

УДК 630\*812: 539.3

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ

Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М., Шлычков С.В.

ФБГОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,  
Йошкар-Ола, e-mail: shlychkovsv@volgatech.net

В работе проанализировано современное состояние идентификации свойств древесины, подтверждена актуальность их диагностики в стадии подроста. Представлены экспериментальные исследования по определению физико-механических свойств древесины ультразвуковым, виброакустическим и статическим способами. В качестве критериев оценки использованы низшая собственная частота колебаний заземленного образца, скорость прохождения звуковой волны вдоль образца и стрела его прогиба. Определены точность, выявлены достоинства и недостатки рассматриваемых способов. Установлено, что виброакустический способ является наиболее приемлемым для диагностики упругих свойств деревьев в молодом возрасте. Этот способ позволяет в оперативном режиме получать результаты с наименьшей погрешностью и достаточным показателем точности. Для проверки экспериментальной методики построена конечно-элементная модель образца из древесины. Решена задача на собственные значения. Показано соответствие результатов расчета экспериментальным данным.

**Ключевые слова:** резонансная древесина, акустические свойства, конечный элемент, модуль упругости

## IDENTIFICATION OF THE ELASTIC PROPERTIES OF WOOD

Saldaeva E.Y., Tsvetkova E.M., Shlychkov S.V.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: shlychkovsv@volgatech.net

The analysis of State-of-the-art identification properties of wood, confirmed the relevance of their Diagnostics in the undergrowth. Presented experimental studies to determine the physical and mechanical properties of wood ultrasonic, vibroacoustic and static methods. The evaluation criteria used by the lowest eigenfrequency oscillations of pinched sample, velocity of the sound wave along the sample and its boom deflection. The accuracy of the identified strengths and weaknesses of the methods. The vibroacoustic method is most appropriate for the diagnosis of elastic properties of trees at a young age. This method enables online getting results with the lowest margin of error and a sufficient indicator of precision. To test an experimental methodology is finite-elemental model made of wood. The problem on your own values. Shows the results of the computation to the experimental data.

**Keywords:** resonant wood, acoustic properties, finite element, modulus of elasticity

Свойство древесины усиливать звук без искажения тона называется резонансной способностью [1]. В свою очередь древесина, которая обладает данной способностью, называется резонансной. Она используется, главным образом, в музыкальной промышленности: для изготовления дек музыкальных инструментов, внутренней отделки концертных залов и т.д.

В настоящее время приходится сталкиваться с проблемой нехватки древесины с уникальными резонансными свойствами. Этот материал является весьма дорогим: стоимость кубометра сертифицированной резонансной ели составляет 50–70 тыс. рублей. Более того, затруднено определение резонансных свойств среди растущих деревьев, что может привести к нерациональному и убыточному использованию и без того редкого сырья в качестве обычного сортамента. Ситуация также усугубляется отсутствием диагностики акустических свойств древесины как в зрелом возрасте к моменту рубки, так и молодняков. Поэтому имеется необходимость целевого выращивания резонансных деревьев и проведения диагностики их древесины еще в стадии подроста. Данная проблема решается на базе «Учебно-опытного лесхоза» и «Лаборато-

рии квалитметрии резонансной древесины» при кафедре стандартизации сертификации и товароведения ПГТУ.

Резонансные свойства характеризуются акустической константой  $K$  [7]

$$K = \sqrt{\frac{E_d}{\rho^3}}, \quad (1)$$

где  $E_d$  – динамический модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>.

Для того чтобы рассчитать акустическую константу, необходимо найти динамический модуль упругости и плотность древесины. Существующие стандартные методы нахождения модуля упругости [4, 5] не подходят для ранней неразрушающей диагностики дендроакустических свойств. Поэтому целью нашей работы являлся поиск оптимального неразрушающего способа определения дендроакустических свойств молодняков.

### Цели исследования

1. Выполнение экспериментальных исследований по определению акустических показателей древесины тремя способами: ультразвуковым, виброакустическим и статическим.

2. Обоснование достоверности результатов экспериментов данным численного анализа, полученных методом конечных элементов (МКЭ).

3. Провести статистическую обработку результатов исследований и оценить точность данных способов.

4. Анализ преимуществ и недостатков рассматриваемых способов. Выбор наиболее точного и эффективного способа.

Для экспериментальных исследований использовались образцы из древесины березы цилиндрической формы. Влажность образца в момент испытания составила 6,8%. Измерения проводились в соответствии со следующими стандартами:

- влажность древесины по ГОСТ 16483.7-71;
- плотность древесины по ГОСТ 16483.1-84;
- исследования на стандартном образце по ГОСТ 16483.0-89.

При диагностике упругих свойств образцов использован ультразвуковой метод, а также вибрационный (резонансный) и статический.

#### Ультразвуковой метод

Метод состоит в измерении времени прохождения звуковой волны  $t$  вдоль деревянного образца длиной  $l$  на приборе УК-14П и вычислении скорости прохождения звука  $c$ , посредством которой возможно определение динамического модуля упругости  $E_d$  вдоль волокон (2) и акустической константы  $K$  (3) [6, 7]. Результаты измерений и вычислений представлены в табл. 1.

$$E_d = c^2 \cdot \rho; \quad (2)$$

$$K = \frac{c}{\rho} = \frac{l}{t \cdot \rho}. \quad (3)$$

Таблица 1

Определение упругих свойств ультразвуковым способом

Номер образца	Время прохождения звуковой волны $t$ , мкс	Скорость звука $c$ , м/с	Модуль упругости $E_d$ , ГПа	Акустическая константа $K$ , м <sup>4</sup> /(кг·с)
1	17,5	5731	19,78	9,5
2	17,5	5731	19,78	9,5
3	17,4	5764	20,01	9,6
4	17,2	5831	20,48	9,7
5	17,6	5698	19,56	9,5
6	17,3	5797	20,24	9,6
7	17,4	5764	20,01	9,6
8	17,4	5764	20,01	9,6
9	17,5	5731	19,78	9,5
10	17,2	5831	20,48	9,7
Рабочая длина образцов $l = 100,3$ мм; диаметр $d = 2,96$ мм; плотность $\rho = 596,1$ кг/м <sup>3</sup>				

#### Виброакустический метод

Основан на выявлении собственной (резонансной) частоты образца  $f$  при пропускании через образец детерминированного звукового сигнала с повышающейся частотой и определении  $E_d$  с учетом его рабочей длины  $l$ , диаметра  $d$  и объемного веса  $\gamma$ , а также константы  $K$  по формуле (1) [3, 8].

$$E_d = \frac{A \cdot \gamma \cdot l^4 \cdot f^2}{3,1 \cdot I_z}, \quad (4)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения;  $\gamma$  – удельный вес;  $I_z$  – момент инерции поперечного сечения. Результаты представлены в табл. 2.

#### Численный анализ

С целью численной проверки достоверности экспериментальной методики по определению низшей собственной частоты образцов использована расчетная стержневая модель, построенная на базе метода конечных элементов (МКЭ) [6]. Древесина представляется на основе модели ортотропного тела. Для описания ее упругих свойств использованы данные из табл. 2, а также справочные физико-механические характеристики:  $G_{ar} = 1,095$  МПа,  $\mu_{ra} = 0,038$  [6]. Индекс « $a$ » соответствует направлению вдоль волокон древесины, индекс « $r$ » – радиальному направлению. Построенная дискретная модель из 10 конечных элемен-

тов (КЭ) представлена на рис. 1. Защемление стержня моделировалось запрещением линейных и угловых перемещений крайнего узла.

Используя КЭ построенную модель, решена задача динамики, которая описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$[M]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = 0. \quad (5)$$

Здесь  $[M]$ ,  $[K]$  – матрицы масс и жесткости конструкции;  $\{\dot{q}\}$ ,  $\{q\}$  – векторы обобщенных ускорений и перемещений соответственно. Порядок матриц равняется числу степеней свободы  $n = 35$ .



Рис. 1. Конечно-элементная модель

Для расчета низшей собственной частоты и формы колебаний использован метод итераций в подпространстве собственных векторов. Колебательные движения образца представляются суперпозицией низших собственных форм:

$$\{q(t)\} = [\Phi]\{Z(t)\}.$$

Здесь  $[\Phi] = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_5]$  – матрица, составленная из пяти низших собственных форм,  $\{Z(t)\}$  – главные или нормальные координаты. В этом случае уравнения (5), записанные в главных координатах, становятся разделяющимися относительно них и принимают вид:

$$\ddot{Z}_j + \omega_j^2 Z_j = 0. \quad (6)$$

Здесь  $\omega_j$  – круговая частота для  $j$ -й собственной формы. Для дискретизации образца используются трехузловые КЭ с 3 степенями свободы в узле. Задача решена с использованием моделей различной степени дискретизации. Во всех случаях получены одинаковые результаты, что означает достаточно высокую степень сходимости результатов МКЭ. Уже при дискретизации на 10 КЭ точность расчетов оказывается достаточно удовлетворительной. Программный комплекс позволил проанализировать результаты в графическом виде: построена низшая форма колебаний (рис. 2). Результаты расчета сведены в табл. 2.



Рис. 2. Первая форма колебаний образца

Таблица 2

Определение упругих свойств виброакустическим способом

Номер образца	Резонансная частота $f$ , Гц		Модуль упругости $E_d$ , ГПа	Акустическая константа $K$ , м <sup>4</sup> /(кг·с)
	Решение МКЭ	Эксперимент		
1	123	119	2,14	3,13
2	124	120	2,18	3,16
3	124	120	2,18	3,16
4	124	120	2,18	3,16
5	124	120	2,18	3,16
6	124	120	2,18	3,16
7	124	120	2,18	3,16
8	124	120	2,18	3,16
9	124	120	2,18	3,16
10	124	120	2,18	3,16

Рабочая длина образцов  $l = 80,2$  мм; плотность  $\rho = 602,1$  кг/м<sup>3</sup>

Анализ табличных данных показывает соответствие результатов расчета экспериментальным данным. Это означает правильность методики эксперимента. Вместе с тем видно, что величина модуля упругости оказывается существенно заниженной по сравнению с известными значениями [2]. Видимо, это связано с заниженным экспериментальным значением собственной частоты колебаний образца, что является следствием несовершенства технических элементов устройства [8]. Данная проблема может быть решена введением поправочного коэффициента при экспериментальном определении собственной частоты.

### Статический метод

Методика предполагает измерение максимальной стрелы прогиба  $v$  образца при его консольном креплении и последующем расчете модуля упругости и акустической константы (7), (8) [7]. Результаты измерений представлены в табл. 3.

$$E = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot v \cdot I_z}; \quad (7)$$

$$E_d \approx 0,908 \cdot E. \quad (8)$$

Здесь  $P$  – вес подвешиваемого на образец груза,  $H$ .

Таблица 3

Определение упругих свойств статическим способом

Номер образца	$m_{тр}, \text{г}$	$l, \text{мм}$	$v, \text{мм}$	$I_z, \text{мм}^4$	$E, \text{ГПа}$	$E_d, \text{ГПа}$	$K, \text{м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$
1	10,90	79,9	0,10	3,77	48,2	43,8	14,4
2	17,36	79,9	0,50	3,77	15,4	13,9	8,13
3	23,92	79,9	0,96	3,77	11,0	10,0	6,89
4	30,50	79,9	1,27	3,77	10,6	9,64	6,76
5	36,57	79,9	1,71	3,77	9,47	8,59	6,38
6	42,91	79,9	1,98	3,77	9,6	8,70	6,42
7	49,35	79,9	2,30	3,77	9,49	8,62	6,39
8	55,80	79,9	2,64	3,77	9,35	8,49	6,34
9	62,33	79,9	3,01	3,77	9,16	8,31	6,28
10	68,81	79,9	3,33	3,77	9,14	8,30	6,27

### Статистический анализ

По полученным данным был проведен статистический анализ: оценены погрешности измерений и точность способов. Значения акустической константы, найденные разными способами, весьма отличаются

друг от друга (табл. 4). Видно, что  $K$  при испытаниях ультразвуком наибольшая, виброакустическим способом – наименьшая. Также была проведена оценка погрешности каждого из способов и, соответственно, их точность. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Статистический анализ данных

Характеристики измерения акустической константы $K$	Ультразвуковой способ	Виброакустический способ	Статический способ
Расчетное значение, $\text{м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$	9,57	3,16	6,27
СКО, $\text{м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$	0,0893	0,0140	0,0998
Дисперсия, $\text{м}^8/(\text{кг}\cdot\text{с})^2$	0,000069	0,000196	0,009960
Показатель точности, %	0,29	0,14	0,50
Доверительная ошибка, $\text{м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$ , $P = 95\%$	0,053	0,032	0,2255
Относительная погрешность, %	0,6	1,0	3,5
Коэффициент корреляции	–0,2066		
Критерий Фишера, $P = 95\%$	2,84 < 3,21 – дисперсии однородны		

### Заключение

Итак, меньшей погрешностью и большей точностью обладает виброакустический способ измерения. Более грубые

ошибки получены при использовании способа статического изгиба. Проверена корреляция между ультразвуковым и виброакустическим способами. Сильной корреляционной связи между ними не

выявлено ( $r = -0,2066$ ). Между тем дисперсии выборок этих двух методов оказались однородными. На данном этапе исследований установлено, что наиболее приемлемым способом диагностики акустических свойств деревьев в молодом возрасте является виброакустический с использованием установки типа «Резонанс-4» [8], так как он дает быстрые результаты с небольшой доверительной ошибкой. Однако при этом для получения корректных результатов возникает необходимость введения поправочных коэффициентов. Вероятно, что существуют или могут быть разработаны иные способы идентификации, поэтому исследования в данном направлении целесообразно продолжать.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-01-97045 p\_поволжье\_a.*

### Список литературы

1. Алексеев И.А., Полубояринов О.И. Лесное товароведение с основами древесиноведения: учебное пособие. – Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2006. – 457 с.
2. Ашкенazi Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 247 с.
3. Баженов В.А. Динамический модуль упругости древесины как показатель ее физико-механических свойств // Труды института леса. – М.: Изд-во АН СССР. – 1953. – Т. 2. – 451 с.
4. ГОСТ 16483.9-73. Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе.
5. ГОСТ 16483.31-74. Древесина. Резонансный метод определения модулей упругости и сдвига и декремента колебаний.
6. Куликов Ю.А., Шлычков С.В. Механические колебания дек музыкальных инструментов: научное издание. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 188 с.
7. Федюков В.И. Ель резонансная: отбор на корню, выращивание, сертификация: научное издание. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – 204 с.
8. Федюков В.И., Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М. Ранняя диагностика технического качества подростка как важный

элемент интенсификации лесопользования в России// Лесной журнал. – 2012. – № 6. – С. 16–23.

### References

1. Alekseev I.A., Poluboyarinov O.I. Lesnoe tovarovedenie s osnovami drevesinovedeniya: uchebnoe posobie [A. Alexeev, Poluboyarinov O.I. Forestry Commodity with the basics of Wood Science: Textbook]. Joshkar-Ola, MarGTU, 2006. 457 p.
2. Ashkenazi E.K., Ganov Je.V. Anizotropiya konstrukcionnyh materialov [Ashkenazi E.K., E.V. Ganov The anisotropy of structural materials]. L. Mashinostroenie. 1980. 247p.
3. Bazhenov V.A. Dinamicheskij modul' uprugosti drevesiny kak pokazatel' ee fiziko-mehaničeskikh svoystv [Bazhenov V.A. Dynamic modulus of elasticity of wood as an indicator of its physical and mechanical properties]. Trudy instituta lesa [Proceedings of the Institute of Forest]. Moscow.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1953. Vol 2. 451 p.
4. GOST 16483.9-73. Wood. Methods for determining the modulus of elasticity in static bending (in Russian).
5. GOST 16483.31-74 Wood. The resonance method of determining the modulus of elasticity and shear and decrement (in Russian).
6. Kulikov Ju.A., Shlychkov S.V. Mehanicheskie kolebaniya dek muzykal'nyh instrumentov: Nauchnoe izdanie [Mechanical vibrations boards of musical instruments: Scientific Publication]. Joshkar-Ola, MarGTU, 2006. 188 p.
7. Fedjukov V.I. El' rezonansnaja: otbor na kornju, vyrashivanie, sertifikacija: nauchnoe izdanie [Spruce resonance: the selection on the vine, growing, certification: scientific publication]. Joshkar-Ola, MarGTU, 1998. 204 p.
8. Fedjukov V.I., Saldaeva E.Ju., Cvetkova E.M. Rannjaja diagnostika tehničeskogo kachestva podrosta kak vazhnyj jelement intensifikacii lesopol'zovanija v Rossii. [Early diagnosis of the technical quality of regrowth as an important element of the intensification of forest management in Russia]. Lesnoj zhurnal. [Forest Magazine]. 2012. no 6. pp. 16–23.

### Рецензенты:

Войтко П.Ф., д.т.н., профессор, декан лесопромышленного факультета, ФГБОУ ВПО ПГТУ, г. Йошкар-Ола;

Царев Е.М., д.т.н., профессор кафедры «Технология и оборудование лесопромышленных производств», ФГБОУ ВПО ПГТУ, г. Йошкар-Ола.

Работа поступила в редакцию 22.11.2013.