видалення вільної вологи;

$\tau_{вільн}$ – час, упродовж якого видалялась вільна волога в даній точці, це є функція від:

координати точки поперечного перерізу;

температури центральних шарів деревини, яка є функцією координати точки поперечного перерізу.

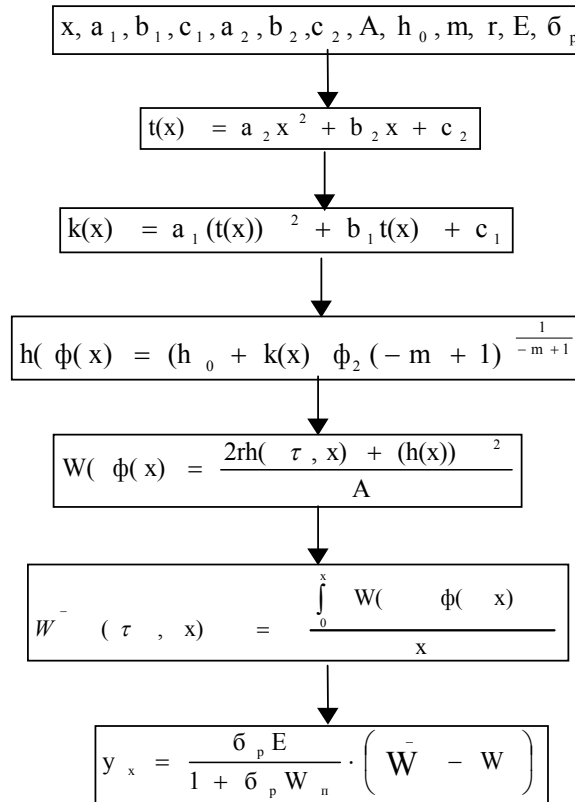


Рис. 1. Алгоритм розрахунку внутрішніх напружень при одночасному початку видалення зв'язаної вологи в усьому перерізі

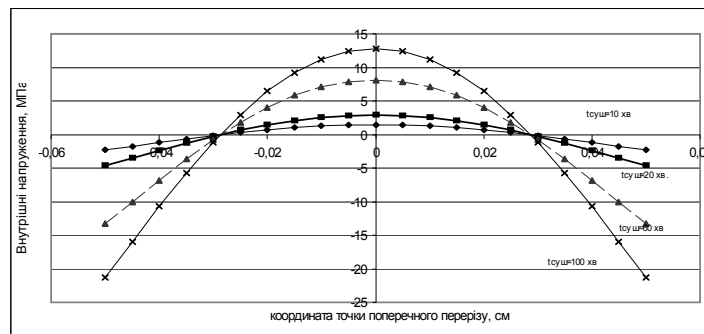


Рис. 2. Внутрішні напруження в поперечному перерізі дубового бруса при одночасному початку видалення зв'язаної вологи в усьому перерізі

Тому формулу (3) перепишемо у вигляді:

$$\tau'_i(x) = \tau - \tau_{вільн}(x).$$

Значення $\tau_{вільн}(x)$ визначимо як час руху стовпа рідкої вологи від центра до поверхні. Тоді для i -ї точки поперечного перерізу час руху стовпа вільної вологи від центра поперечного перерізу до цієї точки:

$$\tau_{вільн}(x) = \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i(x),$$

де $\Delta\tau_i(x)$ – час руху стовпа вільної вологи на елементарній ділянці довжиною Δx_i при розбитті шляху руху від центра поперечного перерізу до i -ї точки на n елементарних ділянок. Значення $\Delta\tau_i(x)$ визначимо таким чином:

$$\Delta\tau_i(x) = \frac{\Delta x_i}{v_i(x)},$$

де $v_i(x)$ – швидкість руху стовпа вільної вологи на i -ій ділянці, приймаємо її незмінною на всій ділянці і такою, що дорівнює швидкості руху на початку цієї ділянки [8]:

$$v_i(x) = \frac{\Delta p \cdot r^2}{8\mu(l-x)},$$

де Δp – різниця тиску пароповітряної суміші на кінцях капіляра;

r – еквівалентний радіус капіляра;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, вважаємо його таким, що не залежить від температури;

l – довжина шляху руху стовпа вільної вологи від центра поперечного перерізу до поверхні деревини;

x – координата границі стовпа вільної вологи.

Алгоритм розрахунків за запропонованою моделлю представлено на рис. 3, а результат розрахунків у вигляді величини внутрішніх напружень в залежності від координати поперечного перерізу та часу сушіння – на рис. 4. Як видно, найбільш небезпечні напруження розтягнення при врахуванні видалення вільної вологи збільшуються у 3,5–4,5 рази.

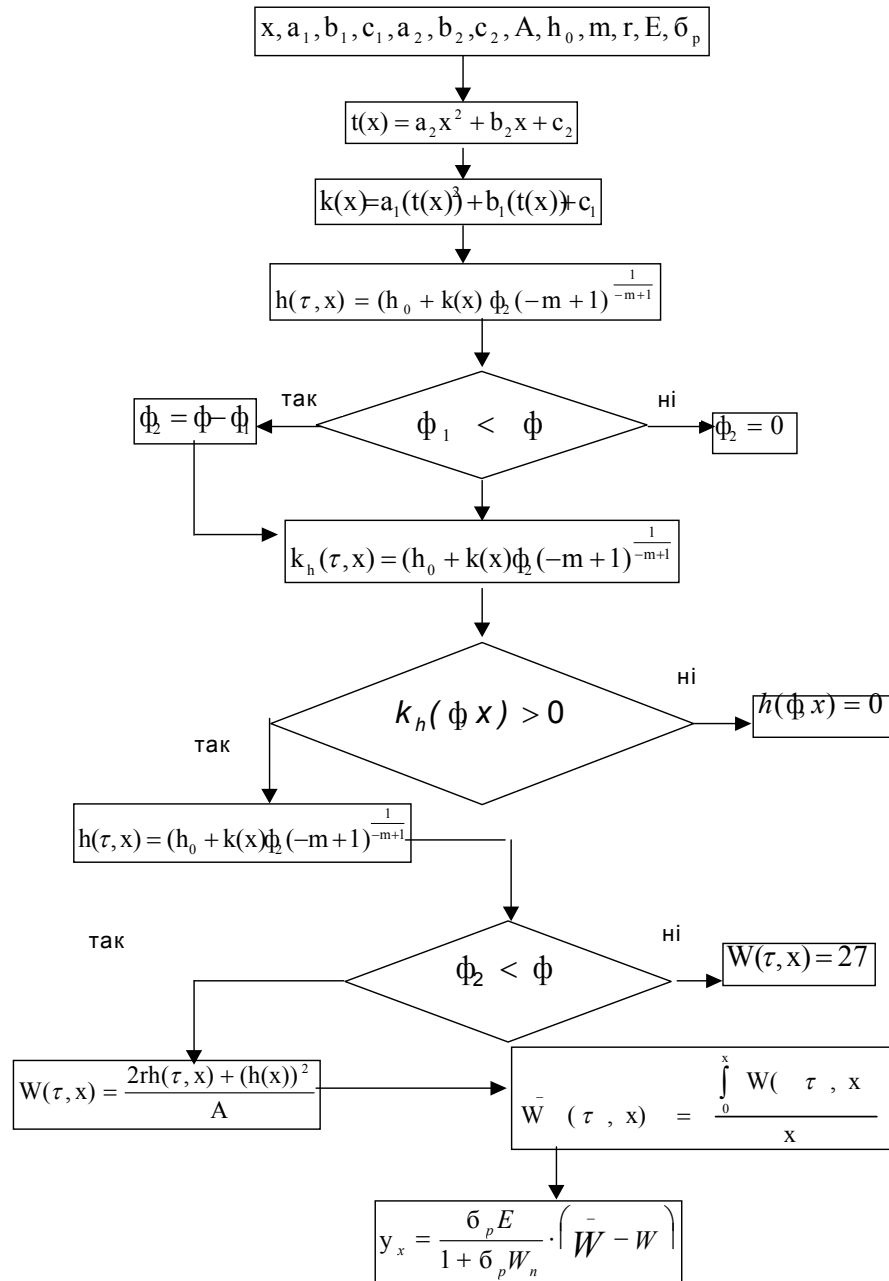


Рис. 3. Алгоритм розрахунку внутрішніх напружень при врахуванні видалення вільної вологи

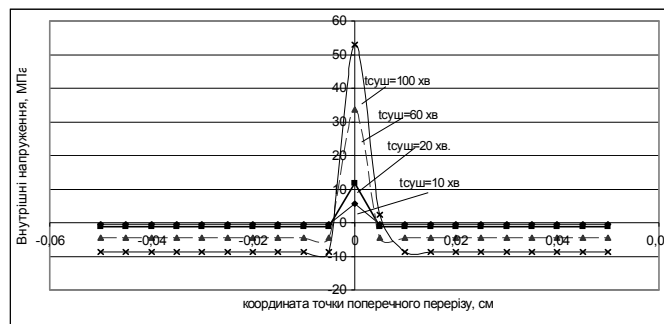


Рис. 4. Внутрішні напруження в поперечному перерізі дубового бруса при врахуванні видалення вільної вологи, перепад температур становить 5 град.

Більш високу точність моделі внутрішніх напружень в деревині дуба при конвективно-надвисокочастотному сушінні дає врахування процесу випарення вологи з поверхні деревини. Розглянемо умови, при яких випарення вологи з поверхні деревини буде впливати на напружений стан деревини під час сушіння. Якщо з поверхні деревини під час сушіння буде видалятися тільки вільна волога, то ми отримуємо модель напруженого стану, представлену на рис. 2, б. Але при видаленні з поверхні деревини зв'язаної вологи вологість зовнішніх шарів буде зменшуватись. При цьому буде зменшуватись і середня вологість деревини під час сушіння. Але видалення зв'язаної вологи можливе тільки у тому випадку, коли з поверхневого шару буде видалена вільна волога. У відповідності до прийнятої моделі капілярно-пористого тіла вільна волога буде випаровуватись, починаючи з краю капіляра. При цьому буде звільнюватись стінка капіляра, з якої почне видалятися зв'язана волога. З іншого боку, під дією тиску випареної вологи з внутрішніх шарів до поверхні буде рухатись стовп вільної вологи, який буде заповнювати звільнену порожнину капіляра, що утворилась при випаренні вільної вологи з поверхні деревини. З вищенаведених міркувань робимо наступний висновок: для того, щоб процес випарення вологи з поверхні деревини впливав на напружений стан, необхідно і достатньо, щоб швидкість руху стовпа вільної вологи до поверхні під дією градієнта тиску була V_1 меншою швидкості випарення вологи з поверхні деревини V_2 : $V_1 < V_2$.

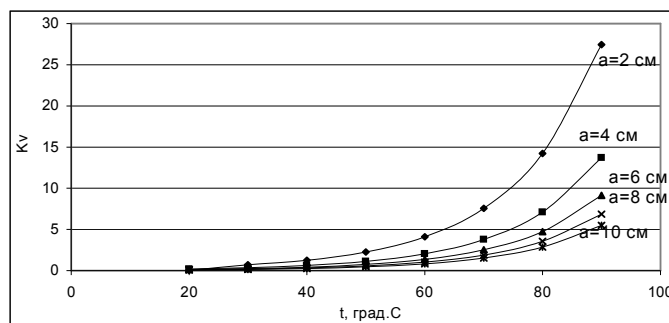


Рис. 5. Залежність відношення $K_v = V_1/V_2$ від часу сушіння та розміру поперечного перерізу матеріалу

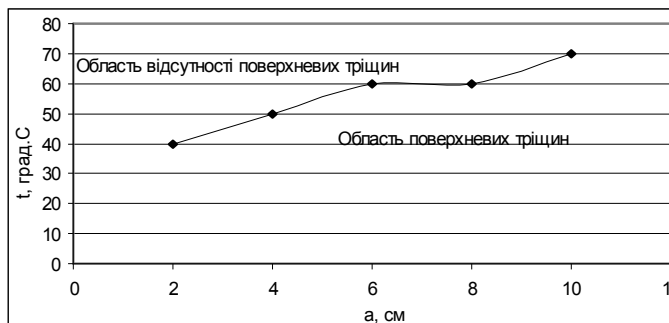


Рис. 6. Співвідношення поперечних розмірів висушуваного матеріалу та температури нагріву, що визначає область відсутності поверхневих тріщин

Для того, щоб приступати до розрахунків напруженого стану за наведеним алгоритмом, необхідно впевнитись, що під час сушіння з поверхневих шарів буде видалятися зв'язана волога. На рис. 5 запропоновано залежність коефіцієнта K_v , що представляє собою відношення V_1/V_2 в залежності від часу сушіння та розміру поперечного перерізу матеріалу, а на рис. 6 – теоретична гранична крива, що визначає область з відсутністю утворення поверхневих тріщин.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Уголёв Б.Н. Внутренние напряжения в древесине при ее сушке. – М.: Гослесбумиздат, 1959. – 116 с.
2. Уголёв Б.Н. и др. Контроль напряжений при сушке древесины / Б.Н. Уголёв, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 205 с.
3. Исаченко В.П. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
4. Писаренко Г.С. Сопrotивление материалов. – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.

5. Шостачук А.М. Дискретна кінетика утворення поверхневих тріщин при НВЧ-сушінні деревини дуба // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 1999. – № 11. – 352 с.
6. Шостачук А.М. Моделювання та оптимізація технологій НВЧ-сушіння деревини дуба. Частина 1. Експериментальне дослідження впливу деяких факторів на видалення вологи при НВЧ-сушінні деревини дуба // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 1999. – № 9. – 352 с.
7. Поснов Б.А. Некоторые теоретические вопросы сушки древесины // Лесопромышленное дело. – 1932. – № 2.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
9. Шостачук А.М. Моделювання та оптимізація технологій НВЧ-сушіння деревини дуба. Частина 2. Моделі процесів видалення вологи // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 40-річчю польоту людини в космос, 4-6 вересня 2001 року, Житомирський інженерно-технологічний інститут. – 251 с.
10. Билей П.В. Технология камерной сушки твёрдых лиственных пород. Дис. на соискание учёной степени доктора технических наук. – Львов, 1993.

ШОСТАЧУК Андрій Миколайович – асистент кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- мікрохвильові технології сушіння деревини;
- процеси тепло- та масообміну в капілярно-пористих тілах;
- механіка руйнування деревини.

Подано 25.09.2001