

- скріплювач значно посилює міцність заднього вузла;
- значному збільшенню міцності заднього вузла сприяє з'єднання на подвійний рамковий шип, чого можна досягнути за рахунок потовщення царги додатковим брусом, або розширенням задньої ніжки;
- міцність заднього вузла можна збільшити за рахунок збільшення її ширини
- в цілому, або її частини з боку задньої ніжки;
- при конструюванні заднього вузла необхідно користуватись наведеними графічними залежностями (рис. 3-5).

Література

1. Михайлов В.Н. Столярно-механические производства. – М.-Л.: Гослесиздательство, 1947. – 568 с.
2. Гайда С.В. Рациональное конструирования виробів з деревини. – Львів: УкрДЛТУ. – 2001. – 93 с.
3. Гончаров Н.А., Башинский В.Ю., Буглай Б.М. Технология изделий из древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 523 с.

УДК 674.05:628.517

*Проф. Я.І. Соколовський, д-р. техн. наук;
В.О. Сафаров; асист. О.Л. Сторожук – НЛТУ України*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИНИ УЛЬТРАЗВУКОВИМ МЕТОДОМ

Проведено аналіз та наведено експериментальні результати впливу теплофізичних і пружних властивостей деревини на швидкість поширення ультразвукових хвиль із врахуванням анізотропії матеріалу.

Ключові слова: ультразвук, деревина, анізотропія, температура, вологість, пружність, неруйнівний контроль.

Prof. Ya.I. Sokolowsky; V.O. Safarov; assist. O.L. Storogyk – NUFWT of Ukraine

Research of Thermophysical and Resilient Properties of Wood by Ultrasonic Method

The analysis and experimental results of thermophysical influencing and resilient properties of wood is conducted on the ultrasonic waves distribution speed, taking into account anizotropy of material

Keywords: ultrasound, wood, anisotropy, temperature, humidity, resiliency, un-destructive control.

Актуальність досліджень. У сучасних методиках контролю фізико-механічних властивостей деревини у технологічних процесах одним з перспективних є ультразвуковий метод. Це зумовлено тим, що акустичні вимірювання, які базуються на визначенні швидкості або тривалості вимірювання поверхневих або об'ємних хвиль, належать до неруйнівних методів вимірювання параметрів технічного стану матеріалів, надійністю і швидкістю отримання інформації, можливістю повторного вимірювання та ефективністю контролю. Проте використання цього методу має базуватися на функціональних взаємозв'язках між результатами вимірювання тривалості та швидкості ультразвукових хвиль з теплофізичними і механічними характеристиками капілярно-пористих матеріалів. Тому виявлення і встановлення таких залеж-

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

Аналіз відомих результатів досліджень. Аналіз закономірностей зв'язку швидкості поширення ультразвукових хвиль (ШПУХ) з фізико-механічними характеристиками матеріалів наведено у багатьох роботах [1-4]. Переважна більшість теоретичних та експериментальних досліджень відображає зв'язок акустичних вимірювань з фізико-механічними властивостями конструктивних матеріалів [5-7], швидкостями газопотоків і тепломасоперенесення [8, 9]. Значно менший обсяг наукових досліджень виконано для встановлення та аналізу зв'язку між ШПУХ і фізико-механічними властивостями деревини та інших капілярно-пористих матеріалів із врахуванням зміни їх агрегатного стану, тобто у технологічних процесах їх оброблення чи виготовлення. Зокрема, у працях [8, 10, 11] наведено залежності між швидкістю поширення ультразвукових хвиль залежно від вологості. Встановлено, що істотний вплив вологості на ШПУХ спостерігається в області гігроскопічності матеріалу. Виявлено, що волога у деревині неоднозначно впливає на ШПУХ. З одного боку, це пов'язано з дією ультразвуку на поведінку в'язких (лігніни і геміцелюлози) і пружних (целюлози) елементів матеріалу, а з іншого, зі взаємодією цих елементів, зміною вологості в області гігроскопічності, що зумовлює зміну деформативності усїєї системи.

Вплив температури на швидкість поширення ультразвукової хвилі є достатньо складним. Залежно від міри температурного діапазону цей вплив проявляється по-різному. Загальною властивістю є зменшення швидкості поширення ультразвукової хвилі зі збільшенням температури [8, 9, 12]. На швидкість поширення ультразвукової хвилі також мають вплив геометричні розміри досліджуваного зразка [8, 13, 14].

Теоретичні засади дослідження. Використання імпульсного ультразвукового методу для визначення пружних параметрів деревини ґрунтується на властивостях поширення пружних хвиль малої амплітуди для малого часу дії вихідних імпульсів. Проходження ультразвукових хвиль у матеріалах із достатньо великим радіусом випромінювання порівняно з довжиною хвилі можна розглядати як поширення плоскої пружної хвилі. У цьому разі швидкість поширення цих хвиль буде залежати від пружних сталих деревини. У разі поширення пружних ультразвукових хвиль в ізотропному середовищі швидкість поширення поздовжньої і поперечної хвиль визначаються за допомогою двох сталих.

Для анізотропного матеріалу, до якого належить деревина, поширення пружних ультразвукових хвиль описується рівняннями руху [15,16]:

$$\begin{aligned}\rho C^2 \frac{du}{d\tau} &= (A_{11}l^2 + A_{66}m^2 + A_{55}n^2) \frac{du}{d\tau} + ml(A_{13} + A_{66}) \frac{dv}{d\tau} + nl(A_{13} + A_{55}) \frac{dw}{d\tau}; \\ \rho C^2 \frac{dv}{d\tau} &= ml(A_{12} + A_{66}) \frac{du}{d\tau} + (A_{11}l^2 + A_{22}m^2 + A_{44}n^2) \frac{dv}{d\tau} + nm(A_{23} + A_{44}) \frac{dw}{d\tau}; \\ \rho C^2 \frac{dw}{d\tau} &= nl(A_{12} + A_{55}) \frac{du}{d\tau} + nm(A_{23} + A_{44}) \frac{dv}{d\tau} + (A_{55}l^2 + A_{44}m^2 + A_{33}n^2) \frac{dw}{d\tau},\end{aligned}\quad (1)$$

де: C – швидкість поширення пружної плоскої хвилі; ρ – густина матеріалу; τ – час; l, m, n – напрямні косинуси нормалі до фронту хвилі; $\frac{du}{d\tau}, \frac{dv}{d\tau}, \frac{dw}{d\tau}$ – швидкості переміщення за осями x, y, z .

Швидкості поширення ультразвукових хвиль у напрямках анізотропії, які збігаються з головними осями пружної симетрії деревини, описуються залежностями [17]:

$$\begin{aligned} \bullet \quad C_l &= \sqrt{\frac{l - \mu_{ll}\mu_{ll}}{\Delta_3} \frac{E_l}{\rho}}; & C_r &= \sqrt{\frac{G_{lr}}{\rho}}; & C_t &= \sqrt{\frac{G_{tl}}{\rho}} \text{ вздовж волокон;} \\ \bullet \quad C_r &= \sqrt{\frac{l - \mu_{lr}\mu_{rl}}{\Delta_3} \frac{E_r}{\rho}}; & C_t &= \sqrt{\frac{G_{rt}}{\rho}}; & C_l &= \sqrt{\frac{G_{rl}}{\rho}} \text{ радіального напрямку;} \\ \bullet \quad C_t &= \sqrt{\frac{l - \mu_{tr}\mu_{tr}}{\Delta_3} \frac{E_t}{\rho}}; & C_r &= \sqrt{\frac{G_{tr}}{\rho}}; & C_l &= \sqrt{\frac{G_{tl}}{\rho}} \text{ тангентального напрямку;} \end{aligned} \quad (2)$$

де: μ_{ij}, E_i, G_{ij} – коефіцієнти Пуассона, модулі пружності і зсуву для деревини; Δ_3 – функція, яка залежить від μ_{ij}, E_i, G_{ij} .

У роботі отримано нелінійний зв'язок для визначення коефіцієнтів Пуассона деревини через величини швидкості поширення ультразвукових хвиль у напрямках анізотропії.

Рівняння (1) не піддається інтегруванню у загальному випадку. Дієвим підходом для розв'язання (1) в окремих випадках є метод Хельмгольца [18], в якому визначаються два хвильові потенціали, скалярна функція ϕ та векторна функція ψ , що описують поздовжні (l) та поперечні (r) хвилі.

Для опису процесу демпфування, в (1) враховуються в'язкопружні властивості матеріалу. Використовується стандартний підхід шляхом заміни пружних властивостей відповідними операторами за часом.

Зокрема, для двовимірного випадку компоненти напружень деревини через складові об'ємних хвиль виражаються залежностями [20]:

$$\begin{aligned} G_{ii} &= \left(c_l - \frac{2c_t^2}{c_l} N_2^2 \right) j\omega\rho A_L e^{i\varpi(N \cdot X / c_l - t)}; \\ G_{ij} &= \left(\frac{2c_t^2}{c_l} N_1 N_2 \right) j\omega\rho A_L e^{i\varpi(N \cdot X / c_l - t)}; \end{aligned} \quad (3)$$

де: C_l, C_t – швидкості поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль; A_L – амплітуда; ω – кутова швидкість; $j^2 = -1$, N_1, N_2 – компоненти вектора, що описують довжину зразка відносно вибраного напрямку.

Результати досліджень. Наведено результати експериментальних досліджень ШПУХ і модуля пружності у різних породах деревини, залежно від впливу структурної будови, геометричних розмірів, частоти перетворювачів, типу хвилі, вологості, температури матеріалу. Вибір взірців та матеріалів, опис експериментальної установки та методика проведення ультразвукових вимірювань наведено у [5].

Значення ШПУХ для напрямків головних осей симетрії деревини, а саме вздовж волокон l , в радіальному r і тангентальному t наведено у табл. 1. Найбільше значення величина ШПУХ сягає вздовж волокон деревини, а найменше – в тангентальному напрямі.

Встановлено, що у деревині величина швидкості поширення поверхневих ультразвукових хвиль є меншою від поздовжніх в $2.2 \div 2.4$ раза, в радіальному – раза 1.4, тангентальному – 1.7 раза.

Табл. 1. Порівняння значень ШПУХ у напрямках головних осей анізотронії деревини для $W=8\%$ і $T=20^\circ\text{C}$

Порода	C_{ol} , м/с	C_{or} , м/с	C_{ot} , м/с	$\frac{C_{ol}}{C_{or}}$	$\frac{C_{ol}}{C_{ot}}$	$\frac{C_{or}}{C_{ot}}$
Сосна	$5878^{\pm 36}$	$2003^{\pm 34}$	$1583^{\pm 32}$	2,9	3,68	1,27
Береза	$5584^{\pm 38}$	$1961^{\pm 25}$	$1265^{\pm 16}$	2,85	4,14	1,55
Бук	$5181^{\pm 35}$	$2091^{\pm 35}$	$1461^{\pm 23}$	2,49	3,56	1,44

Аналіз результатів досліджень свідчить про те, що швидкість поширення ультразвукових хвиль залежить від структурної будови деревини. Дослідження впливу ШПУХ, залежно від кута поширення відносно волокон абсолютно сухої деревини сосни, показано на рис. 1.



Рис. 1. Залежність ШППУХ від кута прозвучування деревини

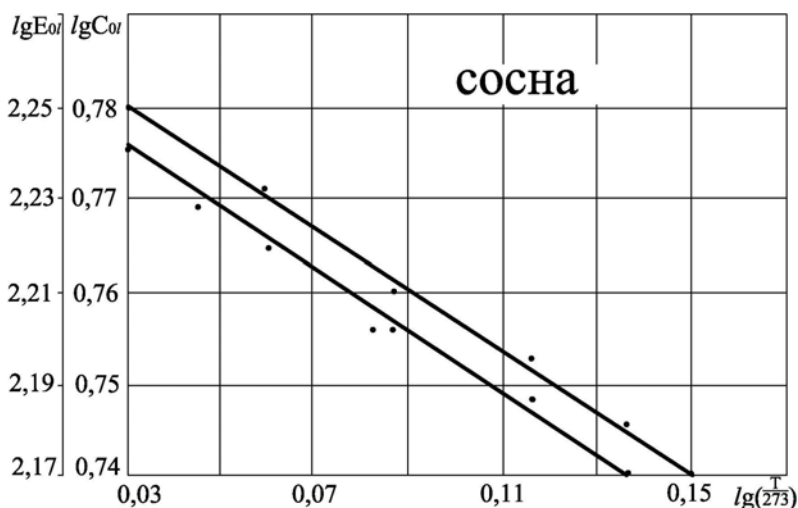


Рис. 2. Зміна ШПповУХ і модуля пружності деревини сосни від температури

Істотно впливає на швидкість поширення поверхневих ультразвукових хвиль (ШПповУХ) температура деревини. Збільшення температури деревини зменшує ШПповУХ у діапазоні температур $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характер залежності ШПповУХ і модуля динамічної пружності у сосні для досліджуваного діапазону зміни температури свідчить про наявність зменшення відповідних величин. Виявлені графічні залежності на рис. 2.

Необхідно зазначити, що зміна ШПповУХ з підвищенням температури для різних порід деревини є неоднаковою. Найбільше значення спостерігається у сосні, а потім у березі. Температурний коефіцієнт ШПповУХ на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ для сосни вздовж волокон становить приблизно $0,1\%$ цієї швидкості в абсолютно сухому стані.

Характер зміни швидкості поширення поздовжніх ультразвукових хвиль і швидкості поширення поверхневих ультразвукових хвиль від вологості деревини для різних порід в абсолютних значеннях наведено на рис. 3.

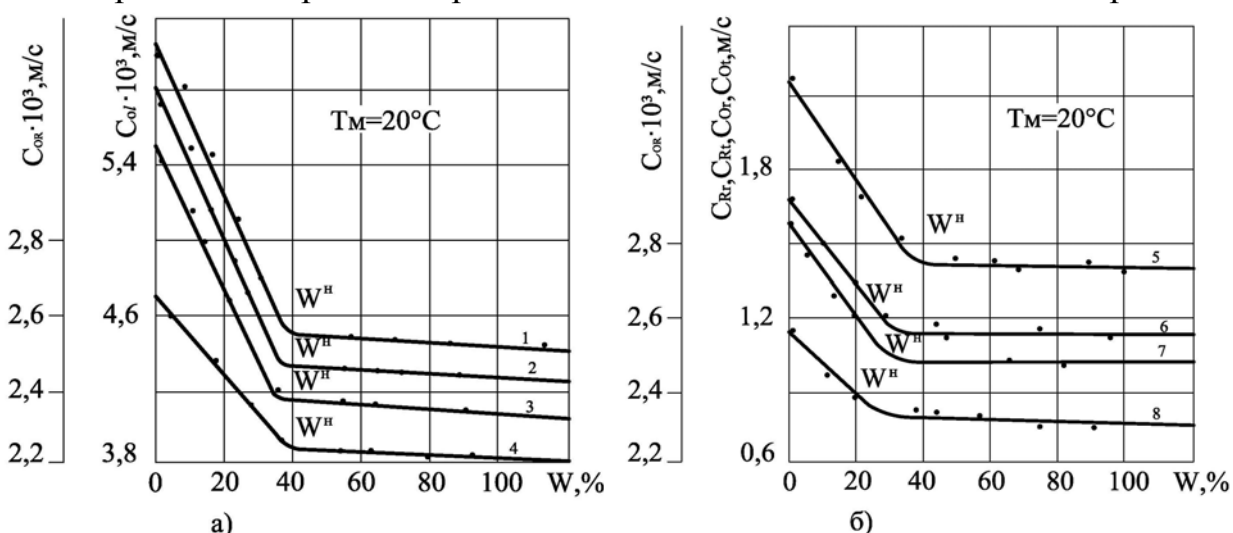


Рис. 3. Залежності ШПУХ від вологості деревини: а – 1,4 сосна; 2 – береза; 3 – бук; 1,2,3 – поздовжні хвилі вздовж волокон; 4 – поверхневі хвилі вздовж волокон; б – 5,6,7,8 – у радіальному і тангенціальному напрямках сосни; 5,6 – поздовжні хвилі; 7,8 – поверхневі хвилі

Для оброблення результатів експерименту використали метод теорії подібності [19], що дало змогу отримати залежність ШПУХ і динамічного модуля пружності E_D від температури і вологості деревини у критеріальній формі:

$$C = A(W)^{-n} \left(\frac{T_m}{273} \right)^{-m} \left(\frac{\rho_b}{\rho_y} \right)^{-k}; E_D = A(W)^{-n} \left(\frac{T_m}{273} \right)^{-m} \left(\frac{\rho_b}{\rho_y} \right)^{-k}; \quad (4)$$

де: A , n , m , k – константи; W – вологість деревини, %; T_m – середня температура деревини, К; ρ_y – умовна густина сосни ($\rho_y = 400\text{ кг/м}^3$); ρ_b – базисна густина деревини, кг/м^3 .

Для залежності ШПУХ від вологості деревини отримані співвідношення:

- сосна (повздовжні хвилі)

$$\begin{aligned}C_{ol} &= 8,106 \cdot W^{-0,146} \cdot 10^3; \\C_{or} &= 3,182 \cdot W^{-0,203} \cdot 10^3; \\C_{ot} &= 2,0 \cdot W^{-0,15} \cdot 10^3;\end{aligned}\tag{5}$$

- береза (повздожні хвилі)

$$\begin{aligned}C_{ol} &= 7,5 \cdot W^{-0,146} \cdot 10^3; \\C_{or} &= 3,195 \cdot W^{-0,203} \cdot 10^3; \\C_{ot} &= 1,76 \cdot W^{-0,15} \cdot 10^3;\end{aligned}\tag{6}$$

- бук (повздожні хвилі)

$$C_{ol} = 6,98 \cdot W^{-0,146} \cdot 10^3;\tag{7}$$

- сосна (поверхневі хвилі)

$$\begin{aligned}C_{noel} &= 3,12 \cdot W^{-0,104} \cdot 10^3, \\C_{novr} &= 1,72 \cdot W^{-0,104} \cdot 10^3, \\C_{noet} &= 1,184 \cdot W^{-0,104} \cdot 10^3.\end{aligned}\tag{8}$$

Зменшення ШПУХ (рис. 3) в інтервалі вологості від сухого стану до границі гігроскопічності W_{zz} і вище проходить з різною інтенсивністю. Вище W_{zz} ШПУХ вздовж волокон змінюється незначно, а в радіальному і тангентальному напрямках залишається постійною.

Відомо, що волога зв'язана з твердим скелетом деревини різними силами зв'язку, тому вона має різні ступені впливу на ШПУХ. Так, наприклад, волога у клітинних стінках (фізично зв'язана) збільшує жорсткість скелета в цілому, а це спричиняє збільшення ШПУХ. Волога у порожнинах кліток (вільна) має різний вплив залежно від ступеня насичення деревини і навантаження пружними хвилями. Це підтверджує, що ШПУХ має складну залежність від вологості деревини.

Як свідчать наведені вище результати, вологість деревини має істотний вплив на ШПУХ. Інтенсивна зміна ШПУХ спостерігається від абсолютно сухого стану деревини до границі гігроскопічності вздовж волокон деревини (W_{zz}). Для значень $W > W_{zz}$ наявна незначна зміна вологості. У радіальному і тангентальному напрямках анізотропії матеріалу для $W > W_{zz}$ вологість є майже постійною. Для всіх дослідних порід деревини характер кривих є ідентичним. Чим більшою є густина деревини, тим меншими є значення ШПУХ.

Оброблення результатів дослідження впливу вологості на механічні властивості деревини сосни дала змогу отримати залежності коефіцієнта Пуассона для напрямів анізотропії матеріалу

$$\mu_{lt} = 0,286 - 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot W;\tag{9}$$

$$\mu_{tl} = 0,3176 - 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot W;\tag{10}$$

$$\mu_{lr} = 0,028 - 0,42 \cdot 10^{-3} \cdot W;\tag{11}$$

$$\mu_{rl} = 0,3544 - 0,89 \cdot 10^{-3} \cdot W;\tag{12}$$

$$\mu_{tr} = 1,3426 - 0,2105 \cdot 10^{-3} \cdot W;\tag{13}$$

$$\mu_{rt} = 1,464 - 3,695 \cdot 10^{-2} \cdot W. \quad (14)$$

Для зіставлення швидкостей ультразвукових хвиль у стержні та у необмеженому об'ємі розраховано приведений коефіцієнт Пуассона μ_i [20]:

$$\mu_i = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{C_{ol}}{C_{Hi}} \right)^2 - 1 + \sqrt{ \left(1 - \left(\frac{C_{ol}}{C_{Hi}} \right)^2 \right) \cdot \left(9 - \left(\frac{C_{ol}}{C_{Hi}} \right)^2 \right) } \right], \quad (15)$$

$$\mu_i = \frac{1 - 2 \cdot \left(\frac{C_{Ri}}{C_{Hi}} \right)^2}{2 - 2 \cdot \left(\frac{C_{Ri}}{C_{Hi}} \right)^2}, \quad (16)$$

де: C_{ol}, C_{Hi} – швидкість поширення поздовжніх ультразвукових хвиль у стержні та в необмеженому об'ємі; C_{Ri} – швидкість поширення поверхневих ультразвукових хвиль у стержні; $i = l, r, t$.

Для практичного визначення μ_i побудовані графіки функціональної залежності μ_i від відношення швидкості $\frac{C_{Ri}}{C_{Hi}}$ і $\frac{C_{oi}}{C_{Hi}}$ (рис. 4).

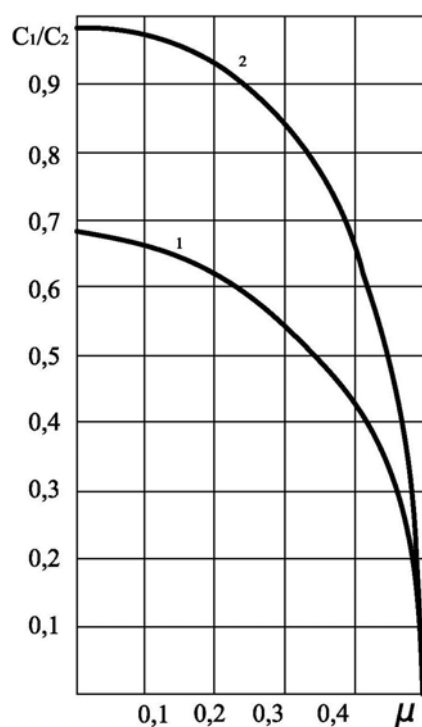


Рис. 4. Графік функціональної залежності μ_i від відношення швидкості

$$\frac{C_{Ri}}{C_{Hi}} \text{ (1) і } \frac{C_{oi}}{C_{Hi}} \text{ (2)}$$

Для дослідження впливу температурно-вологісного стану деревини на ШПУХ вибиралися взірці сосни у вигляді куба. На рис. 5 показано залежності між ШПповУХ (абсолютні значення) від вологості деревини сосни вздовж волокон, а також у радіальному напрямку для різних значень температури взірців 20 °С, 50 °С, 70 °С, 90 °С.

Для дослідження впливу температурно-вологісного стану деревини на ШПУХ вибиралися взірці сосни у вигляді куба. На рис. 5 показано залежності між ШПповУХ (абсолютні значення) від вологості деревини сосни вздовж

волокон, а також у радіальному напрямку для різних значень температури взірців 20 °С, 50 °С, 70 °С, 90 °С.

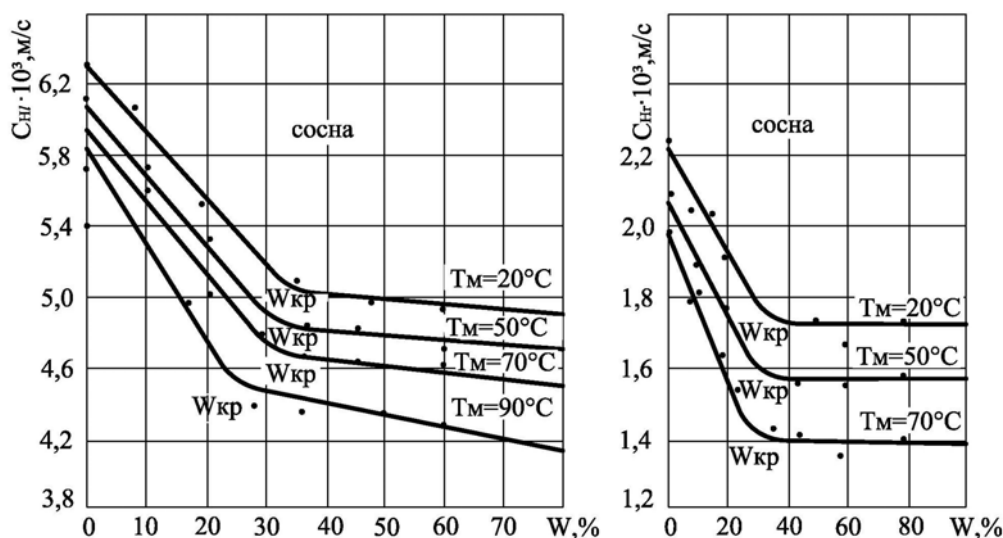


Рис. 5. Зміна ШПВУХ залежно від вологості і температури сосни (а – вздовж волокон; б – у радіальному напрямі)

Характер зміни ШПповУХ від вологості деревини є різним. Для значень вологості від абсолютно сухого стану до точки $W_{гг}$ інтенсивність зменшення ШПповУХ є найбільшою, оскільки для цього інтервалу зміни вологості є характерними структурні зміни (усихання, розбухання) у клітинних стінках деревини. Це спричиняє зменшення пружних властивостей деревини і величини ШПповУХ. Для значень вологості деревини, що є більшою за $W_{гг}$, спадання ШПповУХ є незначним вздовж волокон і залишається постійним у радіальному і тангентальному напрямках. Причиною цього є наявність великої кількості вільної води, яка незначно змінює жорсткість деревини. З іншого боку, вільна вода спричиняє виникнення тиску у заповнених порожнинах клітин і капілярах деревини. У разі, коли у порожнинах клітин є повністю відсутня газова фаза, то значно збільшується стиснення вільної води. Це обумовлює зменшення ШПповУХ, або її стабілізацію. Таким чином залежно від характеру зміни вологості і густини деревини як композитного середовища, наступні залежності ШПповУХ – збільшення, зменшення у деревині спричиняє сповільнення ШПповУХ. Причиною їх зменшення за даними [21, 22] є зниження міцності деревини. Можна стверджувати, що із підвищенням температури (від 20 до 100 °С) ШПповУХ зменшується у всьому діапазоні зміни температури. Зазначимо, що інтенсивність спадання залежить і від зміни вологості деревини.

Оброблення результатів дослідження впливу температурно-вологісного стану деревини на ШПВУХ залежно від її густини дає такі залежності:

$$C_{ol} = 8,67 \cdot W^{-0,146} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{-0,661} \cdot \left(\frac{\rho}{400}\right)^{-0,331} \cdot 10^3; \quad (17)$$

$$C_{or} = 3,35 \cdot W^{-0,203} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{-0,661} \cdot \left(\frac{\rho}{400}\right)^{-0,25} \cdot 10^3; \quad (18)$$

$$C_{ot} = 2,09 \cdot W^{-0,15} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{-0,661} \cdot \left(\frac{\rho}{400}\right)^{-0,474} \cdot 10^3. \quad (19)$$

На рис. 6 і рис. 7 показано вплив температурно-вологісного поля деревини на динамічний модуль пружності деревини сосни вздовж волокон, який пов'язаний із ШПУХ залежністю [6]. Збільшення температури матеріалу зумовлює зменшення динамічного модуля пружності. Характер такої залежності, як і залежності динамічного модуля пружності від вологості, є нелінійним.

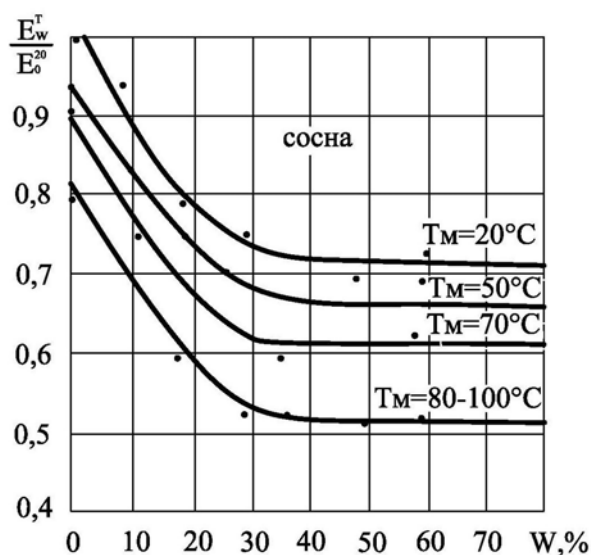


Рис. 6. Вплив вологості деревини сосни на відносне значення модуля пружності вздовж волокон

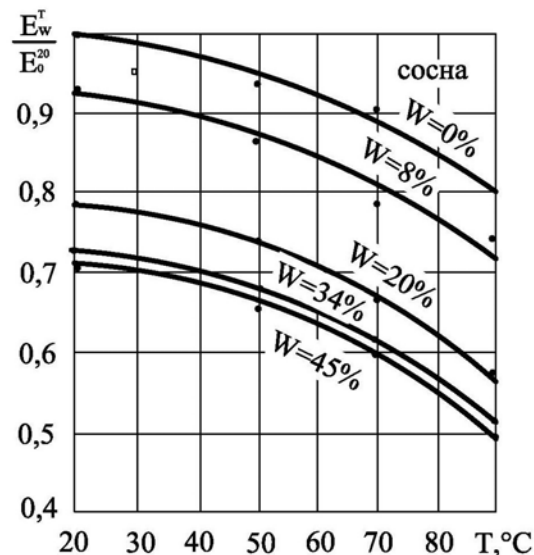


Рис. 7. Вплив температури деревини сосни на відносне значення модуля пружності вздовж волокон

Висновки. Таким чином, акустичні вимірювання деревини дають змогу оцінювати теплофізичні і механічні властивості деревини. Встановлено, що на зв'язок ШПУХ зі згаданими вище параметрами істотно впливає зміна вологості від сухого стану матеріалу до точки насичення, а також температура, напрям прозвучування, густина. Наведені дослідження показали доцільність використання ультразвукового методу для визначення і контролю фізико-механічних характеристик деревини зі змінними потенціалами тепломасоперенесення.

Література

1. Денис В.В., Ланса В.Х. Ультразвуковий контроль твердуючого бетону. – Л.: Из-во по строительству, 1971. – 131 с.
2. Ногин С.И., Сафаров В.А., Марьянчук П.Л. Контроль качества бетона. – К.: Будівельник, 1991. – 102 с.
3. Whitham G.B. Linear and Nonlinear Waves. New York: John Wiley and Sons, 1974.
4. Meseguer F. et al Rayleigh-Wave Attenuation by a Semi-Infinite Two-Dimensional Elastic-Band-Gap Crystal// Phys. Rev. B. 1999. V. 59, № 19. P. 12169-12172; Torres M.et.al. Sonic Band Gaps in Finite Elastic Media: Surface States and Localization Phenomena in Linear and Point Defects// Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82, № 15. P. 3054-3057.
5. Сафаров В.О., Соколовський Я.І. Дослідження вологості деревини ультразвуковим методом// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 1997, № 6 С. 210-215.
6. Соколовський Я.І., Сафаров В.О., Гнатишин Я.М. Спосіб неруйнівного контролю вологості деревини у процесі сушіння// Патенти України № 24346А, опубл. 17.07.98.
7. Сафаров В.О., Соколовський Я.І., Гнатишин Я.М., Поберейко Б.П. Спосіб неруйнівного вимірювання напружено-деформівного стану капілярно-пористих колоїдних матеріалів// Патенти України № 22071А, опубл. 30.04.98.

8. Голубов И.А. Методы неразрушающего контроля древесных плит. – М.: "Лесн. пром-сть". 1982. – 152 с.
9. Болдырев Г.И., Рукмане Я.Я., Штакельберг Д.И. Изменение физико-механического состояния керамических изделий в процессе сушки. – Рига.: Рижский политехнический институт, 1980. – 9-19 с.
10. Берзиньш Г.В., Зудов И.А., Эглайс И.Я. Определение динамических модулей сдвига пластифицированной древесины березы ультразвуковым методом. – М.: Труды института леса и древесины. Строение и физические свойства древесины. – 1962. – 36-39 с.
11. Берзон А.В. О механизме распространения продольных ультразвуковых волн во влажной древесине: Неразрушающие методы испытания строительных материалов и конструкций. – Рига.: Политехнический институт. – 1974, вып. 1. – 85-99 с.
12. Кошкин Н.И., Горбунов М.А., Дмитриева Н.А. Исследование акустических свойств полимеров импульсным методом: Применение ультраакустики к исследованию вещества. – М.: Наука. – 1964, вып. 20. – 47-52 с.
13. Дзенис В.В., Кадлечек В., Галан А., Догналек И. Вопросы геометрической дисперсии ультразвуковых волн в бетоне. – Рига.: Рижский политехнический институт, 1980. – 61-65 с.
14. Татаринцов А.М. Влияние толщины образца на скорость распространения изгибных волн ультразвука. – Рига.: Рижский политехнический институт, 1980. – 108-113 с.
15. Соколов П.В. Сушка Древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1968. – 354 с.
16. Уголев Б.Н. Испытание древесины и древесных материалов. – М.: Лесн. пром-сть. 1966. – 250 с.
17. Сергиенко Ю.К. Исследование ультразвукового метода обнаружения гнили в круглых лесоматериалах/ Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – М., 1968. – 179 с.
18. Царев С.П. Факторизация линейных дифференциальных операторов с частными производными и метод Дарбу интегрирования нелинейных уравнений с частными производными// Теор. и матем. физика. 2000. Т. 122, № 1. С. 144-160.
19. Білей П.В. Теоретичні основи теплового оброблення і сушіння деревини. – К: Вік, 2005. – 362 с.
20. Латищенко В.А. Діагностика жёсткости и прочности материалов. – Р.: Из-во "Зинатне". – 1998. – 205 с.
21. Леонтьев Н.Л. Влияние влажности на физико-механические свойства древесины. – М.: Гослесбумиздат. 1962. – 117 с.
22. Леонтьев Н.Л. Упругие деформации древесины. – М.: Гослесбумиздат. 1957. – 111 с.

УДК 330.133.7

*Проф. Д.Л. Дудюк, д-р техн. наук;
доц. Л.Д. Загвойська, канд. екон. наук – НЛТУ УКРАЇНИ*

ВІРТУАЛЬНІ ПАРИ – РЕАЛЬНЕ НАКЛАДАННЯ ВТРАТ РОБОЧОГО ЧАСУ

Розвивається новий метод оцінки накладання втрат робочого часу в системах послідовного агрегування. Метод віртуальних пар відображає реальну картину процесу накладання втрат робочого часу і дає змогу достовірно оцінити їх у складних системах різноманітного призначення.

Prof. D.L. Dudyuk; doc. L.D. Zahvoyska – NUFWT of Ukraine

Virtual pairs – realistic Estimation of Superposition of Working Time Losses

The new method of superposition of working time losses in tandem production systems is developed. Virtual pairs method represents real picture of superposition of working time losses process and gives the opportunity to estimate them in complex systems of various purpose.

Для достовірної оцінки ефективності виробничих систем необхідно визначити не тільки їх потенціальні можливості, але і неминучі втрати, що