

РОЗДІЛ VI. ТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 539.3(075.8)

Ярослав Соколовський, Володимир Криштапович, Ігор Крошній

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ АНІЗОТРОПІЇ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА В'ЯЗКОПЛАСТИЧНИЙ СТАН ДЕРЕВИНИ

Ярослав Соколовский, Владимир Криштапович, Игорь Крошный

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЕ СОСТОЯНИЕ ДРЕВЕСИНЫ

Yaroslav Sokolovskyy, Volodymyr Kryshchapovych, Igor Kroshnyy

REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF ANISOTROPY OF MECHANICAL CHARACTERISTICS ON THE VISCOELASTIC STATE OF THE WOOD

Синтезовано математичну модель пружнов'язкопластичного деформування деревини в умовах неізотермічного вологоперенесення з урахуванням анізотропії механічних характеристик матеріалу та деформацій, зумовлених механіко-сорбційною повзучістю. Для реалізації моделей побудовано алгоритм методу скінченних елементів. Він дозволяє досліджувати вплив нестационарних полів тепло-масо-перенесення на розвиток пружних, в'язкопружних і пластичних деформацій у деревині з урахуванням механізму їх переродження. У результаті обчислювальних експериментів, проведених з використанням розроблених об'єктно-орієнтованих програмних засобів, встановлено закономірності впливу анізотропії теплофізичних та механічних характеристик деревини, її початкової вологості, геометричних параметрів на зміну пружнов'язкопластичного стану матеріалу в умовах неізотермічного вологоперенесення.

Ключові слова: математична модель, метод скінченних елементів, вологоперенесення, анізотропія властивостей, пружнов'язкопластичний стан, об'єктно-орієнтоване програмування, деревина.

Рис.: 6. Бібл.: 22.

Синтезировано математическую модель упруговязкопластического деформирования древесины в условиях неизо термического влагопереноса с учетом анизотропии механических характеристик материала и деформаций, обусловленных механико-сорбционной ползучестью. Для реализации моделей разработан алгоритм метода конечных элементов. Он позволяет исследовать влияние нестационарных полей тепло-массопереноса на развитие упругих, вязкоупругих и пластических деформаций в древесине с учетом механизма их перерождения. В результате вычислительных экспериментов, проведенных с использованием разработанных объектно-ориентированных программных средств, установлены закономерности влияния анизотропии теплофизических и механических характеристик древесины, ее начальной влажности, геометрических параметров на изменение упруго-вязкопластического состояния материала в условиях неизо термического влагопереноса.

Ключевые слова: математическая модель, метод конечных элементов, влагоперенос, анизотропия свойств, упруговязкопластическое состояние, объектно-ориентированное программирование, древесина.

Рис.: 6. Библ.: 22.

The mathematical model of elastic-visco-plastic deformation of wood is synthesized in the conditions of non-isothermal moisture transfer taking into account the anisotropy of mechanical properties of material and deformations caused by a mechanic-sorption creep. The algorithm of the finite element method is constructed for the realization of models. It allows to investigate the influence of non-stationary fields of heat and mass transfer on the development of elastic, viscoelastic and plastic deformations in wood with consideration of the mechanism of their regeneration. As a result of computational experiments carried out using the developed object-oriented software tools established patterns of influence of anisotropy of thermo-physical and mechanical properties of wood, its initial moisture, geometrical parameters to change of visco-elastic-plastic state of material in the conditions of non-isothermal moisture transfer.

Key words: mathematical model, finite element method, moisture transfer, the anisotropy of properties, elastic-visco-plastic state, object-oriented programming, wood.

Fig.: 6. Bibl.: 22.

Постановка проблеми. Створення нових та вдосконалення існуючих енерго- та ресурсозберігаючих технологій процесу зневоднення капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, визначаються процесами тепломасоперенесення та деформування. Матеріал деревини характеризується високою гідрофобністю, значною мінливістю фізико-механічних властивостей у напрямках анізотропії, складною природою просторових кореляцій, наявністю ефектів «пам'яті», що зумовлюються залишковими напруженнями. Розвиток напружень в умовах неізотермічного вологоперенесення та наявність залишкового напружено-деформівного стану є одними з основних стримувальних факторів інтенсифікації процесу сушіння. Велику роль у вирішенні цього завдання відіграє

вдосконалення існуючих та побудова нових математичних моделей неізотермічного вологоперенесення та в'язкопружного деформування капілярно-пористих матеріалів, що враховують складний комплекс взаємопов'язаних процесів та увесь спектр властивостей матеріалу. У цьому аспекті важливим завданням є дослідження закономірностей впливу анізотропії пружних та в'язкопружних характеристик деревини на її пружнов'язкопластичний стан залежно від зміни тепломасообмінних властивостей матеріалу, а також прогнозування змін цих характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деревина є анізотропним матеріалом, тому пружні та в'язкопружні властивості змінюються по-різному, залежно від структурного напрямку. Особливості анізотропії пружних властивостей наведені у працях [15; 17]. Важливими є дослідження впливу температурно-вологісних полів деревини різних порід на пружні характеристики у напрямках анізотропії, проведені на основі використання акустичних методів [21]. У працях [1; 15; 17] наведена методика реологічних досліджень деревини як в'язкопружного тіла з урахуванням механізму переродження деформацій. За результатами експериментальних досліджень показано, що жодна з найпростіших реологічних моделей не підходить для коректного опису розвитку загальних деформацій. Однак враховуючи умови лінійності пропонується використовувати різні комбінації реологічних моделей [15]. Дослідженню реологічної поведінки навантаженої деревини в умовах циклічної зміни вологості присвячені роботи [17; 19], у яких відображено особливий механізм механіко-сорбційної повзучості, зумовлений швидкістю зміни вологості. У дослідженнях [2] наведені моделі гіротермомеханічних деформацій визначення реологічної поведінки деревини для різних передісторій деформування, включаючи дію навантаження, температури і вологості. Проведений аналіз математичних моделей деформаційно-релаксаційних процесів та методів їх розрахунку під час сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, показав, що переважно досліджена пружна та в'язкопружна область деформування в одновимірному та двовимірному випадках для сталих механічних характеристик [10; 6]. Побудова математичних моделей деформування деревини під час сушіння з урахуванням пружних, в'язкопружних, пластичних деформацій та особливостей їх переродження у широкому діапазоні зміни фізико-механічних властивостей деревини є складною проблемою [9; 11; 12; 22]. Врахування складних процесів деформування та масоперенесення у гіроскопічних капілярно-пористих матеріалах істотно ускладнює математичні моделі і вимагає удосконалення чисельних методів для їх реалізації та розроблення програмного забезпечення, яке має будуватися на об'єктно-орієнтованому аналізі й проектуванні програмних систем [9].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Дослідження пружнов'язкопластичного стану капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, в умовах неізотермічного волого перенесення з урахуванням анізотропії змінних тепломеханічних характеристик матеріалу та механізму сорбційної повзучості, що дає змогу встановити закономірності впливу параметрів тепломасоперенесення на розвиток нормальних і тангентальних напружень у деревині з урахуванням швидкості зміни вологості матеріалу.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є синтез математичної моделі пружнов'язкопластичного деформування деревини в умовах неізотермічного вологоперенесення, розроблення прикладного програмного забезпечення для її реалізації та здійснення обчислювальних експериментів для встановлення закономірностей впливу анізотропії теплофізичних та механічних характеристик деревини, її початкової вологості, геометричних параметрів на зміну пружнов'язкопластичного стану матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Синтез математичної моделі. На підставі основних законів термодинаміки незворотних процесів, механіки спадкових середовищ, усадки гіроскопічних матеріалів сформовано математичну модель двовимірного в'язкопружного

деформування капілярно-пористих матеріалів в умовах неізотермічного волого перенесення з урахуванням анізотропії тепломеханічних характеристик матеріалу, пластичних деформацій та деформацій, зумовлених механізмом механіко-сорбційної повзучості.

Систему модельних рівнянь для визначення компонент вектора деформацій $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12})^T$, напружень $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$, температури $T(\mathbf{x}, \tau)$ та вологовмісту $U(\mathbf{x}, \tau)$ дерев'яного бруса протягом часу $\tau \in [0, \tau_{\text{сум}}]$ в області поперечного перетину $\Omega = \{\mathbf{x} = (x_1, x_2); x_1 \in [0, l_1], x_2 \in [0, l_2]\}$ (l_1, l_2 – половини геометричних розмірів), центр якого суміщено з початком координат, а осі анізотропії збігаються з координатними осями, побудовано так. Компоненти вектора напружень задовольняють рівняння рівноваги [7] з граничними умовами, що враховують відсутність зовнішніх зусиль:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} = 0; \quad \sigma_{ij} \Big|_{x_1=l_1, x_2=l_2} = 0. \quad (1)$$

Моделювання зв'язку між компонентами напружень та деформацій деревини ґрунтується на інтегральних рівняннях Больцмана–Вольтера та законах усадки гігроскопічних матеріалів [7; 15]. Для врахування механіко-сорбційних деформацій, зумовлених швидкістю зміни вологості, функції реологічної поведінки матеріалів доповнено співвідношеннями механіко-сорбційної повзучості [19]. Тому зв'язок між напруженнями і деформаціями з урахуванням анізотропії механічних властивостей у матеріалі має вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(\tau) &= C_{11}(T, U) [\varepsilon_{11}(\tau) - \varepsilon_{U1}] - C_{11}(T, U) \int_0^\tau R_{11}(\tau - s, T, U) \cdot [\varepsilon_{11}(\tau) - \varepsilon_{U1}] ds + \\ &+ C_{12}(T, U) [\varepsilon_{22}(\tau) - \varepsilon_{U2}] - C_{12}(T, U) \int_0^\tau R_{12}(\tau - s, T, U) [\varepsilon_{22}(\tau) - \varepsilon_{U2}] ds; \\ \sigma_{22}(\tau) &= C_{21}(T, U) [\varepsilon_{11}(\tau) - \varepsilon_{U1}] - C_{21}(T, U) \int_0^\tau R_{21}(\tau - s, T, U) [\varepsilon_{11}(\tau) - \varepsilon_{U1}] ds + \\ &+ C_{22}(T, U) (\varepsilon_{22}(\tau) - \varepsilon_{U2}) - C_{22}(T, U) \int_0^\tau R_{22}(\tau - s, T, U) [\varepsilon_{22}(\tau) - \varepsilon_{U2}] ds; \\ \sigma_{12}(\tau) &= 2C_{33}(T, U) \varepsilon_{12}(\tau) - 2C_{33}(T, U) \int_0^\tau R_{33}(\tau - s, T, U) \varepsilon_{12}(s) ds, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\boldsymbol{\varepsilon}_U = (\varepsilon_{U1}, \varepsilon_{U2}, \varepsilon_{U3})^T$ – вектор компонент деформацій, зумовлених зміною температури і вологовмісту деревини; C_{ij} – компоненти тензора пружності деревини, залежні від температури і вологовмісту.

Для моделювання механіко-сорбційних деформацій, зумовлених швидкістю зміни вологості у деревині, використані рівняння [19]:

$$\frac{\partial \varepsilon_{Mij}}{\partial \tau} = m_{ij} \left(\sigma_{ij} - E_m \varepsilon_{Mij}(\tau) \right) \left| \frac{\partial U}{\partial \tau} \right|, \quad (3)$$

де m_{ij} – компоненти тензора механіко-сорбційних деформацій деревини. Вони та параметр E_m залежать від температури матеріалу і визначаються за експериментальними даними у радіальному і тангентальному напрямках анізотропії деревини.

Для моделювання пластичних деформацій у деревині використано рівняння пластичного плинину Прандтля–Рейса [5]. Співвідношення між диференціалами напружень і деформацій для плоского напруженого стану мають вигляд:

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \left(d\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} d\varepsilon_{kk} - s_{ij} \frac{s_{ke} d\varepsilon_{ke}}{s} \right); \quad s = \frac{2}{3} \sigma \left(1 + \frac{H}{3G} \right); \\ \bar{\sigma} &= \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}; \quad H = \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon_{nn}}; \quad d\varepsilon_{nn} = \frac{3}{2} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^{nn} d\varepsilon_{ij}^{nn}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де s_{ij} – дівігатори деформацій; δ_{ij} – символ Кронекера.

Функції реологічної поведінки деревини під час сушіння з урахуванням механізму нагромадження незворотних деформацій мають такий вигляд:

$$R(\tau, U, T) = \left[a_0 - \sum_{i=1}^M a_i \exp(-b_i \tau) \right] h(\tau) h(\tau_0 - \tau) - \left[\alpha_0 - \sum_{i=1}^M \alpha_i \exp(-\beta_i (\tau - \tau_0)) \right] h(\tau - \tau_0), \quad (5)$$

де $h(\tau)$ – функція Хевісайда, а невідомі коефіцієнти a_i , b_i , α_i , β_i визначено методом найменших квадратів на основі апроксимації експериментальних даних повзучості зразків деревини під навантаженням та після розвантаження [13; 15; 17]. Вони є функціями температури і вологості.

Двовимірна математична модель визначення полів температури і вологості з урахуванням анізотропії теплофізичних характеристик описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \varepsilon \rho_0 r \frac{\partial U}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_1 \frac{\partial U}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(a_2 \frac{\partial U}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_1 \delta \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(a_2 \delta \frac{\partial T}{\partial x_2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

Крайові умови мають вигляд:

$$\begin{aligned} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{x_i=l_i} + \rho_0 (1 - \varepsilon) \beta_i (U|_{x_i=l_i} - U_p) &= \alpha_i (t_c - T|_{x_i=l_i}); \\ \left(a_i \frac{\partial U}{\partial \mathbf{n}} + a_i \delta \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{x_i=l_i} &= \beta_i (U_p - U|_{x_i=l_i}); \quad \left(\alpha_i \frac{\partial U}{\partial \mathbf{n}} + \alpha_i \delta \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{x_i=0} = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{x_i=0} &= 0; \quad U|_{\tau=0} = U_0; \quad T|_{\tau=0} = T_0, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (7)$$

Тут введено позначення: $T_0(\mathbf{x})$, $U_0(\mathbf{x})$ – початкові розподіли температури та вмісту вологи у матеріалі; $U_p(T_c, \phi)$ – рівноважна вологість; $c(T, U)$ – теплоємність; $\rho(U)$ – густина; $\lambda_i(T, U)$, $a_i(T, U)$ – коефіцієнти теплопровідності та волого-провідності деревини у напрямках анізотропії; ε – коефіцієнт фазового переходу; ρ_0 – базисна густина; r – питома теплота пароутворення; $\delta(T, U)$ – термоградієнтний коефіцієнт; $\alpha_i(T_c, \nu)$ – коефіцієнти теплообміну; $\beta_i(T_c, \phi, \nu)$ – коефіцієнти вологообміну; T_c – температура середовища; $\phi(\tau)$ та $\nu(\tau)$ – відносна вологість та швидкість руху агента сушіння; \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі границі області Ω ; τ – поточний час.

Алгоритмічні та програмні аспекти реалізації моделі. Для чисельної реалізації математичних моделей неізотермічного масоперенесення у деревині (6) – (7) використано метод скінченних елементів (МСЕ) [8]. Для цього отримане еквівалентне варіаційне формулювання моделі з допущенням, що зміну вологовмісту в часі можна подати у вигляді суми складових, пов'язаних з потоком масоперенесення за допомогою градієнтів вологовмісту і температури. Кінцева система матричних рівнянь для реалізації математичної моделі (6) – (7) за МСЕ виглядає так [9; 12]:

$$[\mathbf{C}] \frac{\partial \{\mathbf{U}\}}{\partial \tau} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} + \{\mathbf{F}\} = 0; \quad [\bar{\mathbf{C}}] \frac{\partial \{\mathbf{T}\}}{\partial \tau} + [\bar{\mathbf{K}}]\{\mathbf{T}\} + \{\bar{\mathbf{F}}\} = 0, \quad (8)$$

де $[\mathbf{C}] = \int_V \rho_0 [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dV$; $[\mathbf{K}] = \int_V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}^*] [\mathbf{B}] dV + \int_S \rho_0 \beta_w [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dS$; $\{\mathbf{F}\} = \int_V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{H}] [\mathbf{B}] [\mathbf{T}] dV - \int_S \rho_0 \beta U_p [\mathbf{N}]^T dS$ – відповідно матриці теплофізичних властивостей матеріалу, демпфування та наванта-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

ження, $[\mathbf{N}]$ – матриця функцій форми. Аналогічний вигляд мають матриці $[\bar{\mathbf{C}}]$, $[\bar{\mathbf{K}}]$, $\{\bar{\mathbf{F}}\}$, пов’язані з коефіцієнтами теплопровідності та теплообміну. Для знаходження значень температури $\{\mathbf{T}\}$ і вологості $\{\mathbf{U}\}$ у будь-який момент часу τ використано метод скінченних різниць [4]. Оскільки теплофізичні характеристики деревини залежать від температури і вологості, а рівняння моделі (6) та (7) взаємопов’язані, то ітераційний процес реалізації рівнянь (9) здійснюється на кожному часовому кроці з урахуванням додаткової ітераційної процедури, яка уточнює вплив вологості на розподіл температури у матеріалі і навпаки [9; 12]. Завершення ітерацій для рівнянь (9) передбачає виконання умов: $\{U_n\} - \{U_{n-1}\} \leq 10^{-4}$ і $\{T_n\} - \{T_{n-1}\} \leq 10^{-4}$.

Для чисельної реалізації математичної моделі (1) – (5) пружнов’язкопластичного деформування деревини в умовах неізотермічного вологоперенесення розвинено МСЕ для дослідження деформативності деревини з урахуванням механіко-сорбційних і пластичних деформацій та механізму переродження деформацій. Для цього на основі мінімуму повної потенціальної енергії отримано еквівалентне варіаційне формулювання задачі. Для отримання основних співвідношень МСЕ використано скінченно-різницеву апроксимацію векторів переміщень $\{\mathbf{u}\}$, деформації $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ і функції реологічної поведінки деревини $\mathbf{R}(\tau, \tau')$ у часі. З умови мінімуму функціонала $\delta\Omega = 0$ отримано систему алгебраїчних рівнянь для знаходження невідомих переміщень на кожному часовому кроці $\Delta\tau$; ($i = \overline{1, M}$, M – кількість часових інтервалів) [9; 12]:

$$\sum_{n=1}^M [\bar{\mathbf{K}}^{(n)}] \{\mathbf{u}\} = \sum_{n=1}^M \{\bar{\mathbf{F}}^{(n)}\} - \sum_{n=1}^M [\bar{\mathbf{K}}^{(n)}] \left(\{\alpha\} \Delta T + \{\beta\} \Delta U + [\mathbf{m}] \left\| \frac{dU}{d\tau} \right\| \right), \quad (9)$$

де інтеграл $[\bar{\mathbf{K}}^{(n)}]$ визначають матрицю вузлової жорсткості матеріалу, яка визначається пружними або пластичними характеристиками деревини та геометричними розмірами елементів розбиття. У разі пружного деформування приймається, що $[\bar{\mathbf{K}}^{(n)}] = [\mathbf{K}^{(n)}]$. Для пружнопластичного деформування ($\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2} - \sigma_{11}\sigma_{22} + 3\sigma_{12}^2 > \sigma_{IT}$, σ_{IT} – границя текучості деревини) матриця жорсткості складається з двох матриць $[\mathbf{K}^{(n)}]$ і $[\mathbf{K}^{(n)pl}]$, а $[\mathbf{C}^{(n)pl}]$ обчислюється на основі (4). Матриця навантаження $\{\bar{\mathbf{F}}^{(n)}\}$ визначається реологічною поведінкою деревини, а також температурно-вологісними характеристиками матеріалу. Вектор шуканих компонент $\{\mathbf{u}\}$ на i -му кроці за розбиттям по часу є невідомим відносно обчислень $\{\mathbf{u}\}$ на попередніх $i-1$ кроках залежно від розподілу температури і вологості, які визначаються на тих самих кроках за алгоритмом, що описувався вище.

Для чисельної реалізації математичних моделей тепломасоперенесення (6) – (7) і пружнов’язкопластичного деформування (1) – (5) деревини розроблене у межах об’єктно-орієнтованого підходу прикладне програмне забезпечення [9]. Програмний комплекс містить інформаційну модель та інтерфейс програмної системи у вигляді пакетів класів та відношень між ними з використанням графічних діаграм UML, компоненти програмного коду, обчислювальні схеми реалізації МСЕ. Розроблені класи відображають сутність об’єктно-орієнтованої реалізації методу скінченних елементів. В окремі пакети виділено класи, які реалізують: геометричні та фізико-механічні характеристики деревини; розбиття області на скінченні елементи за допомогою сітки вузлів та елементів; визначення базисних функцій у межах скінченних елементів; обчислювальні класи (квадратури для чисельного інтегрування, інтерполяційні функції); розв’язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР); класи орієнтовані на конкретні обчис-

лення матричної та векторної алгебри; класи збереження введення та виведення даних; інтерфейс користувача.

Результати числового експерименту. На основі розроблених математичних моделей ізотермічного вологоперенесення та пружнов'язкопластичного деформування капілярно-пористих матеріалів, прикладного програмного забезпечення наведені результати чисельного аналізу впливу основних факторів геометричних розмірів деревини, початкової вологості на розвиток напружено-деформівного стану деревини. Проаналізовано вплив анізотропії механічних характеристик і параметрів механіко-сорбційної повзучості на розвиток напружень у деревині.

Для чисельного дослідження процесів тепловологоперенесення і деформування деревини за математичними моделями (1) – (5), (6), (7) використані такі параметри зовнішнього середовища і тепловологообміну: для $U > 0,35$, $t_c = 79$ °C, $\varphi = 0,77$, коефіцієнт теплообміну $\alpha = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, коефіцієнт вологообміну $\beta = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}$; для $U = 0,35 \div 0,25$, відповідно $t_c = 84$ °C, $\varphi = 0,62$, $\alpha = 22,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\beta = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}$; для $U < 0,25$, відповідно $t_c = 102$ °C, $\varphi = 0,27$, $\alpha = 22 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\beta = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}$.

Теплофізичні параметри деревини у процесі сушіння визначаються за апроксимаційними залежностями [16] від вологості і температури. Але для деяких параметрів необхідні уточнення. Зокрема, коефіцієнти вологопровідності деревини за даними [16] залежать лише від температури. Дані досліджень [20] свідчать про суттєву залежність α_m від вологості. Тому для визначення залежності α_m як функції $\alpha_m(U, t)$ використані результати експериментальних досліджень [20]. На основі оброблення експериментальних даних [2] отримана залежність коефіцієнта вологопровідності деревини від вологості для сталої температури:

$$a_m(U) = -274,391u^5 + 634,908u^4 - 526,7u^3 + 181,864u^2 - 22,655u + 1,905. \quad (10)$$

Тоді для розрахунків приймалося, що: $a_m = a_{mt} \cdot a_{mu}$; $a_{m\text{пао}}/a_{m\text{маи}} = 1,25$.

Тому для визначення коефіцієнта вологообміну використовувалась формула [3]:

$$\alpha_m = 0,95 \left(\frac{T}{(P/P_a)\phi\varepsilon} \right) \cdot 10^{-9}, \quad (11)$$

де ε – критерій фазового переходу; T – абсолютна температура середовища, К.

Згідно з формулою Томсона тиск пари у капілярах визначається за формулою:

$$P = P_0 \exp(-2\sigma V_p / rTR), \text{ Па}, \quad (12)$$

де σ – поверхневий натяг рідини, Н/м, V_p – молярний об'єм рідини, м³/моль.

Величина r визначається за залежністю $r = r(U)$, яка отримана на основі моделювання структури деревини системою непостійних капілярів, сукупністю циліндрів радіуса r , який залежить від вологості [18].

Для чисельної реалізації моделі використовувалися такі дані: $U_0 = 0,40$; $r = 2500 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\rho_0 = 460 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_6 = 430 \text{ кг}/\text{м}^3$; $v = 2 \text{ м}/\text{с}$; $l_1 = 100 \text{ мм}$; $l_2 = 50 \text{ мм}$. У рівняння математичної моделі перенесення тепла входить критерій фазового переходу ε . Він визначає частку вологи, яка випаровується всередині деревини. Обчислення проводились для різних значень $\varepsilon = 0; 0,2; 0,5; 0,7; 1,0$. Результати досліджень показали незначний вплив зміни параметра ε на розподіл температурно-вологісних полів для математичної моделі (6) – (7). Тому в розрахунках приймалося значення $\varepsilon = 0,2$.

Результати чисельного моделювання вологовмісту відповідно для різних моментів часу наведено на рис. 1. Значення τ відповідно дорівнюють 300 хв (крива 1); 2400 хв (крива 2); 4800 хв (крива 3); 8000 хв (крива 4). Їх аналіз свідчить про те, що за даних умов зовнішнього середовища утворюється градієнт вологи між поверхнею деревини та

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

приповерхневими і центральним шарами. Процес дифузії вологи у матеріалі є менш інтенсивним від процесу вологообміну поверхні взірця з навколишнім середовищем. Тому значення вологості на поверхні зменшується і прямує до рівноважної, а максимальні градієнти вологовмісту утворюються у початкові моменти часу.

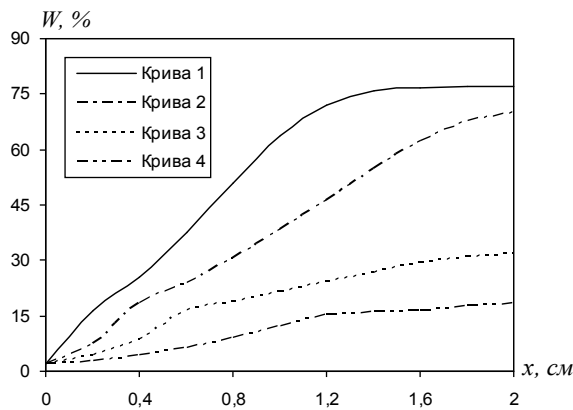


Рис. 1. Розподіл вологості у деревині для різних значень часу

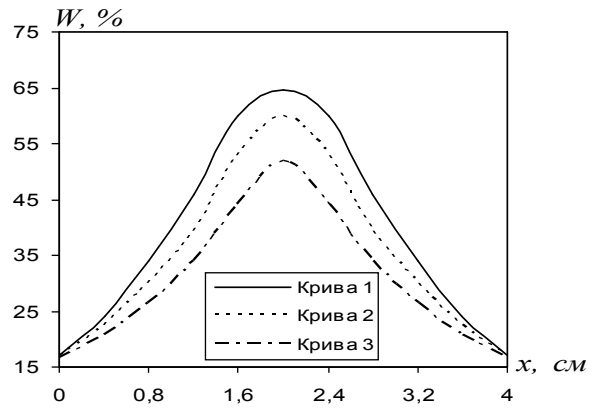


Рис. 2. Залежність розподілу вологи у тангентальній для різних значень часу

Для дослідження впливу анізотропії структурних властивостей деревини проведено чисельний експеримент визначення температурно-вологісних полів у радіальних і тангентальних взірцях. Для виявлення впливу саме анізотропії теплофізичних властивостей умови зовнішнього середовища задавалися такими, для яких коефіцієнти всихання будуть якнайменшими [2; 16]. Геометричні розміри задавалися попередніми. Температура зовнішнього середовища $t_c = 80$ °С, а відносна вологість $\varphi = 0,92$. Рівноважна вологість для деревини $\rho_0 = 460$ кг/м³ дорівнює 18 %. Коефіцієнти теплопровідності у тангентальному напрямі λ_t можна визначити через аналогічний коефіцієнт у радіальному за допомогою поправки K^* , а саме $\lambda_t = K^* \cdot \lambda_p$. Значення цієї поправки залежить від базової густини [15; 16] і дорівнює $K^* \approx 0,98$. Відношення ж коефіцієнтів вологопровідності у радіальному і тангентальному напрямках для деревини є суттєвим. Як зазначалося раніше, $a_{mrad}/a_{mtan} = 1,25$. На рис. 2 наведені криві розподілу вологості тангентальної дошки для різних моментів часу. Їх аналіз свідчить про те, що вологість поверхневої зони взірця суттєво не впливає на розподіл вологості за товщиною тангентальної дошки. Протягом тривалого проміжку часу вологість у центральній частині дошки не змінюється. У початкові моменти часу максимальні значення вологості спостерігаються у приповерхневих шарах.

Деревина являє собою пружнов'язкопластичний матеріал. Згідно з експериментальними дослідженнями тільки елементи «сухого тертя» здатні описати зникнення залишкових напружень у процесі нагрівання та зволоження деревини. У процесі деформування деревини під навантаженням одночасно з пружною деформацією утворюються пластична деформація, зумовлена неоднорідністю структури матеріалу. Механізм розвитку пластичної деформації є іншим, ніж пружної. Для невеликих навантажень пластичні деформації є досить малими. Вони зростають зі збільшенням навантаження і домінують після досягнення границі повзучості. Враховуючи, що деревина складається зі значної кількості клітин різної міцності і враховуючи те, що елементи «сухого тертя» у фіксований момент часу деформування знаходяться в одному зі станів пружності, пластичності або руйнування, у [14] показано можливість застосування сукупності елементів Сен-Венана для моделювання пластичної деформації у деревині. Кожний елемент у моделі Сен-Венана моделює деформування клітин різної міцності і з'єднується паралельно з іншими елементами «сухого тертя».

Таким чином, навіть для незначних короткочасних навантажень показником деформативності, крім пружних напружень, варто враховувати і миттєві незворотні деформації. Їх виявлення обґрунтовується на молекулярному рівні. Деревина складається з різних полімерів, основними з яких є целюлоза та лігнін. Целюлоза утворює фібрилярну арматуру, а лігнін і нецелюлозні елементи складають аморфну матрицю, яка заповнює елементи між фібрилями. За даними [5; 15; 17] такі загальні принципи побудови деревної речовини єдині для деревини різних порід, хоча кількісна будова деревної речовини є різною в клітинах різних видів і навіть суттєво змінюється у клітинах для однієї породи. Отже, целюлоза та лігнін являють собою полімери, молекули яких утворюють значну кількість атомних групувань, з'єднаних хімічними зв'язками у ланцюги різної довжини. Між атомами ланок існують міцні хімічні зв'язки, а самі ланки характеризуються слабкими міжмолекулярними зв'язками. Тому механізм руху макромолекул у деревині під дією зусиль пов'язаний з рухом однієї частини молекул відносно іншої.

Для встановлення значень модуля пластичності E_{nl} взірців необхідно використати масштабні фактори. Згідно з [14], масштабний коефіцієнт модуля пружності E для стандартного взірця у поперечному перерізі без урахування розміру впадин дорівнює $1,56 \div 1,87$. У літературі [15; 17] значний розкид даних навіть для модулів пружності, наприклад, для деревини сосни для 15 % вологості від 618 МПа до 500 МПа зумовлено не лише мінливістю фізико-механічних властивостей деревини, але й різними розмірами взірців в експериментальних дослідженнях.

Для визначення модуля пластичності E_{nl} використана реологічна модель деревини та експериментальні дослідження [7; 14]. Реологічна модель складається з послідовно з'єднаних пружного, в'язкопружного та пластичного елемента. Отриманий вираз для визначення модуля пластичності має вигляд:

$$E_{nl} = \frac{\sigma E_1 E_2}{\varepsilon E_1 E_2 - \sigma(E_1 + E_2) + \sigma E_1 \exp(-E_2 \tau / \eta_2)}, \quad (13)$$

де E_1, E_2 – миттєвий і тривалий модулі пружності; η_2 – коефіцієнт релаксації.

Для чисельної реалізації математичної моделі щодо дослідження напружено-деформівного стану в деревині в умовах неізотермічного вологоперенесення значення модулів пружності, які залежні від температури і вологості, перераховування через модулі Юнга та зсуву. Ці значення вибирались у вигляді [15; 17]:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{x_0} (1 + E_{xt} (T_0 - T)) + E_{xu} (U_p - U); \\ E_2 &= E_{y_0} (1 + E_{yt} (T_0 - T)) + E_{yu} (U_p - U); \\ G_{12} &= G_{xy_0} (1 + G_{xyt} (T_0 - T)) + G_{xyu} (U_p - U), \end{aligned} \quad (14)$$

де $E_{x_0}, E_{xt}, E_{xu}, E_{y_0}, E_{yt}, E_{yu}, G_{xy_0}, G_{xyt}, G_{xyu}$ – коефіцієнти, які визначаються на основі апроксимації експериментальних даних. Для їх визначення використані експериментальні дослідження [17] модулів пружності та зсуву деревини залежно від зміни температури і вологості. Компоненти рівноваги для моделювання механіко-сорбційних деформацій також визначалися за допомогою апроксимації експериментальних даних [17; 20] вони визначалися за співвідношеннями:

$$m_1 = m_{x_0} (1 + m_{xt} (T_0 - T)); m_2 = m_{y_0} (1 + m_{yt} (T_0 - T)); m_{12} = m_{xy_0} (1 + m_{xyt} (T_0 - T)), \quad (15)$$

де $m_{x_0}, m_{xt}, m_{y_0}, m_{yt}, m_{xy_0}, m_{xyt}$ – коефіцієнти, визначені на основі експериментальних даних для $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Зокрема, $m_{x_0} = 0,15 \text{ МПа}^{-1}, m_{y_0} = 0,2 \text{ МПа}^{-1}$,

$m_{xy_0} = 0,8 \text{ МПа}^{-1}$, $m_{xt} = m_{yt} = m_{xyt} = -0,01^\circ \text{C}^{-1}$. Коефіцієнт $\mu_{12} = 1$. Коефіцієнти всихання у напрямках анізотропії у рівні $\beta_1 = 0,19$; $\beta_2 = 0,35$.

Наведені математичні моделі з вищенаведеними вхідними значеннями і допущеннями використані для дослідження впливу анізотропії механічних характеристик деревини, коефіцієнтів всихання і коефіцієнтів механіко-сорбційної повзучості на розподіл нормальних напружень на поверхні і при поверхневому шарі. Для цього у процесі чисельного моделювання змінювався досліджуваний показник шляхом зменшення до половини його значення. Зокрема, на рис. 3 наведено графічні залежності нормального напруження σ_x на поверхні тангентального пиломатеріалу для різних значень компонент тензора пружності.

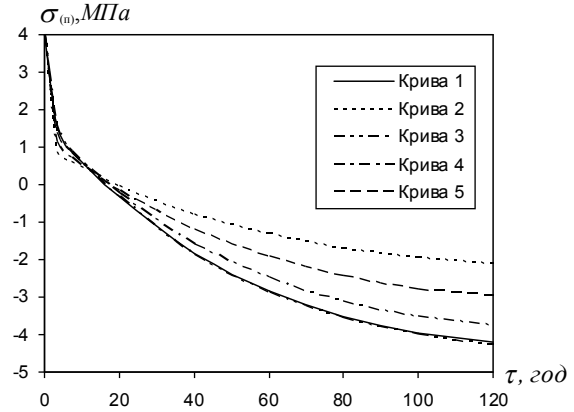


Рис. 3. Вплив анізотропії компонент тензора пружності на розподіл нормальних напруження σ_x на поверхні

Суцільна крива 1 відповідає чисельному розрахунку без зміни пружних характеристик. Найбільший вплив на розподіл напружень σ_x має зміна модуля Юнга у тангентальному напрямі крива 2 (для якої $E_2^{(2)} = 0,5 E_2$, а інші коефіцієнти не змінювалися у процесі чисельного моделювання). Зокрема, збільшення відхилення σ_x для випадку $E_2^{(2)} = 0,5 E_2$ від σ_x без зміни E_2 є суттєвішим зі зростанням часу сушіння. Зміна модуля пружності у радіальному напрямі $E_1^{(3)} = 0,5 E_1$ не суттєво впливає на розподіл σ_x на поверхні (крива σ_x у цьому випадку практично збігається з σ_x без зміни характеристик). Зменшення коефіцієнта Пуассона $\nu_{12}^{(4)} = 0,5 \nu_{12}$ на зміну компоненти σ_x характеризує крива 4, а зменшення модуля зсуву $G_{12}^{(5)} = 0,5 G_{12}$ на σ_x описує крива 5. Аналіз графічних залежностей свідчить про зростання зміни анізотропних механічних характеристик деревини, залежних від вологості на розподіл нормальних напружень σ_x на поверхні з плином часу сушіння деревини.

На рис. 4 наведені результати чисельного моделювання впливу анізотропії коефіцієнтів всихання β_1 і β_2 на розподіл напружень на поверхні. Крива 2 описує вплив зміни коефіцієнта β_1 у тангентальному напрямі, а крива 3 вплив коефіцієнта β_2 на розподіл σ_x . На початку процесу сушіння вплив анізотропії коефіцієнтів всихання незначно впливає на розподіл, криві 2, 3 корелюють з кривою 1, для якої β_1 і β_2 не змінюються. Аналіз кривих розподілу σ_x свідчить про переважаючий вплив коефіцієнта всихання для тангентального напрямку β_1 на розподіл напружень у порівнянні з коефіцієнтом для радіального напрямку. Зменшення коефіцієнта всихання у тангентальному напрямі для $\tau = 48$ год зумовлює зменшення напружень σ_x на 25 % у порівнянні зі зменшенням β_2 для радіального напрямку.

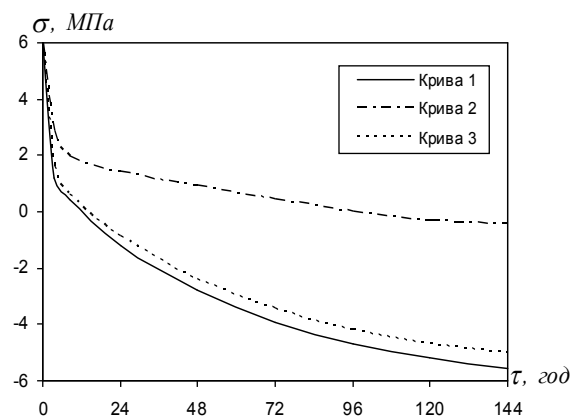


Рис. 4. Вплив анізотропії коефіцієнтів β_1 , β_2 на розподіл нормальних напруження σ_x на поверхні

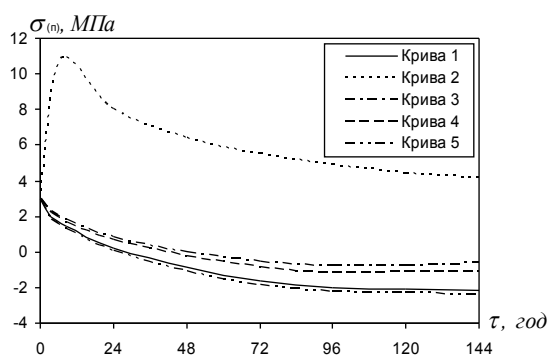


Рис. 5. Вплив анізотропії коефіцієнтів механіко-сорбційної повзучості на розподіл нормальних напружень σ_x на поверхні

Дослідження впливу зміни коефіцієнтів механіко-сорбційної повзучості на розподіл напружень на поверхні наведено на рис. 5. Особливо значний вплив спостерігається зі зміною коефіцієнта у тангентальному напрямі m_1 . Зокрема зменшення $m_1^{(2)} = 0,5 m_1$ (крива 2) веде не лише до кількісної зміни напружень у порівнянні з величиною σ_x для сталих значень коефіцієнтів, а й до якісної. Вплив інших коефіцієнтів, зокрема, у радіальному напрямі, $m_2^{(3)} = 0,5 m_2$ (крива 3), а коефіцієнта $\mu_{12}^{(4)} = 0,5 \mu_{12}$ (крива 4) є менш суттєвим. Коефіцієнт m_{12} незначно впливає на величину

σ , оскільки крива 5, для якої $m_{12}^{(5)} = 0,5 m_{12}$ незначно відрізняється від кривої 1.

Результати досліджень впливу зміни коефіцієнтів Юнга E_1, E_2 , Пуасона ν_{12} і зсуву G_{12} у напрямках анізотропії на розподіл нормальних напружень для значень σ_x ($0 \leq x \leq 150$ мм, $y = 37,5$ мм) показано на рис. 6. Суцільна крива 1 відповідає значенню σ для вказаних значень пружних коефіцієнтів у процесі чисельного моделювання. Найменший вплив на розподіл напружень σ_x має зменшення модуля Юнга у радіальному напрямі (крива 2 для $E_2^{(2)} = 0,5 E_2$, інші коефіцієнти залишаються без змін) та коефіцієнта Пуасона (крива 5 для $\nu_{12}^{(5)} = 0,5 \nu_{12}$). Найбільш суттєво впливає зміна коефіцієнта Юнга у тангентальному напрямі (крива 3 для $E_1^{(3)} = 0,5 E_1$). Така зміна для $\tau = 8$ год веде до зменшення максимального значення стискаючих напружень від $\sigma = -0,83$ МПа до $\sigma = -0,59$ МПа. Також у часі зсувається момент зміни знаку від стискаючого характеру до розтягуючого. Це спостерігається і для зменшення модуля зсуву (крива 4 для $G_{12}^{(4)} = 0,5 G_{12}$).

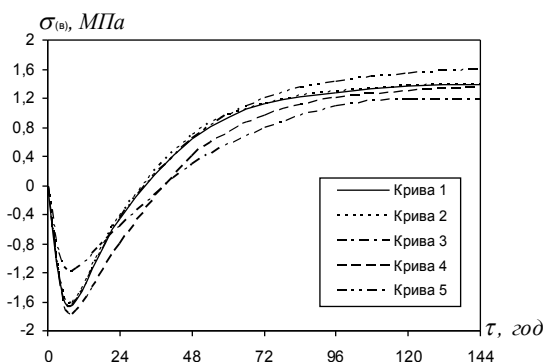


Рис. 6. Вплив анізотропії компонент тензора пружності на розподіл нормальних напружень у приповерхневому шарі

Висновки та пропозиції. Сформульована математична модель в'язкопружного деформування і процесів тепломасоперенесення у капілярно-пористих матеріалах з урахуванням змінних анізотропних тепломеханічних характеристик, яка враховує пластичні деформації, деформації, зумовлені механіко-сорбційною повзучістю і дає змогу визначити двовимірний напружено-деформівний стан в умовах неізотермічного вологоперенесення. Побудовано алгоритм методу скінченних елементів та розроблено прикладне програмне забезпечення для дослідження двовимірного анізотропного напружено-деформівного стану капілярно-пористих матеріалів у пружнов'язкопластичній

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

області деформування з урахуванням механіко-сорбційної повзучості. У результаті обчислювальних експериментів, проведених з використанням розроблених прикладних програмних засобів, встановлено закономірності впливу анізотропії теплофізичних та механічних характеристик деревини, її початкової вологості, геометричних характеристик, механізму механіко-сорбційної повзучості на зміну пружнов'язкопластичного стану деревини в умовах неізотермічного вологоперенесення.

Список використаних джерел

1. *Белянкин Ф. П.* Деформативность и сопротивляемость древесины / Ф. П. Белянкин, В. Ф. Яценко. – К. : АН УССР, 1957. – 199 с.
2. *Гороховский А. Г.* Исследование разброса влажности сухих пиломатериалов на качество продукции деревообработки / А. Г. Гороховский // *Деревообрабатывающая промышленность.* – 2004. – № 4. – С. 56–59.
3. *Лыков А. В.* Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.
4. *Можаровский Н. С.* Методы и алгоритмы решения краевых задач / Н. С. Можаровский, Н. Е. Кочаловская. – К. : Вища школа, 1981. – 287 с.
5. *Писаренко Г. С.* Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наук. думка, 1988. – 736 с.
6. *Пінчевська О. О.* Вплив режимів термічного модифікування на фізичні властивості деревини граба / О. О. Пінчевська, В. М. Головач, О. Ю. Горбачова // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology.* – Варшава, 2014. – № 88 – С. 193–197.
7. *Савін Г. М.* Элементы механики спадкових середовищ. Вип. II: Реологічні тіла з загальним законом лінійного деформування / Г. М. Савін. – К., 1970. – 132 с.
8. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 378 с.
9. *Соколовський Я. І.* Алгоритмічне та програмне забезпечення системи моделювання та аналізу процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів / Я. І. Соколовський, І. М. Крошній // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології.* – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – № 732. – С. 306–315.
10. *Соколовський Я. І.* Математична модель в'язкопружного деформування капілярно-пористих матеріалів / Я. І. Соколовський, О. В. Мокрицька // *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України : зб. наук.-техн. праць.* – 2011. – Вип. 21.2. – С. 320–328.
11. *Соколовський Я. І.* Математична модель тепловологоперенесення та напружено-деформівного стану у капілярно-пористих матеріалах із фрактальною структурою / Я. І. Соколовський, В. М. Шиманський // *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології.* – Львів : Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2012. – Вип. 16. – С. 133–142.
12. *Соколовський Я. І.* Математичне моделювання впливу зовнішнього середовища на напружено-деформівний стан деревини у процесі сушіння / Я. І. Соколовський, І. М. Крошній // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика.* – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2011. – № 711. – С. 72–82.
13. *Соколовський Я. І.* Методика та результати експериментальних досліджень реологічної поведінки деревини / Я. І. Соколовський, Й. В. Андрашек // *Науковий вісник УкрДЛТУ України : зб. наук.-техн. праць.* – 1999. – Вип. 9.13. – С. 15–26.
14. *Тюленева Е. М.* Экспериментальное определение модуля упругости первого рода / Е. М. Тюленева // *Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сб. ст.* – Красноярськ, 2004. – Ч. II. – С. 113–114.
15. *Уголев Б. Н.* Древесиноведение с основами лесного товароведения : учеб. для лесотехн. вузов / Б. Н. Уголев ; М-во образования Рос. Федерации, Моск. гос. ун-т леса. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : МГУЛ, 2002. – 340 с.
16. *Шубин Г. С.* Сушка и тепловая обработка древесины / Г. С. Шубин. – М. : Лесная промышленность, 1990. – 336 с.
17. *Bodic J.* Mechanics of Wood and Composites / Bodic J., Jayne A. – New York : Van Nostrand Reinhold, 1982. – 712 p.

18. John F. Sian. Wood: influence of moisture on physical properties / John F. Sian. – Virginia, 1995. – 227 p.
19. Niemz P. Research into determination of the Poisson ratio of spruce wood. / P. Niemz, D. Caduff // Holz Roh Werkst. – 2008. – № 66(1). – Pp. 1–4.
20. Perre P. A physical and mechanical model able to predict the stress field in wood over a wide range of drying conditions / P. Perre, J. Passard // Drying Technology. – 2004. – Vol. 22 (no. 1-2). – Pp. 27–44.
21. Sokolovskyy Ya. Demention of the Non-isotropic Elastic Features for Wood by an Ultrasonic Method / Ya. Sokolovskyy, O. Storoshuk // 57th SWST Convention of Society of Wood Science and Technology. – Zvolen, Slovakia, 2014. – Pp. 178–187.
22. Sokolowskyi Ya. Mathematical modelling of non-isothermal moisture transfer and rheological behavior in capillary-porous materials with fractal structure during drying / Ya. Sokolowskyi, V. Shymanskyi // Computer and Information Science. – Canadian Center of Science and Education. – 2014. – Vol. 7, No. 4. – Pp. 111–122.

References

1. Beliankin, F.P., Iacenko, V.F. (1957). *Deformativnost i soprotivliaemost [Deformability and resistance of wood]*. Kiev: AN USSR (in Russian).
2. Gorokhovskii, A.G. (2004). Issledovanie rasbrosa vlazhnosti sukhikh pilomaterialov na kachestvo produktsii derevoobrabotki [Investigation of the dispersion of humidity of dry timber on the quality of wood products]. *Derevoobrabatyvaiushchaia promyshlennost – Woodworking industry*, no. 4, pp. 56–59 (in Russian).
3. Lykov, A.V. (1971). *Teplomassoobmen: spravochnik [Heat and mass transfer: reference book]*. Moscow: Energia (in Russian).
4. Mozharovskii, N.S., Kochalovskaia, N.E. (1981). *Metody i algoritmy resheniia kraevykh zadach [Methods and algorithms for solving boundary value problems]*. Kiev: Vyshcha shkola (in Russian).
5. Pisarenko, G.S., Iakovlev, A.P., Matveev, V.V. (1988). *Spravochnik po soprotivleniiu materialov [Handbook on the resistance of materials]*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
6. Pinchevska, O.O., Holovach, V.M., Horbachova, O.Yu. (2014). Vplyv rezhymiv termichnoho modyfikuvannia na fizychni vlastyvoli derevyny hraba [The influence of thermal modification modes on the physical and mechanical properties of hornbeam]. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*, no. 88, pp. 193–197 (in Ukrainian).
7. Savin, G.M. (1970). *Elementy mekhaniky spadkovykh seredovyshch. Vyp. II: Reologichni tila z zagalnym zakonom liniynogo deformuvannja [Elements of mechanics of hereditary environments. Volume II: Rheological body with universal law of linear deformation]*. Kiev (in Ukrainian).
8. Segerlind, L. (1979). *Primenenie metoda konechnykh elementov [The application of the finite element method]*. Moscow: Mir (in Russian).
9. Sokolovskii, Ya.I., Kroshnii, I.M. (2012). Alhorytmichne ta prohramne zabezpechennia systemy modeliuvannia ta analizu protsesu sushinnia kapiliarno-porystykh materialiv [Algorithmic and software system modeling and analysis of drying of capillary-porous materials]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu „Lvivska politekhnika”: Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnologii – Proceedings of the National University “Lviv Polytechnic”, Computer Science and Information Technology*. Lviv: Publishing House Lviv Polytechnic, no. 732, pp. 306–315 (in Ukrainian).
10. Sokolovskii, Ya.I., Mokrytska, O.V. (2011). Matematychna model viazkopruzhnogo deformuvannia kapiliarno-porystykh materialiv [Mathematical model of viscoelastic deformation of capillary-porous materials]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu Ukrainy – Scientific Bulletin of National Forestry University of Ukraine*. Lviv, Ukraine NLTU, no. 21.2, pp. 320–328 (in Ukrainian).
11. Sokolovskii, Ya.I., Shymanskyi, V.M. (2012). Matematychna model teplovohoperenesennia ta napruzhenno-deformivnoho stanu u kapiliarno-porystykh materialakh iz fraktalnoiu strukturoiu [A mathematical model of heat and moisture transfer and stress-strained state in capillary-porous materials with fractal structure]. *Fizyko-matematychne modeliuvannia ta informatsiini tekhnologii – Physical modeling and information technology*. Lviv: Center of Mathematical Modeling Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics. Pidstryhach NAS of Ukraine, no. 16, pp. 133–142 (in Ukrainian).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

12. Sokolovskii, Ya.I., Kroshnyi, I.M. (2011). Matematychno modeliuvannia vplyvu zovnishnoho seredovyshcha na napruzhenno-deformivnyi stan derevyny u protsesi sushinnia [Mathematical modeling of the impact of the environment on stress-strain state in the process of drying wood]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu „Lvivska politekhnika”: Kompiuterni systemy proektuvannia. Teoriia i praktyka – Visnyk of the National University “Lviv Polytechnic”: Computer Systems. Theory and practice*. Lviv: Publishing House Lviv Polytechnic, no. 711, pp. 72–82 (in Ukrainian).
13. Sokolovskii, Ya.I., Andrashek, I.V. (1999). Metodyka ta rezultaty eksperymentalnykh doslidzen reolohichnoi povedinky derevyny [The methodology and results of experimental studies rheological behavior of wood]. *Naukovyi visnyk UkrDLTU Ukrainy*. Lviv, no. 9.13, pp. 15–26 (in Ukrainian).
14. Tiuleneva, E.M. (2004). Eksperimentalnoe opredelenie modulua uprugosti pervogo roda [Experimental determination of the modulus of elasticity of the first kind]. *Lesnoi i khimicheskii kompleksy – problemy i resheniia – Forest and chemical complexes – problems and solutions*. Krasnoyarsk, part II, pp. 113–114 (in Russian).
15. Ugolev, B.N. (2002). *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedenia [Wood Science with the Basics of Forest Goods Science]* (3ed ed.). Moscow: MGUL (in Russian).
16. Shubin, G.S. (1990). *Sushka i teplovaia obrabotka drevesiny [Drying and heat treatment of wood]*. Moscow: Lesnaia promyshlennost (in Russian).
17. Bodic, J., Jayne, A. (1982). *Mechanics of Wood and Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold.
18. John F. Sian. (1995). *Wood: influence of moisture on physical properties*. Virginia.
19. Niemz, P., Caduff, D. (2008). *Research into determination of the Poisson ratio of spruce wood*. *Holz Roh Werkst*, no. 66(1), pp. 1–4.
20. Perre, P., Passard, J. (2004). A physical and mechanical model able to predict the stress field in wood over a wide range of drying conditions. *Drying Technology*, vol. 22, no. 1–2, pp. 27–44.
21. Sokolovskii, Ya., Storoshuk, O. (2014). Demention of the Non-isotropic Elastic Features for Wood by an Ultrasonic Method. *Proceedings from 57th SWST Convention of Society of Wood Science and Technology* (Zvolen, Slovakia), pp. 178–187.
22. Sokolovskii, Ya., Shymanskyi, V. (2014). Mathematical modelling of non-isothermal moisture transfer and rheological behavior in capillary-porous materials with fractal structure during drying. *Computer and Information Science, Canadian Center of Science and Education*, vol. 7, no. 4, pp. 111–122.

Соколовський Ярослав Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, Національний лісотехнічний університет України (вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна).

Соколовский Ярослав Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий, Национальный лесотехнический университет Украины (ул. Генерала Чупринки, 103, г. Львов, 79057, Украина).

Sokolovskyy Yaroslav – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of IT Department, Ukrainian National Forestry University (103 Gen. Chuprynka Str., 79057 Lviv, Ukraine).

E-mail: sokolowsky@ukr.net

Криштапович Володимир Іванович – старший викладач кафедри АКІТ, Національний лісотехнічний університет України (вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна).

Криштапович Владимир Иванович – старший преподаватель кафедры АКИТ, Национальный лесотехнический университет Украины (ул. Генерала Чупринки, 103, г. Львов, 79057, Украина).

Kryshchapovych Volodymyr – Senior lecturer of AKIT Department, Ukrainian National Forestry University (103 Gen. Chuprynka Str., 79057 Lviv, Ukraine).

E-mail: kvi20051@i.ua

Крошній Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Національний лісотехнічний університет України (вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна).

Крошній Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий, Национальный лесотехнический университет Украины (ул. Генерала Чупринки, 103, г. Львов, 79057, Украина).

Kroshnyi Igor – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department IT, Ukrainian National Forestry University (103 Gen. Chuprynka Str., 79057 Lviv, Ukraine).

E-mail: kroshny.igor@gmail.com