

УДК 630*812: 539.3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ОЦЕНКИ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ НА КОРНЮ

Салдаева Е.Ю., Анисимов Э.А., Цветкова Е.М.

ФБГОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,
Йошкар-Ола, e-mail: ekaterinadudina@mail.ru

Основным техническим показателем, характеризующим резонансные свойства древесины, является акустическая константа K , которая выражает резонансную способность материала через максимальную упругость при минимальной плотности. В работе представлен анализ стандартных способов определения показателей плотности, статического и динамического модуля упругости, необходимых для расчета акустической константы. Для такого материала, как древесина, обладающего свойством пластичности, особенно в раннем возрасте, характерно явление остаточной деформации. С целью исключения этого фактора следует рассчитывать акустическую константу через динамический модуль упругости. В работе предложено теоретическое описание способа определения акустической константы неразрушающим резонансным методом по собственной (резонансной) частоте поперечных колебаний образца при консольном креплении; предложена соответствующая схема проведения испытаний. По результатам экспериментальных исследований разработана математическая модель зависимости собственной (резонансной) частоты от таких факторов, как геометрические размеры образца, в частности диаметра и рабочей длины, а также усилия консольного зажима образца. В качестве постоянных факторов приняты порода и влажность древесины, масса колпачка для создания колебаний образца.

Ключевые слова: оценка качества, модуль упругости, резонансные пиломатериалы, подрост, оперативный контроль

A WAY TO ASSESS THE RESONANT PROPERTIES OF STANDING TIMBER AT AN EARLY AGE (THEORETICAL GROUNDING)

Saldaeva E.Y., Anisimov E.A., Tsvetkova E.M.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: ekaterinadudina@mail.ru

Acoustic constant (K) is the basic technical parameter, describing timber resonant properties. K shows timber resonant properties for maximum elasticity with the least density. An analysis of a common technique to determine the density index, static and dynamic module of elasticity, needed to determine the acoustic constant, is offered in the paper. Timber is an elastic material (particularly, at an early age) and such phenomenon as permanent residual deformation is typical for it. It is important to calculate the acoustic constant through the dynamic module of elasticity to exclude permanent residual deformation. A theoretical description of the way to determine an acoustic constant (K) by means of nondestructive resonance frequency method was offered in the paper. The method is supposed to use the natural (resonance) frequency of lateral oscillation of timber (sample) in single-sided support. A certain structural test pattern and a formula were elaborated. A mathematical model of the natural (resonance) frequency dependence on timber dimension (diameter and working length in particular) as well as stress of the console clam of timber was elaborated in accordance with the results of the experimental research. Constant figures are: species, wood moisture and weight of cap to provoke oscillations in timber (sample).

Keywords: quality assessment, elastic modulus, resonant wood, undergrowth, operational control

Известно, что основным техническим показателем, характеризующим резонансные свойства древесины, является акустическая константа K , предложенная акад. Н.Н. Андреевым, $\text{м}^4/(\text{кг} \cdot \text{с})$:

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

где $E_{\text{дин}}$ – динамический модуль упругости, Па; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Следовательно, для ее определения необходимо знать значение плотности и модуль упругости древесины.

Плотность является косвенным показателем (отношение массы к объему). Для из-

мерения плотности древесины существуют десятки методов, часть которых, включая стандартные и новейшие, подробно изложена в работе О.И. Полубояринова [1, 5]. Выбор того или иного метода связан в основном с производственными условиями и возможностями целевого отбора резонансного сырья (на корню, в круглых или пиленных лесоматериалах, заготовках и т.д.).

Наиболее практичным (производительным) для отбора резонансной древесины в круглых лесоматериалах, тем более на корню, является способ, основанный на определении плотности путем погружения образцов нестандартной формы и размеров в жидкость с дальнейшим выявлением

выталкивающей силы [5]; при этом отпадает необходимость не только в изготовлении стандартных образцов, но и не требуется их специальная калибровка в сушильных камерах.

Модуль упругости можно определить путем измерения упругих деформаций при статических испытаниях материала различными методами [4, 6].

В соответствии с ГОСТ 16483.9 можно определить статический модуль упругости через величину прогиба образца в форме прямоугольного бруска сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 300 мм [3]. Испытание проводят при действии изгибающего усилия перпендикулярно радиальной поверхности образца. Образец с закрепленным на нем прибором для измерения прогиба нагружают по схеме (рис. 1).

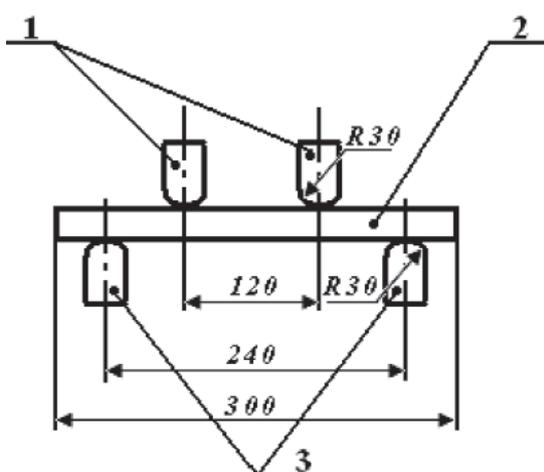


Рис. 1. Схема определения модуля упругости по ГОСТ 16483.9:

1 – нажимные ножи;
2 – образец для испытаний; 3 – опоры

Модуль упругости древесины при кондиционировании образцов (E_w) в МПа вычисляются по формуле

$$E = \frac{3pl^3}{64bh^3f}, \quad (2)$$

где l – расстояние между опорами; мм; p – нагрузка, равная разности между верхним и нижним пределами нагружения, Н; b – ширина образца, мм; h – высота образца, мм; f – прогиб образца в зоне чистого изгиба, равный разности между средними арифметическими результатами измерения прогиба при верхнем и нижнем пределах нагружения, мм. При этом может применяться многократная нагрузка и разгрузка.

Для такого материала, как древесина, обладающего свойством пластичности, особенно в раннем возрасте, характерно явление остаточной деформации.

С целью исключения данного фактора следует использовать динамический модуль упругости. В ряде случаев динамический модуль упругости определяется быстрее и проще, чем статический. К тому же использование динамического модуля упругости для характеристики упругих свойств дает больше возможности для исследования влияния различных факторов, в том числе влажности и температуры, поскольку образцы древесины при испытаниях не разрушаются, что дает возможность использовать их для других испытаний, подвергать многократному увлажнению и высушиванию.

Наиболее простым и удобным является определение динамического модуля упругости резонансным методом по собственной (резонансной) частоте образца. Данным методом исследовались образцы зрелой древесины стандартной формы и размеров, а также были проведены исследования на кервах. Но для изучения резонансных свойств древесины в раннем возрасте необходимо проводить испытания на боковых побегах. В связи с этим возникает необходимость расширить исследования резонансных свойств древесины, определив значение динамического модуля упругости древесины резонансным методом через собственную частоту образца [7].

Динамический модуль упругости образцов предлагается находить по частоте собственных изгибных или продольных колебаний.

Суть метода заключается в выявлении собственной (резонансной) частоты образца f при пропускании через образец детерминированного звукового сигнала с повышающейся частотой и определении E_w с учетом его рабочей длины l , диаметра d^d и объемного веса γ , а также константы K по формуле (1).

Структурная схема принципа работы метода представлена на рис. 2. Устройство представляет собой систему из электромагнитного вибратора (3), возбуждающего колебания исследуемого образца (5) с помощью «башмачка» (6) из мягкого железа и электромагнитного датчика (4), регистрирующего амплитуду и частоту колебаний образца. С выхода звуковой платы (2.2) гармонический сигнал по соединительному кабелю подается на вибратор (3). Сигнал с датчика поступает на вход звуковой платы компьютера (2.1).

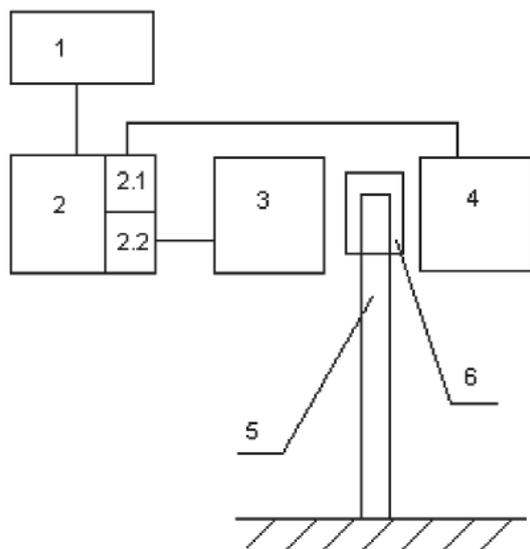


Рис. 2. Структурная схема метода:
 1 – монитор; 2 – компьютер, включающий:
 2.1 – вход звуковой платы, 2.2 – выход звуковой
 платы; 3 – вибратор типа ТК-67-Н;
 4 – датчик типа ТК67-Н; 5 – образец;
 6 – ферромагнитный «колпачок»

Динамический модуль упругости $E_{\text{дин}}$ (кг/см²) находится по следующей формуле:

$$E_{\text{дин}} = \frac{A \cdot \rho \cdot l^4 \cdot f^2}{305 \cdot J} \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

где A – площадь поперечного сечения, см²; ρ – плотность, г/см³; l – свободная длина стержня, см; f – частота колебаний, Гц; J – момент инерции поперечного сечения, см⁴.

$$A \cdot \rho \cdot L = m; \quad (4)$$

$$E_{\text{дин}} = \frac{m \cdot l^3 \cdot f^2}{305 \cdot J} \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

Принимая во внимание, что теоретические основы колебаний упругих тел применялись к древесине, материалу анизотропному и неоднородному, возможность использования уравнения (15) потребовала детальной проверки. В частности, необходимо было установить степень влияния различных факторов, определить соотношение между статическими и динамиче-

скими модулями упругости. Исследования ученых доказали адекватность и практическую применимость формулы (4), а также отсутствие значимой разницы между статическим и динамическим модулями упругости у древесины ели [4, 8].

Для получения более точных, близких к истинному значению, показателей резонансной частоты и динамического модуля упругости древесины на примере образцов с консольным типом крепления нужно учесть влияние массы колпачка, который устанавливается на свободный конец образца для создания колебаний исследуемого черенка. С учетом этих дополнений истинная резонансная частота будет определяться по формуле

$$f_{\text{ист}} = f_{\text{рез}} \cdot (1 + \Delta m/m), \quad (6)$$

где Δm – масса «башмачка», кг; m – масса рабочей части образца, кг.

Таким образом, более достоверное, истинное значение динамического модуля упругости образца круглого сечения будет определяться по следующей расчетной формуле:

$$E_{\text{дин}} = \frac{64\pi \cdot 2 \ell 4 \rho f_{\text{ист}}^2}{a_0 4 d^2} \quad (\text{Н/М}^2), \quad (7)$$

где d – средний диаметр образца, м.

Момент инерции сечения образца с колпачком $J_{\text{сеч}}$ (см⁴) вычислим по формуле

$$J_{\text{сеч}} = J_{\text{к}} + J_{\text{обр}} = m_{\text{к}} \cdot l'^2 + \frac{m_{\text{обр}} \cdot l^2}{3}, \quad (8)$$

где $J_{\text{к}}$ – момент инерции сечения колпачка, см⁴; $J_{\text{обр}}$ – момент инерции сечения образца, см⁴; l' – длина колпачка, см.

Объединяем формулы (4) и (5) и выразим $E_{\text{дин}}$ (кг/см²) по формуле

$$E_{\text{дин}} = \frac{m \cdot l^3 \cdot f^2}{305 \cdot \left(m_{\text{к}} \cdot l'^2 + \frac{m_{\text{обр}} \cdot l^2}{3} \right)} \cdot 10^{-3}. \quad (9)$$

Осуществим перевод единиц измерения $E_{\text{дин}}$, находимого по формуле (6), из кг/см² в Па

$$E_{\text{дин}} = \frac{m \cdot l^3 \cdot f^2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{11}}{305 \cdot \left(m_{\text{к}} \cdot l'^2 + \frac{m_{\text{обр}} \cdot l^2}{3} \right)} = \frac{m \cdot l^3 \cdot f^2 \cdot 10^8}{305 \cdot \left(m_{\text{к}} \cdot l'^2 + \frac{m_{\text{обр}} \cdot l^2}{3} \right)} \approx 0,328 \cdot \frac{m \cdot l^3 \cdot f^2}{m_{\text{к}} \cdot l'^2 + \frac{m_{\text{обр}} \cdot l^2}{3}} \cdot 10^6. \quad (10)$$

Модуль упругости образцов с влажностью, отличающейся от 12% более чем на 1%, в пределах от 8 до 20%, пересчитываем к влажности 12% с точностью до 25 МПа по формуле

$$E_{12} = \frac{E_w}{1 - 1 \cdot 10^{-2}(W - 12)}, \quad (11)$$

где $1 \cdot 10^{-2}$ – поправочный коэффициент на влажность для всех пород древесины; W – влажность образцов в момент испытания, %.

Модуль упругости образцов с влажностью, равной или больше предела насыщения клеточных стенок, пересчитываем к влажности 12% с точностью до 25 МПа по формуле

$$E_{12} = E_w \cdot K_{15}^{30}, \quad (12)$$

где K_{15}^{30} – пересчетный коэффициент при влажности 30%, равный 1,25 для хвойных пород.

Находим акустическую константу K ($\text{м}^4/(\text{кг} \cdot \text{с})$) из формул (1) и (10):

$$K = \sqrt{0,328 \frac{m \cdot l^3 \cdot f^2}{\rho^3 \cdot \left(m_k \cdot l^2 + \frac{m \cdot l^2}{3} \right)}} \cdot 10^6. \quad (13)$$

При детальном изучении процесса определения резонансной частоты требуется получить максимально точное описание зависимости отклика от варьируемых параметров. В таком случае наи-

более целесообразно построение уравнения регрессии с использованием планов второго порядка. Этим целям удовлетворяет В-план.

Переменными факторами плана являются: x_1 – рабочая длина образца $l_{\text{раб}}$; x_2 – диаметр образца d ; x_3 – усилие зажима образца в устройстве, p . Пределы варьирования факторов и полученные экспериментальные результаты приведены в таблице.

За постоянные факторы приняты: порода и влажность древесины, масса колпачка.

Выходной параметр Y – собственная (резонансная) частота образца, являющаяся функцией от переменных факторов

$$Y = f(x_1, x_2, x_3). \quad (14)$$

Была получена регрессионная модель в виде следующего уравнения:

$$Y = 333,57 - 256,8 x_1 + 311,7 x_2 + 2,2 x_3 + 111,56 x_1^2 + 20,06 x_2^2 + 4,44 x_3^2 - 188,5 x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3. \quad (15)$$

Данное уравнение регрессии характеризует зависимость собственной (резонансной) частоты древесины $f_{\text{рез}}$ при поперечном колебании от диаметра образца, рабочей длины и усилия зажима. Анализ математической модели показал, что все предложенные коэффициенты регрессионного уравнения значимы и модель пригодна к применению, т.к. адекватно описывает реальный процесс.

Результаты экспериментальных исследований при варьировании переменных факторов

№ п/п	Переменные факторы			Резонансная частота $f_{\text{рез}}$, Гц
	$l_{\text{раб}}$, м	d , м	p , Нм	
1	0,3	0,02	0,6	201
2	0,7	0,02	0,6	61
3	0,3	0,06	0,6	1237
4	0,7	0,06	0,6	328
5	0,3	0,02	1,4	212
6	0,7	0,02	1,4	61
7	0,3	0,06	1,4	1237
8	0,7	0,06	1,4	347
9	0,3	0,04	1	684
10	0,7	0,04	1	206
11	0,5	0,02	1	102
12	0,5	0,06	1	605
13	0,5	0,04	0,6	333
14	0,5	0,04	1,4	325

Список литературы

1. ГОСТ 16483.1-84 Древесина. Метод определения плотности. – Взамен ГОСТ 16483.1-73. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 6 с.
2. ГОСТ 16483.31-74. Древесина. Резонансный метод определения модулей упругости сдвига и декремента колебаний. – Взамен ГОСТ 15890-70. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 7 с.
3. ГОСТ 16483.9-73 Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе. – Взамен ГОСТ 16483.9-72 – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 5 с.
4. Определение прочности древесины на опытах с изгибающей вибрацией. Off-axis Young's modulus and off-axis shear modulus of wood measured by flexural vibration tests. Yoshihara H., *Holzforschung*. – 2012. – № 2. – С. 207–213.
5. Полубояринов О.И. Плотность древесины. – М.: Лесн. пром-ть, 1976. – 159 с.
6. Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М. Предварительное диагностирование прочностных свойств древесины по показателю динамического модуля упругости вибрационным способом // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 2. – С. 55–63.
7. Федюков В.И., Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М. Стандартизация резонансной древесины: необходимо совершенствование // Стандарты и качество. – 2014. – № 4. – С. 54–57.
8. Федюков В.И., Салдаева Е.Ю. Резонансная ель для реконструкции Большого театра // Лесное хозяйство – 2011. – № 2. – С. 13–14

Reference

1. GOST 16483.1-84 Drevesina. Metod opredelenija plotnosti. Vzamen GOST 16483.1-73. M.: Izd-vo standartov, 1984. 6 p.

2. GOST 16483.31-74. Drevesina. Rezonansnyj metod opredelenija modulej uprugosti sdviga i dekrementa kolebanij. Vzamen GOST 15890-70. M.: Izd-vo standartov, 1974. 7 p.

3. GOST 16483.9-73 Drevesina Metody opredelenija modulja uprugosti pri staticheskom izgibe. Vzamen GOST 16483.9-72 M.: Izd-vo standartov, 1974. 5 p.

4. Opredelenie prochnosti drevesiny na opytah s izgibajushhej vibraciej. Off-axis Young's modulus and off-axis shear modulus of wood measured by flexural vibration tests. Yoshihara H, *Holzforschung*. 2012.66, no. 2. pp. 207–213.

5. Polubojarinov O.I. Plotnost' drevesiny. M.: Lesn. prom-t', 1976. 159 p.

6. Saldaeva E.Ju., Cvetkova E.M. Predvaritel'noe diagnostirovanie prochnostnyh svojstv drevesiny po pokazatelju dinamicheskogo modulja uprugosti vibracionnym sposobom // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie. 2014. no. 2. pp. 55–63.

7. Fedjukov V.I., Saldaeva E.Ju., Cvetkova E.M. Standartizacija rezonansnoj drevesiny: neobhodimo sovershenstvovanie // Standarty i kachestvo. 2014. no. 4. pp. 54–57.

8. Fedjukov V.I., Saldaeva E.Ju. Rezonansnaja el' dlja rekonstrukcii Bol'shogo teatra // Lesnoe hozjajstvo 2011. no. 2. pp. 13–14.

Рецензенты:

Торопов А.С., д.т.н., профессор кафедры деревообрабатывающих производств лесопромышленного факультета, ФГБОУ ВПО ПГТУ, г. Йошкар-Ола;

Федюков В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Стандартизация, сертификация, товароведение», ФГБОУ ВПО ПГТУ, г. Йошкар-Ола.

Работа поступила в редакцию 16.02.2015.