

Математичне моделювання двовимірного в'язкопружного стану деревини у процесі сушіння

Ярослав Соколовський¹, Михайло Дендюк²

¹ д. т. н., професор, Національний лісотехнічний університет України, вул. ген. Чупринки, 103, Львів, e-mail: sokolowsky@ukr.net, sokolowskyyar@yahoo.com

² Національний лісотехнічний університет України, вул. ген. Чупринки, 103, Львів, e-mail: dendiuk@ukr.net

Стаття присвячена моделюванню вологісного і напружено-деформованого стану у процесі сушіння капілярно-пористих гігроскопічних матеріалів з урахуванням анізотропії вологісних і в'язкопружних властивостей. На основі гіпотези тонких перерізів, рівнянь Больцмана-Вольтерра та застосування методу скінченних елементів синтезовано математичну модель для визначення динаміки вологовмісту та напружень у деревині під час сушіння на етапі видалення зв'язаної вологи. Розроблено методику визначення параметрів реологічних властивостей деревини за результатами випробувань на повзучість. Наведено алгоритм розрахунку динаміки вологовмісту та напружень у деревині під час сушіння.

Ключові слова: математична модель, метод скінченних елементів, деревина, процес сушіння, вологовміст, в'язкопружність, напружено-деформований стан.

Вступ. Розроблення нових та удосконалення існуючих технологій сушіння деревини нагально ставить питання створення математичних моделей деформаційно-релаксаційних і тепломасообмінних процесів у висушуваних пиломатеріалах. Значні за величиною значення напружень є основним стримуючим фактором для інтенсифікації процесу сушіння та визначальним критерієм кінцевої якості пиломатеріалів. Вирішення цієї проблеми ускладнюється тим, що деревина належить до класу фізично-нелінійних гідрофільних полімерів, які характеризуються значною мінливістю структурних і механічних властивостей.

На сьогоднішній день побудовано одновимірні математичні моделі в'язкопружного деформування деревини у процесі сушіння. Застосування числових методів дозволило розв'язати двовимірну задачу розрахунку напружень у рамках теорії пружності. Однак побудова математичних моделей для визначення напружень в об'ємі деревини з урахуванням анізотропії вологісних і в'язкопружних властивостей матеріалу залишається актуальною задачею.

Для моделювання напружено-деформованого стану деревини у процесі її сушіння можна виділити два напрями, пов'язаних із використанням методів механіки суцільного середовища та механізму сорбційної повзучості. У дослідженнях [1-4] на основі диференційної форми закону Гука та числових методів отримано результати для одно- та двовимірних задач у пружній області деформування.

Дослідженням особливого механізму механіко-сорбційної повзучості, виявленого в умовах циклічної зміни вологості навантаженої деревини, присвячено роботи [5, 6].

Аналіз стану моделювання та розрахунку напружено-деформованого стану деревини у процесі сушіння показує, що через складність будови та високу мінливість фізичних властивостей деревини, необхідно враховувати її в'язкопружну поведінку. Побудові математичних моделей реологічної поведінки деревини присвячено роботи [6-8], у яких рівняння реологічного стану розв'язані для часткових випадків навантаження та деформування. Загальні підходи до моделювання взаємозв'язаних фізико-механічних процесів у гігроскопічних капілярно-пористих матеріалах наведено у працях [9-12].

1. Математична модель деформаційно-релаксаційних полів у процесі сушіння деревини з урахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей

Динаміка вологовмісту у висушуваній деревині на основі закону Фіка описується рівнянням вологопровідності [1] зі сталими коефіцієнтами вологообміну для кожного ступеня технологічного процесу

$$\frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} = \alpha_x \frac{\partial^2 U(x, y, t)}{\partial x^2} + \alpha_y \frac{\partial^2 U(x, y, t)}{\partial y^2} \quad (1)$$

із граничними умовами 3-го роду

$$\alpha \frac{\partial U}{\partial n} = \beta(U_{II} - U_R) \quad (2)$$

та початковими умовами для нерегулярного

$$U(x, y, 0) = U_0, \quad (3)$$

і регулярного періодів видалення вологи

$$U|_{F_0=0,1} = U_{II} - \left[1 - \left(\frac{x-a/2}{a/2} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{y-b/2}{b/2} \right)^2 \right] (U_{II} - U_{II}). \quad (4)$$

Тут U — вологовміст; t — час; x, y — координати; a, b — ширина та товщина пило-матеріалу; α_x, α_y — коефіцієнти вологопровідності вздовж осей анізотропії; n — зовнішня нормаль; β — коефіцієнт вологовіддачі; U_{II}, U_{II} — вологовміст у центрі та на поверхні деревини; U_R — рівноважний вологовміст; F_0 — критерій Фур'є.

Напружено-деформований стан деревини у процесі сушіння, зумовлений нерівномірним розподілом вологи й усадними властивостями матеріалу та описується рівняннями рівноваги. Зв'язок між напруженнями та деформаціями встановлюється рівняннями Больцмана-Вольтерра [13]

$$\begin{aligned} \sigma_{11} = & C_{1111} \varepsilon'_{11} - C_{1111} \int_0^t R_{1111}(t-\tau) \varepsilon'_{11}(\tau) d\tau + \\ & + C_{1122} \varepsilon'_{22} - C_{1122} \int_0^t R_{1122}(t-\tau) \varepsilon'_{22}(\tau) d\tau, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{22} &= C_{2211}\varepsilon'_{11} - C_{2211}\int_0^t R_{2211}(t-\tau)\varepsilon'_{11}(\tau)d\tau + \\ &+ C_{2222}\varepsilon'_{22} - C_{2222}\int_0^t R_{2222}(t-\tau)\varepsilon'_{22}(\tau)d\tau, \\ \sigma_{12} &= 2C_{1212}\varepsilon'_{12} - 2C_{1212}\int_0^t R_{1212}(t-\tau)\varepsilon'_{12}(\tau)d\tau, \end{aligned} \quad (5)$$

де 1 і 2 — координатні осі x і y , які лежать у напрямках анізотропії властивостей; σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} — компоненти напружень; ε'_{11} , ε'_{22} , ε'_{12} — компоненти деформацій; C_{1111} , C_{1122} , C_{2211} , C_{2222} , C_{1212} — компоненти пружних характеристик деревини, що залежать від температури T та вологості W ; R_{1111} , R_{1122} , R_{2211} , R_{2222} , R_{1212} — ядра релаксації, які характеризують реологічну поведінку деревини та залежать від температури T і вологості W ; τ — час.

Для знаходження двовимірного ортотропного напружено-деформованого стану деревини у процесі сушіння застосовано метод скінченних елементів на в'язкопружну область деформування. Для цього за допомогою гіпотези тонких перерізів визначено в'язкопружні компоненти повних деформацій $\hat{\varepsilon}'$ у рівнянні Больцмана-Вольтерра. Їх визначаємо як різницю деформацій, зумовлених усадкою матеріалу під час видалення вологи в часі $\hat{\varepsilon}_0$, і деформацій $\hat{\varepsilon}$, зумовлених наявністю вологи у пиломатеріалах

$$\hat{\varepsilon}' = \hat{\varepsilon}_0 - \hat{\varepsilon}. \quad (6)$$

Граничні умови, які реалізуються у процесі сушіння деревини, запишемо

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= 0, \text{ якщо } x = 0 \text{ і } x = a, & \sigma_{yy} &= 0 \text{ якщо } y = 0 \text{ і } y = b, \\ \sigma_{xy} &= 0, \text{ якщо } x = 0, x = a, y = 0 \text{ і } y = b. \end{aligned} \quad (7)$$

Виходячи з проведених раніше досліджень [8], компоненти ядра релаксації деревини вибираємо у вигляді

$$R(t-\tau, U, T) = L(U, T)e^{-\mu(U, T)(t-\tau)}, \quad (8)$$

де L , μ — реологічні функції, які визначають на основі експериментальних вимірювань деформацій повзучості.

Із використанням методу квадратур [14] ядро релаксації деревини визначено через вузлові значення часу t_j

$$\int_0^t R(t-\tau)\varepsilon_0(\tau)d\tau \approx e^{-\mu t_i} \sum_{j=1}^{i-1} A_j L(t_j) \varepsilon_0(t_j) e^{\mu_j t_j}, \quad (9)$$

де A_j — числові коефіцієнти у вузлах j .

Розроблено математичну модель визначення динаміки вологовмісту, деформацій і напружень у процесі сушіння деревини шляхом узагальнення методу скінченних елементів для плоского ортотропного напружено-деформованого стану. Ця модель дозволяє визначити розвиток деформаційно-релаксаційних полів у процесі

сушіння деревини з урахуванням анізотропії механічних властивостей і її представлено у вигляді

$$\left(\mathbf{K} + \frac{2}{\Delta\tau} \mathbf{C} \right) \mathbf{U}_n = \left(\frac{2}{\Delta\tau} \mathbf{C} - \mathbf{K} \right) \mathbf{U}_n + 2\mathbf{F}; \quad (10)$$

$$\hat{\sigma} = \mathbf{D}\hat{\varepsilon}_0 - \mathbf{D}\hat{\varepsilon} - \mathbf{D}_1\hat{\varepsilon}_{01} + \mathbf{D}_1\hat{\varepsilon}_1 - \mathbf{D}_2\hat{\varepsilon}_{02} + \mathbf{D}_2\hat{\varepsilon}_2, \quad (11)$$

Тут \mathbf{K} — матриця вологопровідності; \mathbf{C} — матриця демпфування; \mathbf{F} — вектор навантаження; \mathbf{U}_n — матриця значень вологовмісту в момент часу t_i ; \mathbf{U}_n — матриця значень вологовмісту в момент часу t_{i-1} ; $\hat{\varepsilon}_{01}$, $\hat{\varepsilon}_{02}$, $\hat{\varepsilon}_1$, $\hat{\varepsilon}_2$ — в'язкопружні складники деформацій; \mathbf{D} , \mathbf{D}_1 , \mathbf{D}_2 — матриці пружних постійних.

На основі синтезованої математичної моделі розроблено числовий алгоритм розрахунку двовимірного напружено-деформованого стану висушуваної деревини з урахуванням анізотропії її в'язкопружних і вологісних властивостей для нерегулярного та регулярного періодів процесу сушіння, що дає змогу програмно реалізувати синтезовану математичну модель.

2. Експериментальне визначення ядер релаксації деревини

Для дослідження реологічної поведінки порід деревини з різною базовою густиною у стаціонарних температурно-вологісних умовах використано розклад двовимірних ядер релаксації на одновимірні [13]. Розроблено методику визначення параметрів ядер релаксації на основі експериментальних досліджень кривих повзучості деревини у напрямках анізотропії властивостей [15, 16], що дозволило спростити громіздку задачу експериментальних реологічних випробувань. Зокрема, отримано такі співвідношення для знаходження параметрів ядра релаксації (9)

$$L(T, W) = \Psi(T, W) = \frac{E(T, W) - E_T(T, W)}{E_T(T, W)\tau_{rel}(T, W)}; \quad (12)$$

$$\mu(T, W) = \Psi(T, W) + \omega(T, W) = \frac{E(T, W)}{E_T(T, W)\tau_{rel}(T, W)}. \quad (13)$$

Тут $\Psi(T, W)$, $\omega(T, W)$ — параметри ядра повзучості; $E(T, W)$, $E_T(T, W)$ — миттєвий і тривалий модулі пружності; $\tau_{rel}(T, W)$ — час релаксації.

Для визначення часу релаксації $\tau_{rel}(T, W)$, модулів $E(T, W)$, $E_T(T, W)$ за кривими повзучості деревини використано метод найменших квадратів $\Sigma[\varepsilon(\tau_{rel}) - \varepsilon(t)]^2$, де $\varepsilon(t)$ — апроксимаційна залежність деформацій від часу, отримана за результатами експериментальних досліджень; $\varepsilon(\tau_{rel})$ — аналітична залежність деформацій, яка визначається з рівняння

$$\varepsilon(\tau_{rel}) = \left(1 - \frac{1 - \gamma}{e} \right) \varepsilon_T; \quad (14)$$

$\gamma = \varepsilon_M / \varepsilon_T$; ε_M , ε_T — значення пружних і в'язких деформацій, визначені експериментально.

За експериментальними даними отримано апроксимаційні залежності параметрів (9) реологічної поведінки деревини у напрямках анізотропії для різних порід. Зокрема, встановлено залежності параметрів ядер і часу релаксації, миттєвого та тривалого модулів пружності від температури та вологості. Результати досліджень узгоджуються з експериментальними даними, наведеними у роботах [4, 17] для пружної області деформування деревини.

Це дало змогу у математичній моделі визначення вологісних і деформаційно-релаксаційних полів у процесі сушіння пиломатеріалів відслідковувати динаміку в'язко-пружних характеристик деревини.

3. Дослідження впливу основних чинників процесу сушіння деревини на динаміку напружено-деформованого стану

На основі синтезованої математичної моделі (11), (12) і розробленого програмного забезпечення проведено числові експерименти дослідження впливу основних факторів процесу сушіння деревини на динаміку вологісного і напружено-деформованого станів. Зокрема, отриманий розподіл вологи в часі свідчить, що на етапі нерегулярного видалення зв'язаної вологи розподіл є складний, а в регулярному періоді набуває параболічного чи косинусоїдного характеру незалежно від геометричних розмірів.

Проведений аналіз величини напружень в об'ємі деревини для різних співвідношень між товщиною та шириною b/a показує, що на початку процесу сушіння поверхневі шари вздовж перерізу піддаються напруженням розтягу, а внутрішні шари — стиску, зокрема, у них нормальні напруження досягають максимальних значень. Приповерхневі зони дошки характеризуються максимальними тангенціальними напруженнями τ_{xy} , а на поверхні й у центрі дошки ці напруження є незначні. Наприкінці процесу сушіння напруження стиску сконцентровані біля поверхні, а розтягу — всередині (рис. 1).

Аналіз величини напружень в об'ємі деревини для різних співвідношень між товщиною та шириною b/a показує, що максимальні напруження в процесі сушіння деревини сосни за м'якого режиму виникають для $b/a = 1$. Відмінність за величиною σ_{xx} і σ_{yy} зумовлена різними властивостями матеріалу у напрямках анізотропії властивостей деревини, зокрема, найменші напруження на поверхні будуть для матеріалів у разі зміни співвідношення ширини до товщини b/a від 0,5 до 1.

Отримані результати якісно підтверджуються проведеними раніше дослідженнями напружень у тангенціальних соснових дошках для різних значень критерію Фур'є без урахування в'язкопружних властивостей матеріалу на етапі регулярного режиму зміни вологи в об'ємі.

У разі зміни параметрів агента сушіння вологісні поля у деревині мають подібний розвиток, однак характер зміни напружень — інший. На початку процесу сушіння на величину напружень на поверхні й у центрі деревини суттєво впливає відносна вологість агента сушіння. Зміна температури та відносної вологості зумовлює зміщення спектра максимальних напружень на поверхні пиломатеріалів відносно її максимальних значень у центральних шарах. Швидкість руху агента суттєво впливає на величину поверхневих напружень і практично не впливає на напруження у центральних

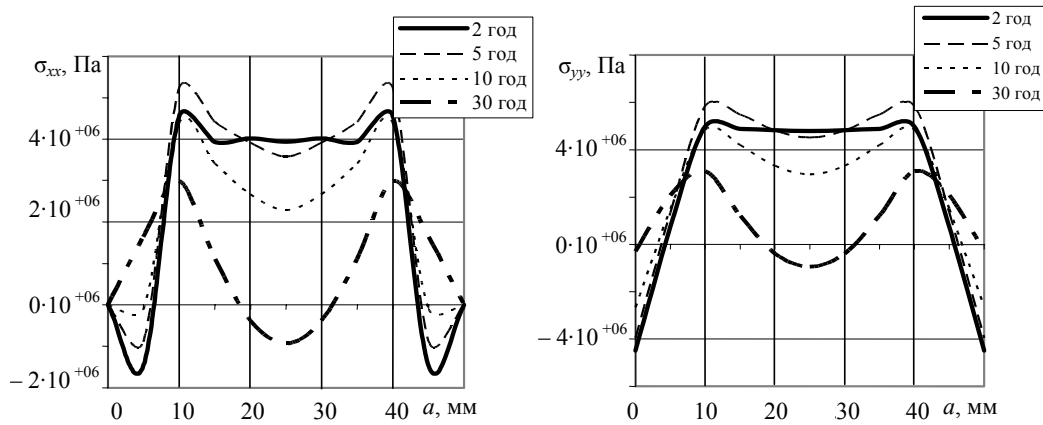


Рис. 1. Розподіл напружень σ_{xx} (а) та σ_{yy} (б) у центрі вздовж ширини пиломатеріалу деревини сосни розміром 25×50 мм у різні моменти часу

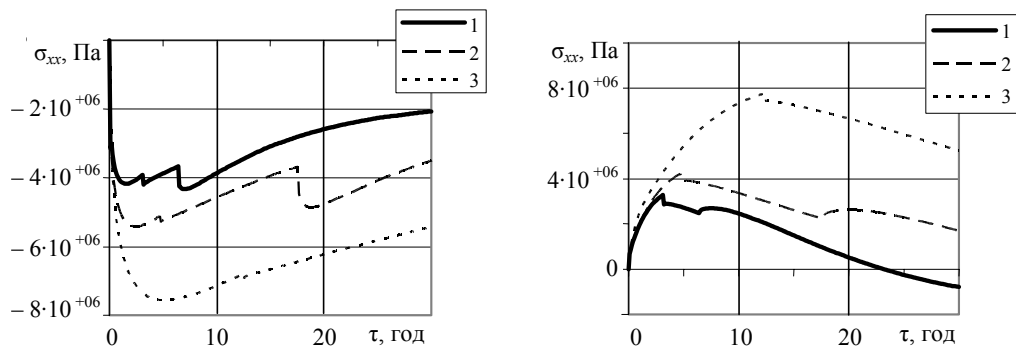


Рис. 2. Вплив механічних параметрів порід деревини на динаміку напружень σ_{xx} (а) на поверхні й у центрі (б) пиломатеріалу розміром 25×50 мм (1 — сосна; 2 — береза; 3 — дуб)

областях матеріалу. З плином часу, в регулярному періоді видалення вологи, зі зміною відносної вологості згаданий вище вплив на напруження зменшується. Зі зміною температури та швидкості руху агента різниця між напруженнями зростає.

Аналіз динаміки напружень для різних порід деревини показує, що для сосни величина нормальних тангенціальних і радіальних напружень на поверхні є більша від таких же напружень у центрі. Для берези ці напруження приблизно однакові, а для дуба — величина напружень у центрі перевищує відповідні напруження на поверхні (рис. 2). Тому можна зробити висновки, що напруження, які погіршують якість висушеного матеріалу, у випадку сосни виникають на поверхні, а у випадках берези та дуба — як на поверхні, так і всередині.

Таким чином, за результатами проведених числових експериментів можна визначити допустимі межі зміни параметрів технологічного процесу для пиломатеріалів із різними механічними характеристиками. Це дає підґрунтя для розроблення системи автоматичного контролю процесу сушіння з метою забезпечення необхідної якості пиломатеріалів.

4. Система контролю за напружено-деформованим станом деревини у процесі сушіння

Для визначення величини напружень на поверхні висушуваних пиломатеріалів розроблено новий метод прямого вимірювання напружень на поверхні деревини у процесі сушіння, який дозволяє контролювати напруження у дошці штабеля з мінімальним модулем пружності [18]. Однак, такий метод дозволяє контролювати тільки тангенціальні напруження на поверхні матеріалу, а аналіз проведених досліджень на основі розроблених математичної моделі та програмного забезпечення для визначення напружено-деформованого стану показує, що такі напруження небезпечні у нерегулярному періоді видалення вологи для певних порід деревини. У регулярному періоді особливу увагу слід звернути на напруження в об'ємі осушуваного тіла, а не на поверхні. Тому такий підхід дає лише часткову інформацію про напружений стан тіла.

На основі розробленої математичної моделі та програмного забезпечення запропоновано схему системи керування технологічним процесом сушіння деревини за поточними значеннями вологовмісту та температури у матеріалі та напружено-деформованого стану. Ця схема включає: 1) реологічні випробування деревини на повзучість до початку сушіння; 2) контролювання параметрів агента сушіння; 3) вимірювання значень вологовмісту і температури у пиломатеріалах; 4) порівняння обчислених значень вологовмісту з експериментальними; 5) розрахунок напружень на основі запропонованої моделі. Структурну схему системи керування процесом сушіння наведено на рис. 3.

Параметри ядер релаксації, час релаксації, а також модулі пружності визначають під час реологічних випробувань зразків. На кожному ступені технологічного процесу контролюють вологість і температуру у матеріалі та визначають за регресійними співвідношеннями значення параметрів ядра релаксації. Параметри агента сушіння контролюють із допомогою існуючих автоматизованих систем із запаралеленням вихідних значень параметрів на пристрій зв'язку з комп'ютером. Однією з умов адекватності обчисленого вологісного та напружено-деформованого станів до реальних є умова закладання в сушильну камеру пиломатеріалів з ідентичними механічними характеристиками.

Для пакету прикладних програм розроблено інтерфейс, який організовано у вигляді діалогових взаємозв'язаних вікон, що дозволяє у доступній і наочній формі вводити вхідні дані [19]. Розроблений пакет прикладних програм можна також використовувати як самостійний програмний продукт для моделювання динаміки вологості та напружень у висушуваних пиломатеріалах до початку технологічного процесу з метою обґрунтування раціональних режимів сушіння залежно від конкретних механічних характеристик деревини.

Висновки. На основі рівнянь механіки спадкових середовищ, вологоперенесення й усадки гігроскопічних матеріалів синтезовано математичну модель для визначення двовимірного напружено-деформованого стану деревини у процесі сушіння з врахуванням анізотропії вологісних і в'язкопружних властивостей матеріалу.

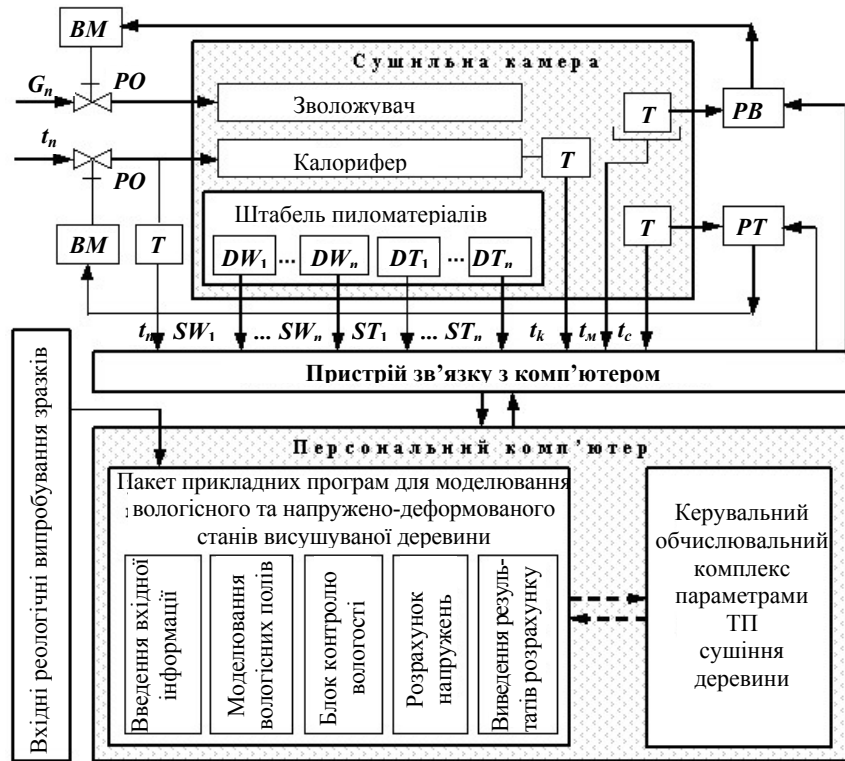


Рис. 3. Структурна схема системи автоматичного керування процесом сушіння деревини за значеннями вологовмісту та температури матеріалу. Тут G_n — кількість пари, яка надходить через зволожувальні труби; t_n — температура пари у калорифері; PO — регулюючий орган; BM — виконавчий механізм; T — термометростворювачі; PB — регулятор вологості; PT — регулятор температури; DW_1, \dots, DW_n — вологоміри; SW_1, \dots, SW_n — вихідні сигнали вологомірів; DT_1, \dots, DT_n — датчики температури; ST_1, \dots, ST_n — вихідні сигнали датчиків температури; t_k — температура калорифера; t_m, t_c — температура мокрого та сухого термометра

Розроблено методику визначення функцій реологічної поведінки деревини уперек волокон, на основі якої за експериментальними даними про деформації повзучості у радіальному та тангенціальному напрямках встановлено залежності функцій ядер релаксації деревини від температури та вологості середовища.

Побудовано алгоритм методу скінченних елементів для в'язкопружної області деформування гігроскопічних матеріалів. Розроблено прикладне програмне забезпечення з інтерфейсом користувача, що надає змогу для будь-якого моменту часу сушіння деревини визначати значення напружень із метою вибору й обґрунтування режимних параметрів процесу сушіння.

За результатами проведеного числового експерименту проаналізовано вплив розподілу гігроскопічної вологи, геометричних розмірів, структурної анізотропії, базової густини (породи), параметрів агента сушіння (температури, відносної вологості та швидкості руху) на розподіл в'язкопружних нормальних і тангенціальних напружень у деревині для нерегулярного та регулярного періодів процесу її сушіння.

Для проектування автоматизованої системи керування технологічним процесом сушіння деревини розроблено методику контролю та прогнозування двовимірнього напружено-деформованого стану у висушуваній деревині. Отримані значення поточних параметрів деревини та теплоносія у будь-який момент часу обробляються розробленими програмними модулями, а результати розрахунку передаються в обчислювальний комплекс, який керує параметрами технологічного процесу сушіння деревини.

Література

- [1] *Лыков А. В.* Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 472 с.
- [2] *Соколовский Я. И., Поберейко Б. П.* Расчет нестационарных напряжений в древесине при воздействии влаги // Лесной журнал: Изв. ВУЗов России. — Архангельск, 2000. — № 1. — С. 99-105.
- [3] *Гайвась Б.* Про напружено-деформівний стан і стійкість пористої ортотропної пластини в процесі сушіння // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. — 2006. — Вип. 4. — С. 12-24.
- [4] *Уголев Б. Н., Лапшин Ю. Г., Кротов Е. В.* Контроль напряжений при сушке древесины. — М.: Лесн. пром-сть, 1980. — 208 с.
- [5] *Salin J.* Numerical prediction of checking during timber drying and a mechano-sorptive model // Holz Roh-Werkstoff. — 1993. — № 6. — P. 195-200.
- [6] *Соколовський Я. І., Сало І. Я.* Визначення напружено-деформівного стану висушуваної деревини з врахуванням механіко-сорбційної повзучості // Наук. вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць. — Львів: НЛТУ України, 2005. — Вип. 15.4. — С. 15-163.
- [7] *Белянкин Ф. П., Яценко В. Ф.* Деформативность и сопротивляемость древесины. — К.: АН УССР, 1957. — 199 с.
- [8] *Соколовский Я. И., Дендюк М. В., Поберейко Б. П.* Моделирование деформационно-релаксационных процессов в древесине во время сушки // Лесной журнал: Изв. ВУЗов России. — Архангельск, 2007. — № 1. — С. 75-83.
- [9] *Бурак Я. Й., Нагірний Т. С.* Термодинамічні основи локально-градієнтної узагальненої термомеханіки // Математические методы и физическая механика поля. — 1992. — Вып. 35. — С. 20-24.
- [10] *Подстригач Я. С., Ломакин В. А., Колянко Ю. М.* Термоупругость тел неоднородной структуры. — М.: Наука, 1984. — 368 с.
- [11] *Грицина О., Кондрат В., Нагірний Т.* Мезорівняння термомеханіки пористого насиченого рідиною багатокомпонентного середовища з урахуванням локальних зміщень маси та електричного заряду // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. — 2007. — Вип. 6. — С. 30-43.
- [12] *Никитенко Н. И.* Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса. — К.: Наук. думка, 1988. — 295 с.
- [13] *Колтунов М. А., Кравчук А. С., Майборода В. П.* Прикладная механика деформируемого твердого тела. — М.: Высш. шк., 1983. — 349 с.
- [14] *Верлань А. Ф., Сизиков В. С.* Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. — К.: Наук. думка, 1986. — 544 с.
- [15] *Соколовський Я. І., Андрашек Й. В.* Методика та результати експериментальних досліджень реологічної поведінки деревини // Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. — Львів: УкрДЛТУ, 1999. — Вип. 9.13. — С. 15-26.

- [16] Дендюк М. В. Визначення реологічних параметрів деревини // Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. — Львів: УкрДЛТУ, 2005. — Вип. 15.3. — С. 124-129.
- [17] Ашкенази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1980. — 247 с.
- [18] Деклараційний патент № 15188, Україна, МПК В27К 1/00. Спосіб для неруйнівного вимірювання та контролю напруженого стану гігроскопічних матеріалів у процесі гідротермічної обробки / Поберейко Б. П., Дендюк М. В., Соколовський Я. І. (Україна); Заявл. 26.12.2005; Опубл. 15.06.2006. Бюл. № 6. — 4 с.
- [19] Соколовський Я. І., Дендюк М. В. Програмний комплекс для моделювання напружено-деформівного стану деревини у процесі сушіння // Наук. вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць. — Львів: НЛТУУ, 2007. — Вип. 17.8. — С. 282-290.

Mathematical modeling of the two-dimensional viscoelasticity state of wood in the process of drying

Yaroslav Sokolowsky, Myhailo Dendiuk

The article presents modeling of the humid and stress-state state of saw-timbers in the process of drying of capillary-porous anisotropic hygroscopic materials taking into account the viscoelastic behavior. In particular, on the basis of hypothesis of thin sections, the Bolsman-Volterr equations and generalizations of the method of finite elements, the mathematical model of determination of dynamics of moisture content and stresses in wood during drying at the stage of selection of the bound moisture is synthesized. The method of determination of parameters of rheological properties of wood is developed as a result of creep tests. The algorithm is proposed and a set of applied software for calculation of dynamics of moisture content and stresses in wood during drying is proposed.

Математическое моделирование двухмерного вязкоупругого состояния древесины в процессе сушки

Ярослав Соколовский, Михайло Дендюк

Статья посвящена моделированию влажностного и напряженно-деформированного состояния в процессе сушки капиллярно-пористых гигроскопических материалов с учетом анизотропии влажностных и вязкоупругих свойств. На основании гипотезы тонких сечений, уравнений Больцмана-Вольтерра и применения метода конечных элементов синтезировано математическую модель определения динамики влагосодержания и напряжений в древесине во время сушки на этапе выделения связанной влаги. Разработано методику определения параметров реологических свойств древесины по результатам испытаний на ползучесть. Приведен алгоритм расчета динамики влагосодержания и напряжений в древесине во время сушки.

Отримано 01.04.08