

А. С. КОРОЛЕВ, канд. техн. наук

Е. С. ШАРАПОВ, д-р техн. наук, доц.

А. О. БЫКОВ

О. С. ЕГОШИН

Поволжский государственный технологический университет (Йошкар-Ола, Россия)

СРАВНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАЗНОЙ ЧАСТОТЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ

Аннотация

Проведена оценка точности определения плотности, предела прочности и модуля упругости древесины при статическом изгибе на основании скорости распространения ультразвуковых волн в зависимости от номинальной частоты ультразвукового преобразователя. Исследования проводились на стандартных образцах размером $20 \times 20 \times 300$ мм³, изготовленных из древесины сосны. Получены коэффициенты детерминации взаимосвязи скорости распространения ультразвуковых волн и динамического модуля упругости с величинами плотности, модуля упругости и предела прочности при статическом изгибе. Выявлено, что высокую сопряжённость с пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе имеет динамический модуль упругости. Установлено, что точность оценки механических характеристик древесины сосны велосиметрическим акустическим методом по динамическому модулю упругости не зависит от номинальной частоты применяемого ультразвукового преобразователя.

Ключевые слова: динамический модуль упругости; неразрушающий контроль; предел прочности при статическом изгибе; ультразвук; ультразвуковой преобразователь; частота ультразвукового сигнала.

Введение

В настоящее время широко внедряются методы неразрушающего контроля для определения качества, механических характеристик и поиска внутренних дефектов в различных материалах. Перспективным с точки зрения простоты использования и интерпретации полученных результатов является велосиметрический метод акустического неразрушающего контроля. Метод основан на анализе скорости прохождения ультразвуковых волн через объект контроля [1, 4]. Данный метод получил применение при контроле прочности, определении глубины раскрытия трещин, обнаружении пустот и других дефектов при проведении обследования зданий и сооружений, а также определении свойств материалов. Акустические методы также активно применяются для обследования растущих деревьев [7, 9] и определения механических характеристик древесины [2, 4]. Многие исследователи отмечают

высокую степень корреляции скорости распространения ультразвука и динамического модуля упругости с механическими свойствами древесины [2, 3, 4, 9]. На величину скорости распространения ультразвука в древесине оказывают значимое влияние такие факторы, как порода, влажность, направление волокон, наличие пороков [4, 8]. При этом на практическую применимость метода может оказывать влияние и номинальная частота используемых ультразвуковых преобразователей [2, 4, 5, 6, 8]. В связи с этим целью данной работы являлось определение влияния частоты ультразвукового преобразователя на точность определения плотности, предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе.

Материалы и методы

Для проведения исследования было изготовлено 176 образцов из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) размерами 20×20×300 мм. В соответствии с ГОСТ 16483.0-89 образцы кондиционировались при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 65 % до нормализованной влажности в климатической комнате. После кондиционирования осуществляли измерение плотности и влажности гравиметрическим методом согласно ГОСТ 16483.1-84 и ГОСТ 16483.7-71.

Скорость распространения ультразвукового сигнала определяли на основании времени его прохождения через образец вдоль волокон при известной величине расстояния между датчиками (рис. 1). Применялись ультразвуковые приборы Пульсар 2.2 (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) с номинальной частотой ультразвуковых преобразователей 60 кГц и Pundit PL-200 (Proceq SA, Шверценбах, Швейцария) с номинальной частотой преобразователей 24, 54, 150 кГц.

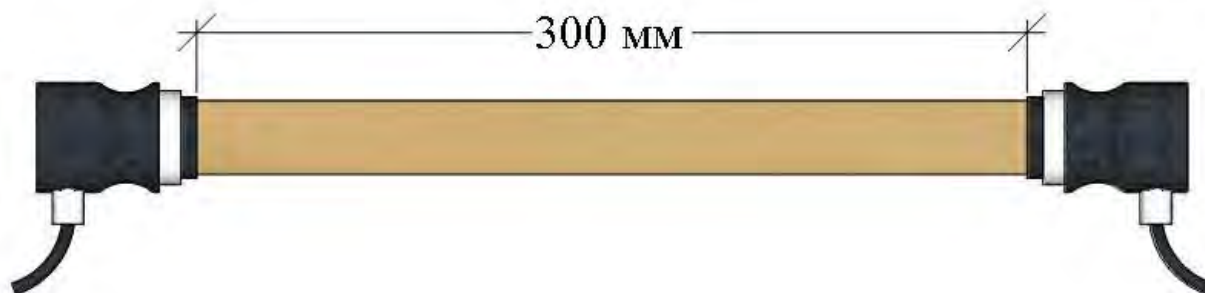


Рис. 1. Схема измерения скорости ультразвукового сигнала образцов размером 20×20×300 мм вдоль волокон

На основании полученных скоростей осуществляли расчет динамического модуля упругости без учета коэффициентов поперечной деформации [4] по формуле

$$E_{дин} = \rho_{12} \cdot V^2,$$

где $E_{дин}$ – динамический модуль упругости вдоль волокон (МПа); ρ_{12} – плотность при нормализованной влажности ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$); V – скорость ультразвукового сигнала ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$).

После измерения скорости, определяли предел прочности и модуль упругости при статическом изгибе образцов в соответствии с ГОСТ 16483.3-84

и ГОСТ 16483.9-73. Образцы испытывались на универсальной испытательной машине УТС-111.2-100-62 (ООО «Тестсистемы», Иваново, Россия).

Полученные результаты обрабатывались с использованием программного обеспечения Microsoft Excel (Microsoft Corp., Редмонд, Вашингтон, США) и SigmaPlot 14.0 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, Калифорния, США). Достоверность разности коэффициентов детерминации определяли как достоверность разности средних по критерию Стьюдента.

Результаты

Средняя влажность образцов после кондиционирования составляла 10.4 % ($S_x=0.75$, $CV=7.2$ %). Статистические показатели плотности, предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе, а также скорости распространения ультразвукового сигнала и динамические модули упругости вдоль волокон, полученные с применением ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты, представлены в таблице 1.

Табл. 1. Вариабельность оцениваемых параметров

Параметр	Значение статистических показателей оцениваемого параметра							Оценка однородности выборок
	$M \pm m$	X_{min}	X_{max}	S_x	CV	A_{cm}	E_{cm}	
ρ (кг·м ⁻³)	467.4 ± 3.0	393.6	548.1	40.00	8.5	1.19	-3.04	-
ζ_{stat} (МПа)	79.35 ± 0.76	50.3	101.9	10.00	12.7	-0.78	0.01	-
E_{stat} (МПа)	10354.3 ± 106.4	6827.4	13363	1412	13.6	-0.87	0.88	-
$V^{60кГц}$ (м·с ⁻¹)	5226.3 ± 16.8	4486.4	5615.0	223.84	4.3	-4.08	0.77	×
$V^{24кГц}$ (м·с ⁻¹)	5243.7 ± 18.9	4544.8	5714.3	251.41	4.8	-2.21	-1.06	×
$V^{54кГц}$ (м·с ⁻¹)	5247.1 ± 17.9	4507.5	5694.8	238.51	4.6	-3.51	0.62	×
$V^{150кГц}$ (м·с ⁻¹)	5341.8 ± 18.1	4559.6	5752.5	240.82	4.5	-3.58	0.35	×
$E_{дин}^{60кГц}$ (МПа)	12811.5 ± 127.8	8670.5	16438.2	1695.2	13.2	-0.42	-2.00	×
$E_{дин}^{24кГц}$ (МПа)	12921.0 ± 145.6	8764.2	16957.1	1931.8	14.9	0.64	-2.19	×
$E_{дин}^{54кГц}$ (МПа)	12894.3 ± 119.2	8897.6	16499.6	1581.5	12.2	-0.58	-1.89	×
$E_{дин}^{150кГц}$ (МПа)	13384.2 ± 135.2	8978.9	17480.9	1793.6	13.4	-0.20	-1.79	×

Результаты множественного сравнения средних значений выборок скорости и динамического модуля упругости по критерию Тьюки, полученных

с применением ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты, представлены в таблице 1, столбец «Оценка однородности выборок». В таблице $M \pm m$ – среднее значение параметра и его ошибки; X_{min} , X_{max} – минимальное и максимальное значения параметра; S_x – стандартное отклонение значений параметра; CV – коэффициент вариации; A_{cm} – стандартизованная асимметрия; E_{cm} – стандартизированный эксцесс

Для сравнения точности ультразвуковых преобразователей в таблице 2 приведены коэффициенты детерминации взаимосвязи скорости распространения ультразвуковых волн и динамического модуля упругости вдоль волокон древесины, измеренные при помощи преобразователей разной номинальной частоты, с плотностью, пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе.

Таблица 2. Коэффициенты детерминации взаимосвязи параметров

Параметр	$V^{60\text{кГц}}$ (м·с ⁻¹)	$V^{24\text{кГц}}$ (м·с ⁻¹)	$V^{54\text{кГц}}$ (м·с ⁻¹)	$V^{150\text{кГц}}$ (м·с ⁻¹)	$E_{дин}^{60\text{кГц}}$ (МПа)	$E_{дин}^{24\text{кГц}}$ (МПа)	$E_{дин}^{54\text{кГц}}$ (МПа)	$E_{дин}^{150\text{кГц}}$ (МПа)
ρ (кг·м ⁻³)	0.05	0.14	0.00	0.03	0.61	0.64	0.45	0.57
$\zeta_{стат}$ (МПа)	0.38	0.48	0.20	0.36	0.74	0.73	0.69	0.73
$E_{стат}$ (МПа)	0.59	0.68	0.36	0.55	0.91	0.88	0.88	0.90

Выявлено отсутствие корреляционной связи плотности древесины сосны со скоростью ультразвукового сигнала. Такой результат согласовывается с ранее полученными данными на образцах древесины и растущих деревьях [8, 7]. Заметная корреляционная связь ($R^2 = 0.55 - 0.68$) выявлена между скоростью распространения ультразвуковых волн, полученной с помощью преобразователей с номинальной частотой 24, 60 и 150 кГц, с модулем упругости при статическом изгибе и умеренная связь ($R^2 = 0.36 - 0.48$) с пределом прочности при статическом изгибе. Преобразователь номинальной частотой 54 кГц показал наименьшую степень взаимосвязи с пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе. Точность оценки предела прочности ($R^2 = 0.69 - 0.74$) и модуля упругости ($R^2 = 0.88 - 0.91$) при статическом изгибе по связи с динамическим модулем упругости, как оказалось, не зависит от номинальной частоты ультразвукового преобразователя и при этом имеет высокую взаимосвязь.

Заключение

Точность определения предела прочности и модуля упругости древесины сосны велосиметрическим акустическим методом по динамическому модулю упругости не зависит от номинальной частоты применяемого ультразвукового преобразователя. При оценке физико-механических характеристик древесины сосны по скорости распространения ультразвуковых волн наибольшую сопряженность с пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе показал преобразователь с номинальной частотой 24 кГц. Определение

механических свойств древесины по динамическому модулю упругости является более точным, так как данный параметр имеет сильную взаимосвязь с пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе. Подтверждено отсутствие взаимосвязи скорости распространения ультразвуковых волн с плотностью древесины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобылева, Ю. Н.** К вопросу об определении упругих параметров древесины ультразвуковым методом / Ю. Н. Бобылева, С. Л. Давыдов, Г. Г. Зарецкий-Феокистов // Известие вузов. Лесной журнал. – 1978, № 3. – С.156-159. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1978/№3–1978.pdf>
2. **Arriaga, F.** Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters / F. Arriaga, C. Osuna-Sequera, I. Bobadilla, M. Esteban // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 322. – P.126512.
3. **Baar, J.** Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods / J. Baar, J. Tippner, P. Rademacher // Maderas. Ciencia y tecnología. – 2015. – Vol. 17, № 2. – P.239-252. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>
4. **Bucur, V.** Acoustics of wood / V. Bucur. – Berlin. : Springer, 2006. – 393. P.URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/3-540-30594-7>
5. **Kang, H.** Variation of stress wave velocity with MC and temperature / H. Kang, R. E. Booker // Wood Science and Technology. – 2002. – Vol. 36. – P.41-54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-001-0129-x>
6. **Kloiber, M.** Comparative evaluation of acoustic techniques for detection of damages in historical wood / M. Kloiber, L. Reinprecht, J. Hrivnák, J. Tippner // Journal of Cultural Heritage. – 2016. – Vol. 20. – P.622-631.
7. **Sharapov, E.** Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) / E. Sharapov, Yu. Demakov, A. Korolev // Forests. – 2024. – Vol. 15. – P.233.
8. **Tippner, J.** Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods / J. Tippner, J. Hrivnák, M. Kloiber // BioResources. – 2016. – Vol. 11, № 1. –P.503-518. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.503-518>
9. **Wang, X.** Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique / X. Wang, R. J. Ross, M. McClellan, R. J. Barbour, J. R. Erickson, J. W. Forsman, G. D. McGinnis. – Res. Pap. FPL–RP–585. Madison, WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000. – 9 p.

Контакты:

korolevas@volgatech.net (Королев Александр Сергеевич);
sharapoves@volgatech.net (Шарапов Евгений Сергеевич);
anton_bykov02@mail.ru (Быков Антон Олегович);
kingman99@yandex.ru (Егошин Олег Сергеевич).