

ВИЗНАЧЕННЯ АНІЗОТРОПНИХ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕРЕВИНИ АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

***Я.І. Соколовський, доктор технічних наук
О.Л. Сторожук, здобувач
Національний лісотехнічний університет України***

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлені нові закономірності між швидкістю поширення акустичних хвиль та механічними властивостями деревини у широкому діапазоні температур та вологості, які можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів та операцій деревообробного виробництва і розробці нових методів кваліметрії.

Деревина, тензор модулів пружності, анізотропність, температура, вологість, акустичні методи, швидкість поширення акустичної хвилі.

Постановка проблеми. Інтенсивне споживання деревини як конструкційного матеріалу призводить до дефіциту деревинних ресурсів. У таких умовах постає питання раціонального використання деревини та виробів з неї. Одним із напрямків у вирішенні цієї проблеми є вдосконалення, розробка та впровадження енергоощадних технологій на підприємствах деревообробної галузі. Впровадження таких технологій нерозривно пов'язано із оперативним визначенням та контролем фізико-механічних характеристик деревини у різних технологічних процесах та операціях деревообробного виробництва.

Експериментальні та теоретичні дослідження, проведені за останні десятиліття, показали існування залежностей між фізико-механічними властивостями твердих тіл та швидкістю поширення акустичних хвиль. Завдяки зв'язку акустичних хвиль із фізико-механічними характеристиками матеріалів акустичні методи неруйнівного контролю характеризуються надійністю, швидкістю отримання інформації, ефективністю контролю, можливістю повторного вимірювання. Даний вид контролю застосовують до матеріалів, зокрема для деревини, які добре проводять акустичні хвилі. Тому виявлення і встановлення залежностей між фізико-механічними властивостями деревини та швидкістю поширення акустичних коливань у змінних температурно-вологісних умовах

© Я.І. Соколовський, О.Л. Сторожук, 2013

створює умови активного технологічного регулювання різних процесів оброблення деревини і контролю її якості.

Мета і завдання досліджень. Теоретичне та експериментальне визначення анізотропних пружних характеристик деревини акустичним методом та вдосконалення способів їх контролю за швидкістю поширення акустичних хвиль.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення таких основних завдань: 1) провести аналіз літературних джерел щодо визначення механічних властивостей деревини за допомогою акустичних неруйнівних методів; 2) синтезувати для деревини, як анізотропного пружного матеріалу, математичну модель поширення акустичних хвиль; 3) розробити математичну модель поширення акустичної хвилі у деревині як в'язкопружному матеріалі; 4) розробити та вдосконалити способи визначення швидкості поширення акустичних хвиль у деревині з метою підвищення точності вимірювань; 5) спроектувати та розробити експериментальну установку для акустичних досліджень; 6) для забезпечення проведення серії експериментальних досліджень із змінними кліматичними умовами спроектувати та розробити лабораторну кліматичну камеру; 7) розробити методику експериментальних досліджень знаходження швидкості поширення акустичних хвиль у деревині; 8) провести експериментальні дослідження для встановлення закономірностей зв'язку швидкості поширення акустичної хвилі із механічними властивостями деревини.

Результати досліджень. Вдосконалено просторову математичну модель поширення акустичних хвиль у анізотропному пружному матеріалі стосовно деревини, яка встановлює зв'язок між механічними властивостями деревини та швидкістю поширення акустичної хвилі.

Рівняння руху, яке виводиться із основного закону динаміки, із врахуванням закону Гука запишеться, як

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \cdot \partial x_k} \quad (1)$$

де: ρ – густина матеріалу (маса одиничного об'єму), $\partial^2 u_i / \partial t^2$ – прискорення вздовж осі i , u_i – переміщення, c_{ijkl} – компоненти тензора пружності, t – час.

Поширення плоскої бігучої хвилі можна представити у вигляді:

$$u(x, t) = F(t - nx / v_\phi) \quad (2)$$

де: v_ϕ – фазова швидкість поширення хвилі, $F(t - nx / v_\phi)$ – функція, яка описує хвилю, що поширюється в додатному напрямку осі x , n – одиничний вектор який перпендикулярний до хвильового фронту.

Так, як поширення хвилі в деревині розглядається в прямокутній Декартовій системі координат, необхідно у (2) ввести координати точки (x_1, x_2, x_3) – складові вектора x та направляючі косинуси (n_1, n_2, n_3) – складові вектора n).

$$u(x, t) = F\left(t - \frac{n_1 x_1 + n_2 x_2 + n_3 x_3}{v_\phi}\right) \quad (3)$$

У випадку збудження у деревині плоскої синусоїдальної хвилі, формулу (3) можна записати, як

$$u_i = A \cos \omega(t - \mathbf{n}x / v_\phi) = A \cos(\omega t - kx) \quad (4)$$

де: A – амплітуда хвилі, k – хвильовий вектор, ω – циклічна частота.

$$k = \omega n / v_\phi = 2\pi / \lambda = kn \quad (5)$$

де: λ – довжина хвилі.

В комплексному вигляді (4) записується у наступному вигляді.

$$u_i = A_i \cdot e^{i(\omega t - kx)} = A_i \exp[i(\omega t - kx)] \quad (6)$$

де: $i^2 = -1$.

Підставивши співвідношення (6) в (1) та враховуючи (5), отримаємо

$$-\rho A_i \omega^2 \exp[i(\omega t - kx)] + c_{ijkl} A_l (\omega / v_\phi)^2 n_k n_j \exp[i(\omega t - kx)] = 0. \quad (7)$$

Враховуючи, що $\exp[i(\omega t - kx)] \neq 0$, після математичних перетворень отримаємо рівняння наступного вигляду

$$c_{ijkl} A_l n_k n_j - \rho A_i v_\phi^2 = 0 \quad (8)$$

Вводячи тензор другого рангу $\Gamma_{il} = c_{ijkl} n_k n_j$, рівняння (8), запишеться наступним чином

$$A_l \Gamma_{il} - \rho \delta_{il} A_l v_\phi^2 = 0, \quad (9)$$

де: δ_{il} – символ Кронекера, який визначається, як $\delta_{il} = \begin{cases} 1, i=l \\ 0, i \neq l \end{cases}$.

Оскільки для амплітуди можна написати $A_i = A P_m$, де $P_m(p_1, p_2, p_3)$ – компонент одиничного вектора в напрямку зміщення (поляризації), то рівняння (9) запишеться, як

$$(\Gamma_{il} - \rho \delta_{il} v_\phi^2) P_m = 0 \quad (10)$$

Вираз (10) представляє собою систему трьох однорідних лінійних рівнянь, які забезпечують співвідношення між компонентами тензора пружності c_{ijkl} та фазовою швидкістю v_ϕ акустичної хвилі, що поширюється в однорідному анізотропному пружному середовищі.

Для того, щоб система рівнянь (10) мала розв'язок відмінний від $p_1 = p_2 = p_3 = 0$, необхідно, щоб визначник, який складається із $(\Gamma_{il} - \rho \delta_{il} v_\phi^2)$, був рівний нулю.

$$\left| \Gamma_{il} - \rho \delta_{il} v_\phi^2 \right| = \begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho v_\phi^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} - \rho v_\phi^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} - \rho v_\phi^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

В силу симетрії модулів пружності тензор Γ_{il} також характеризується умовами симетричності

$$\Gamma_{il} = c_{ijki} n_j n_k = c_{kij} n_j n_k = c_{ikjl} n_j n_k = c_{ijkl} n_j n_k = \Gamma_{il}.$$

Компоненти тензора $\Gamma_{il} = c_{ijkl} n_k n_j$ отримаємо сумуючи індекси j та k

$$\Gamma_{il} = c_{i11l} n_1^2 + c_{i22l} n_2^2 + c_{i33l} n_3^2 + (c_{i12l} + c_{i21l}) n_1 n_2 + (c_{i13l} + c_{i31l}) n_1 n_3 + (c_{i23l} + c_{i32l}) n_2 n_3 \quad (12)$$

Оскільки деревину розглядаємо як ортотропний матеріал, число незалежних компонент тензора модулів пружності зменшується із двадцять одного до дев'яти.

Таким чином тензор Кристофеля для деревини, як ортотропного матеріалу із врахуванням (12) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= c_{11} n_1^2 + c_{66} n_2^2 + c_{55} n_3^2, \Gamma_{22} = c_{66} n_1^2 + c_{22} n_2^2 + c_{44} n_3^2, \Gamma_{12} = (c_{12} + c_{66}) n_1 n_2, \\ \Gamma_{33} &= c_{55} n_1^2 + c_{44} n_2^2 + c_{33} n_3^2, \Gamma_{13} = (c_{13} + c_{55}) n_1 n_3, \Gamma_{23} = (c_{23} + c_{44}) n_2 n_3, \\ \Gamma_{21} &= \Gamma_{12}; \Gamma_{31} = \Gamma_{13}; \Gamma_{32} = \Gamma_{23}. \end{aligned} \quad (13)$$

Розглянемо систему рівнянь (10) у випадку поширення акустичної об'ємної хвилі вздовж осей симетрії деревини. Підставивши відповідні значення тензора Кристофеля із (13) отримуємо:

$$\begin{aligned} &(c_{11} n_1^2 + c_{66} n_2^2 + c_{55} n_3^2 - \rho v_\phi^2) \times (c_{66} n_1^2 + c_{22} n_2^2 + c_{44} n_3^2 - \rho v_\phi^2) \times \\ &(c_{55} n_1^2 + c_{44} n_2^2 + c_{33} n_3^2 - \rho v_\phi^2) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Із рівняння (14) слідує, що вздовж кожної осі симетрії в залежності від поляризації коливань можливо мати три типи акустичних хвиль, поздовжню і дві поперечні. Таким чином розглядаючи поширення акустичних хвиль вздовж осей симетрії деревини, можна визначити шість діагональних компонент тензора модулів пружності $c_{\alpha\alpha} = \rho v_\phi^2, \alpha = 1 \dots 6$. Недіагональні компоненти тензора модулів пружності можуть бути обчислені, за умови поширення акустичної хвилі у напрямку який не співпадає із осями симетрії [0].

Актуальною на даний час залишається задача поширення акустичних хвиль в деревині з врахуванням її в'язкопружних характеристик. Сиснезована математична модель поширення

акустичних хвиль з врахуванням експонентного виду ядра релаксації деревини.

Розв'язок рівняння руху (1) може бути представлений у вигляді:

$$u(x, \tau) = G(x, \tau) ** F(x, \tau) + \gamma^2 [\dot{G}(x, \tau) * \varphi(x) + G(x, \tau) * \psi(x)]; \quad (15)$$

$$\sigma(x, \tau) = G_\sigma(x, \tau) ** F(x, \tau) + \gamma^2 [\dot{G}_\sigma(x, \tau) * \varphi(x) + G_\sigma(x, \tau) * \psi(x)], \quad (16)$$

де: $G(x, \tau)$ – функція впливу для переміщення, $F(x, \tau)$ – масові сили, $G_\sigma(x, \tau)$ – функція впливу для напружень, φ та ψ – скалярний та векторний потенціал вектора переміщень u , γ – параметр відношення швидкостей поширення акустичних хвиль, * – згортка за часом.

Для знаходження цих функцій необхідно послідовно застосувати інтегральні перетворення Фур'є по просторовій координаті x (q – параметр перетворення), знаком “F” позначено перетворення Фур'є) та Лапласа за часом τ (s – параметр перетворення, знаком “L” позначено перетворення Лапласа).

Зворотні перетворення проводимо послідовно. Спочатку визначаємо оригінал функції впливу за Фур'є

$$G^L(x, s) = \frac{k(s)}{2s\gamma} e^{-\gamma|x|/k(s)}; \quad G_\sigma^L(x, s) = -\frac{\text{sign}(x)}{2\eta_\alpha} e^{-\gamma|x|/k(s)}. \quad (17)$$

де: $\text{sign}(x)$ – сигнатура x , η_α – параметр який залежить від коефіцієнтів Пуассона, $k(s)$ – функція у якій враховується ядро релаксації деревини.

Для зворотного перетворення Лапласа, насамперед, обчислюємо оригінал функції $\exp[-syk(s)]$, де $y = \gamma/x$.

Після ряду математичних операцій кінцевий результат можна представити у такому вигляді

$$G_\sigma^L(x, s) = -\frac{\text{sign}(x)}{2\eta_\alpha} e^{-syk(s)} = -\frac{\text{sign}(x)}{2\eta_\alpha} e^{-sy} f^L(y, s + \beta) \quad (18)$$

$$f^L(y, s) = f_1^L(y, s) f_2^L(y, s);$$

$$f_1^L(y, s) = e^{-syk_1(s-\beta)} = e^{-sy \sum_{m=1}^{m^*} a_m [s^L(s-\beta)]^m} = e^{-sy \sum_{m=1}^{m^*} a_m \left(\frac{A}{s}\right)^m} = e^{\sum_{m=1}^{m^*} -y a_m A^m s^{1-m}};$$

$$\text{де: } f_2^L(y, s) = e^{-syk_2(s-\beta)} e^{\beta y [k_1(s-\beta) + k_2(s-\beta)]} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{c_m(y)}{s^m} =$$

$$= \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j!} \left[\frac{-y(s-\beta)A^{m^*+1}}{s^{m^*+1}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_{m+m^*+1} \cdot A^m}{s^m} \right] \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left[\beta y \sum_{m=1}^{m^*} \frac{a_m A^m}{s^m} \right]^k,$$

Коефіцієнти $c_m(y)$ визначаються правилами дії над степеневими рядами, A, a, β – фізичні характеристики матеріалу.

$$G^L(x, s) = \frac{1}{2s\gamma} k(s) e^{-syk(s)} = \frac{1}{2s\gamma} e^{-sy} g^L(y, s + \beta) \quad (19)$$

$$g^L(y, s) = f_1^L(y, s)g_2^L(y, s); g_2^L(y, s) = k(s - \beta)e^{-syk_2(s-\beta)}e^{\beta y[k_1(s-\beta)+k_2(s-\beta)]} =$$

$$\text{де: } = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{d_m(y)}{s^m} = \left(1 + \sum_{m=1}^{m^*} \frac{a_m A^m}{s^m} + \frac{A^{m^*+1}}{s^{m^*+1}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_{m+m^*+1} \cdot A^m}{s^m} \right) \times$$

$$\times \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j!} \left[\frac{-y(s-\beta)A^{m^*+1}}{s^{m^*+1}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_{m+m^*+1} \cdot A^m}{s^m} \right] \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left[\beta y \sum_{m=1}^{m^*} \frac{a_m A^m}{s^m} \right]^k.$$

Коефіцієнти $d_m(y)$ визначаються правилами дії над степеневими рядами [1].

Розроблення експериментального обладнання. Для забезпечення проведення серії акустичних експериментальних досліджень у змінних кліматичних умовах спроектовано та розроблено експериментальну установку акустичних досліджень (рис.1) та лабораторну кліматичну камеру на кафедрі ОТіМТП НЛТУУкраїни (рис. 2).

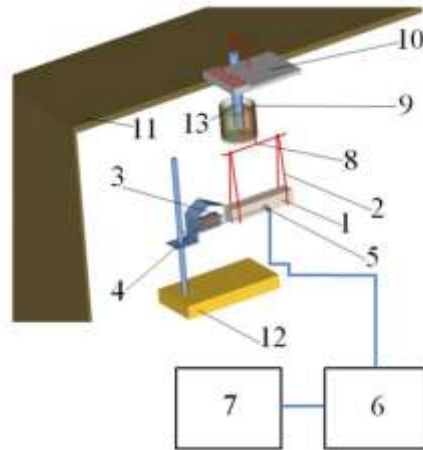


Рис. 1. Аксонометрична структурна схема експериментальної установки акустичних досліджень: 1 – зразок, що має форму паралелепіпеду; 2 – підвіска; 3 – маятниковий механізм; 4 – електромагніт; 5 – мікрофон; 6 – фільтр; 7 – частотомір; 8 – тяга масляного затвору для зважування взірців в кліматичній камері; 9 – ванночка із маслом; 10 – електронна вага; 11 – стінка кліматичної камери; 12 – опорна установка; 13 – трубка масляного затвору.

Основні показники кліматичної камери: габарити робочої зони 0,51*0,21*0,18 м; габарити камери 0,85*0,85*0,38 м; діапазон регулювання температури +10 ÷ +125⁰С; діапазон регулювання вологості 2 ÷ 98%. Для керування механізмами та системами камери використано двоканальний регулятор РД2 виробництва НПФ “РЕГМИК”, регулятор обладнаний інтерфейсом RS232/RS485/USB для зв’язку із ПК. Це дозволяє на ПК використовувати програмне забезпечення “Система сбора данных”, яке дає можливість

проводити зчитування, перегляд, запис інформації із приладу та давача вологи і температури; відображати інформацію в табличному або графічному вигляді; проводити оперативну зміну регулюючих параметрів приладу.

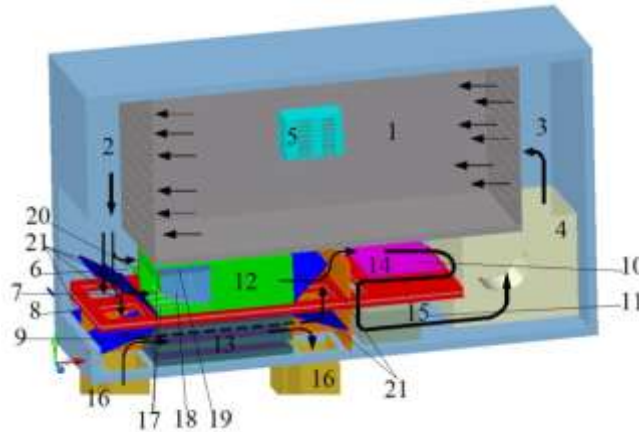


Рис. 2. Аксонометрична структурна схема робочої зони та каналів циркуляції потоку повітря кліматичної камери: 1 – робоча зона камери; 2, 3 – ємності вирівнювання тиску повітря із розсіювачами потоку; 4 – двохшвидкісний вентилятор; 5 – сигнальні роз’єми; 6 – прямий канал; 7 – канал зволоження; 8, 9 – два канали осушення; 10 – канал нагріву; 11 – канал охолодження; 12 – касета зволоження; 13 – касета висушування №1; 14 – нагрівальний елемент касети нагріву; 15 – алюмінієві радіатори встановленні на холодній стороні шести елементів Пельтьє; 16 – канали вузла регенерації силікагелю в касетах висушування; 17 – два ряди шпиць; 18 – полотно випарувача; 19 – накопичувальна ємність касети; 20 – одна з трьох зливних труб; 21 – дверцята для синхронного відкриття та закриття каналів.

Отримані методом вільних коливань дані швидкості проходження акустичних хвиль в діапазоні температур (від 18 до 60°C) та абсолютної вологості деревини (в межах 5 ÷ 90%) наведено на (рис.3). Доведена практична цінність розробленої методики проведення акустичних досліджень [2,3].

Швидкість поширення акустичних коливань (ШПАХ) (акустичний метод вільних коливань) визначалася за допомогою частоти і розміру зразка у відповідному напрямку:

$$C = 2 \cdot l \cdot f = 2 \cdot l \cdot (n / T) \quad (20)$$

де: C – швидкість поширення акустичних коливань; l – розмір зразка в напрямку поширення коливань; f – резонансна частота; n – число періодів на обраній ділянці часової діаграми; T – тривалість вибраної ділянки часової діаграми.

Здійснено метрологічне забезпечення проведених експериментальних досліджень. Відносна похибка визначення швидкості поширення коливань у формулі (20) може бути обчислена, як:

$$\partial C = \pm[\delta f + \partial l] = \pm[\Delta f / f + \Delta l / l] \quad (21)$$

де: ∂C – відносна похибка швидкості поширення коливань; ∂l – відносна похибка розміру зразка в напрямку поширення коливань; δf – відносна похибка визначення резонансної частоти; Δl – абсолютна похибка розміру зразка; Δf – абсолютна похибка визначення резонансної частоти.

Часові діаграми в експериментах які проводились досліджувалися цифровим осцилографом із частотою дискретизації 10 МГц, і звуковою картою комп'ютера з тактовою частотою 192 кГц.

Для звукової карти відносна похибка визначення резонансної частоти $\delta f = \{n/t\} = \partial n + \partial t = \Delta t / t = [(1/192000) / 0.032375] \cdot 100\% = 0.02\%$. Для прикладу, абсолютна похибка розміру досліджуваного зразка заміряного штангенциркулем становить 0,05 мм, що при розмірі зразка $l = 101$ мм, становить $\partial l = \Delta l / l = (0.00005 / 0.101) \cdot 100\% = 0.0495\%$.

Відносна похибка визначення ШПАХ знаходилась для кожного вимірювання за формулою (21), $\partial C = \pm 0.0695\%$. Абсолютна похибка ШПАХ досліджуваного зразка для значення 1234,79 м/с становить $\pm \Delta C = \pm C \cdot \partial C = \pm 1234.79 \cdot 0.0695\% = \pm 0.86 \text{ м/с}$, що є на порядок меншою від відомих досліджень.

Результати досліджень. Проведена статистична обробка результатів експериментальних досліджень дозволила отримати регресійну залежність третього порядку із коефіцієнтом множинної детермінації $R^2 = 0,9985$.

$$c = b_0 + b_1 \cdot W + b_2 \cdot W^2 + b_3 \cdot W^3 + b_4 \cdot T^3 + b_5 \cdot W \cdot T^3 + b_6 \cdot W^2 \cdot T^3 \quad (22)$$

де: $b_0 = 1303,52; b_1 = -12,04; b_2 = 0,1132; b_3 = -0,0004;$
 $b_4 = -0,0005; b_5 = 8,89E - 06; b_6 = -7,86E - 08;$

Слід відмітити, що проведене експериментальне дослідження дало змогу встановити залежність компонента тензора модулів пружності c_{55} від зміни температури та абсолютної вологості для деревини сосни. Таким чином, використовуючи встановлені закономірності зв'язку між швидкістю поширення акустичних хвиль і модулями пружності $c_{\alpha\beta}$, можна визначити інші компоненти тензора модулів пружності. Оскільки $c_{55} = G_{13}$ в подальшому будемо записувати G_{13} .

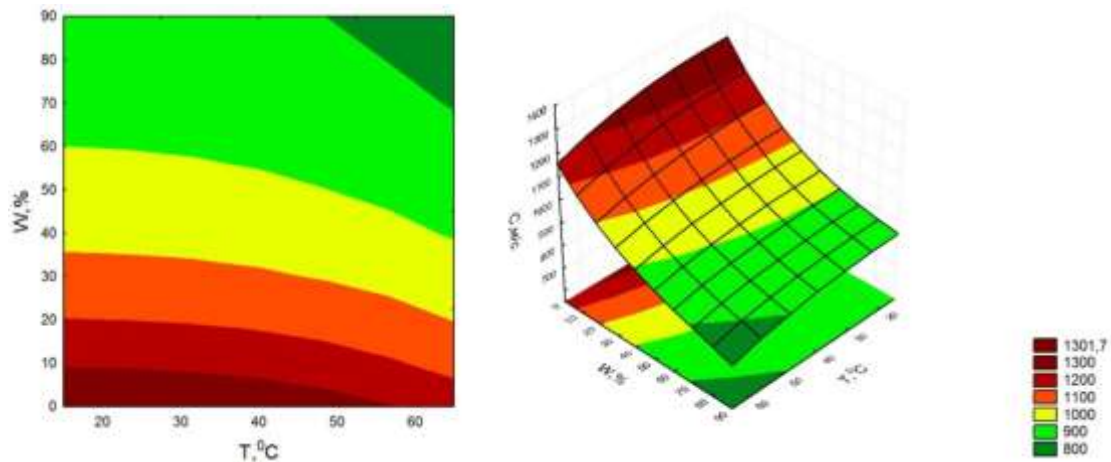


Рис. 3. Залежність ШПАХ(V_{LT}) від зміни температури та абсолютної вологості для деревини сосни (акустичний метод вільних коливань).

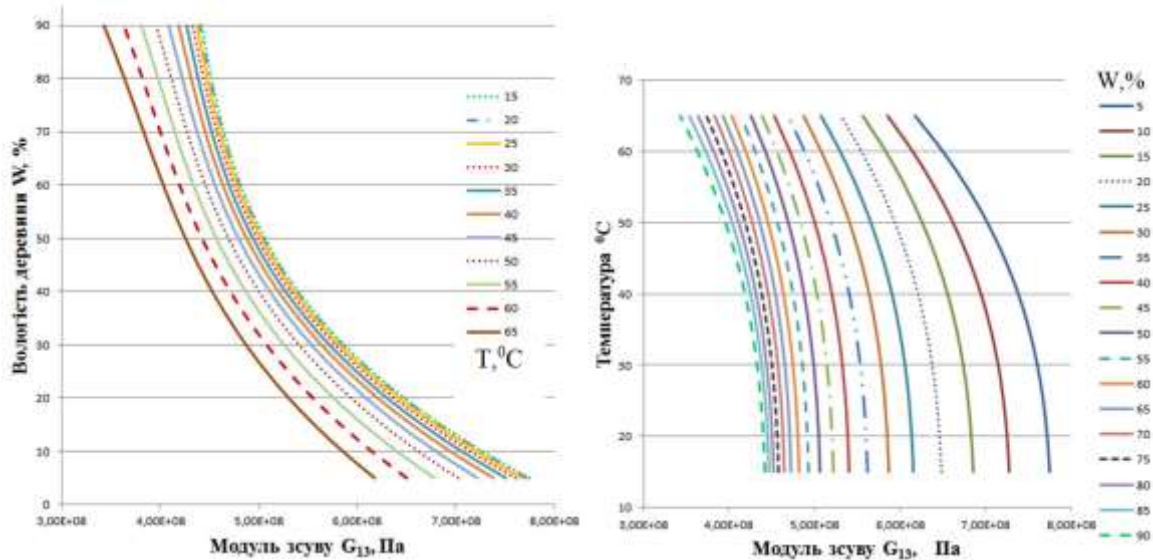


Рис. 4. Залежність модуля зсуву G_{13} від зміни температури та абсолютної вологості для деревини сосни.

Висновки

Математична модель поширення акустичної хвилі в деревині, як ортотропному пружному матеріалі дозволяє за допомогою вимірювання швидкості акустичних коливань визначати коефіцієнти тензора модулів пружності деревини з урахуванням змінних температурно-вологісних умов середовища. Для оцінки впливу в'язкопружних властивостей деревини на хвильовий процес розроблена нова математична модель поширення акустичної хвилі в деревині. Ядро релаксації деревини враховане в даній моделі у експонентному виді.

Спроекований та розроблений пристрій акустичних досліджень, забезпечує безконтактне визначення ШПАХ в деревині. Даний пристрій позбавлений відомих недоліків, зокрема, у ньому не

відбувається безпосереднього механічного контакту приладів збудження та прийому коливань зі зразком. В пристрої використовується в якості інформаційного параметру частота, яка не змінюється від зміни середовищ і, забезпечує похибку вимірювання ШПАХ у короткому зразку довжиною 10 см не більшу, за $\pm 1\text{м/с}$.

Розроблена методика для проведення акустичних експериментальних досліджень у деревині та алгоритми оброблення акустичних сигналів, які дозволяють за допомогою вимірювання фазової швидкості акустичних коливань в діапазоні від 100Гц до 3МГц визначати коефіцієнти тензора пружності деревини, як ортотропного тіла. Встановлені закономірності можна використати для вдосконалення технологічних процесів і операцій деревообробного виробництва та розроблення нових методів кваліметрії.

Спроектвана та розроблена камера забезпечила кліматичні умови в межах: діапазону температур $+10\div+125^{\circ}\text{C}$ і діапазону вологості $2\div98\%$. Конструкція камери та розроблені спеціалізовані модулі дозволяють проводити акустичні дослідження деревини та деревинних матеріалів в широкому діапазоні змін температури та вологості безпосередньо в робочій зоні камери не виймаючи зразки.

Досліджено вплив температурно-вологісного поля деревини на пружні характеристики визначені акустичним методом, зокрема:

– вологість в діапазоні від 0% до 90% має домінуючий вплив, виражений нелінійною залежністю, внаслідок дії як на твердий скелет деревини, так і на зміну масового навантаження твердого скелета, а також зміну деформівності всієї системи наповнення капілярів водою. Суттєвий вплив вологості спостерігається від абсолютно-сухого стану до точки насичення, і проявляється у зменшенні пружних характеристик, а вище зміна заповільнюється;

– вплив температури в діапазоні від 10°C до 70°C є також нелінійним та обумовлений зниженням механічних властивостей деревини. В діапазоні від 10°C до 45°C він є незначним, подальше збільшення температури призводить до більш стрімкого зменшення пружних характеристик.

На основі встановлених закономірностей між ШПАХ та механічними властивостями деревини, розроблено новий спосіб кваліметрії, зокрема акустичний спосіб сортування хвойних та листяних порід деревини конструкційного призначення прямокутного перерізу за міцністю згідно стандарту EN338.

Список літератури

1. Горшков А.Г. Волны в сплошных средах / А.Г. Горшков, А.Л. Медведский, Л.Н. Рабинский, Д.В.Тарлаковский. – М.: ФИЗМАЛИТ. – 2004. – 472 с.

2. Дьелесан Э. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Э.Дьелесан, Д. Руайе // Пер. с франц. Под. ред. В.В.Леманова. – М.: Наука. – 1982. – 424с.
3. Соколовский Я.И. Экспериментальное исследование влияния температуры и влажности на распространение акустических волн в древесине / Я.И. Соколовський, И.Р. Кенс, О.Л. Сторожук, В.М. Борисов // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. – Брянск: БГИТА. – 2011. – Вып.30. – С. 228–235.
4. Storozhyk O.L. Investigation of sound velocity in wood by non-contact method / Senior teacher O.L. Storozhyk; eng. V.M. Borysov; prof. Ya.I. Sokolovskyy; assoc. prof. I.R. Kens. // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість: міжв. наук.-техн. зб. – Львів: НЛТУУкраїни. – 2011. – Вип.37-2. – С. 84-90.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлены новые закономерности между скоростью распространения акустических волн и механическими свойствами древесины в широком диапазоне температур и влажности. Найденные закономерности могут быть использованы для усовершенствования технологических процессов и операций деревообрабатывающего производства, а также для разработки новых методов квалиметрии.

Древесина, тензор модулей упругости, анизотропия, температура, влажность, акустические методы, скорость распространения акустической волны.

Based on carry out theoretical and experimental researches, were found new regularities between a rate of spread of acoustic waves and strength properties of wood in changing circumstances of temperature and humidity that could be used for improvement of technological processes and operations of woodworking and also development new methods of qualimetry.

Wood, tensor of elastic moduluses, anisotropy, temperature, humidity, ultrasonic methods, velocity of distribution of ultrasonic wave.