

Научная статья

УДК 620.179, 691.113, 539.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-145-156

## Анизотропия и диссипативные свойства древесины

**С.В. Шлычков, канд. техн. наук, доц.;** ResearcherID: [PAV-3393-2025](https://orcid.org/0009-0001-0892-0245),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0892-0245>

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия;

[shlychkovsv@volgatech.net](mailto:shlychkovsv@volgatech.net)

---

*Поступила в редакцию 22.01.26 / Одобрена после рецензирования 24.03.26 / Принята к печати 27.03.26*

---

**Аннотация.** Математические модели, описывающие рассеяние энергии при колебаниях конструкций из изотропных материалов, являются приближенными и эмпирическими. В тех случаях, когда колебания совершает анизотропное тело, содержащее неоднородности, проблема корректного описания диссипации энергии колебаний встает еще более остро. Настоящая работа посвящена расчетно-экспериментальному исследованию диссипативных свойств древесины. В большинстве случаев для древесины эти свойства определяются только одним параметром – декрементом механических колебаний. Для точного моделирования динамического поведения конструкций из древесины этого недостаточно. Известно, что декремент механических колебаний не постоянен в частотном диапазоне и зависит от ориентации волокон древесины относительно направления вынуждающей силы. Эти особенности необходимо учитывать при построении адекватных математических моделей деревянных конструкций. Следовательно, разработка новых методик и выявление основных закономерностей диссипации энергии как по объему тела, так и для различных областей частотного диапазона представляются актуальными. Применен оригинальный экспериментальный метод оценки упругих и диссипативных свойств для образцов из древесины ели и березы. Для них определены модули упругости и декременты механических колебаний. Исследовано влияние анизотропии, масштабного фактора на эти параметры. Обнаружена взаимосвязь между упругими и диссипативными свойствами древесины. Установлено, что с увеличением модуля упругости в продольном направлении образца его диссипативные свойства снижаются: уменьшается логарифмический декремент колебаний. Сформулирована гипотеза о связи между упругими и диссипативными характеристиками древесины. В этом случае корректное описание характеристик рассеяния энергии для какой-либо породы древесины должно содержать не 1 константу демпфирования, а 9 – количество упругих постоянных у ортотропного тела. Адекватность полученных результатов проверена при помощи конечно-элементной модели образца из древесины. Расчетные соотношения для древесины сформулированы на основании модели ортотропного тела. Деформации сдвига учтены с помощью гипотезы С.П. Тимошенко. Результаты численных исследований подтверждаются хорошим соответствием данным натурных экспериментов.

**Ключевые слова:** собственная частота, модуль упругости, конечный элемент, логарифмический декремент колебаний, диссипативные свойства, свойства древесины

**Для цитирования:** Шлычков С.В. Анизотропия и диссипативные свойства древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 145–156.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-145-156>



Original article

## Anisotropy and Dissipative Properties of Wood

**Sergey V. Shlychkov**, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [PAV-3393-2025](https://orcid.org/0009-0001-0892-0245),  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0892-0245>

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia; shlychkovsv@volgatech.net

*Received on January 22, 2026 / Approved after reviewing on March 24, 2026 / Accepted on March 27, 2026*

**Abstract.** Mathematical models describing energy dissipation during oscillations of structures made of isotropic materials are approximate and empirical. The issue of accurately describing the energy dissipation of oscillations becomes even more acute when the oscillations occur in an anisotropic body containing inhomogeneities. This paper is devoted to a computational and experimental study of the dissipative properties of wood. In the majority of cases, these wood properties are determined by a single parameter: the decrement of mechanical oscillations. This is insufficient for accurately modeling the dynamic behavior of wood structures. It is known that the decrement of mechanical oscillations is not constant across the frequency range and depends on the orientation of the wood fibers relative to the direction of the driving force. These features have to be taken into account when developing appropriate mathematical models of wood structures. Therefore, development of new methods and determination of the energy dissipation fundamental patterns (both throughout the object volume and across various areas of the frequency range) appear to be of current relevance. This paper applies an original experimental method for assessing the elastic and dissipative properties of spruce and birch wood samples. Elastic moduli and mechanical oscillation decrements are determined for these samples. We studied the influence of anisotropy and the scale factor on these. A correlation has been found between the elastic and dissipative properties of wood. As the modulus of elasticity in the longitudinal direction of the sample increases, its dissipative properties decrease: the logarithmic decrement of the oscillations decreases. A hypothesis has been proposed concerning the relationship between the elastic and dissipative properties of wood. This means that an accurate description of the energy dissipation properties of a given type of wood should include not one damping constant, but nine (number of elastic constants for an orthotropic body). The validity of the results obtained was tested using a finite-element model of a wood sample. The computed ratios for wood are derived based on the orthotropic body model. Shear deformations are treated according to S.P. Timoshenko's hypothesis. The results of the numerical studies are confirmed by their high correspondence with the data from field experiments.

**Keywords:** eigenfrequency, elastic modulus, finite element, logarithmic decrement of oscillations, dissipative properties, wood properties

**For citation:** Shlychkov S.V. Anisotropy and Dissipative Properties of Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 145–156. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-145-156>

### Введение

Механизмы рассеяния энергии механических колебаний в материалах, конструкциях из древесины и других анизотропных структур до настоящего времени остаются малоизученными. При этом данной проблеме посвящено



большое количество работ [3–5, 11, 12, 17–21]. Определение диссипативных характеристик древесины является трудной задачей, требующей использования вибрационного стенда, сложной оснастки и другой специализированной аппаратуры согласно ГОСТ 16483.31–74. Это делает реализацию данного подхода непростой и дорогой, при этом отсутствует возможность установления декремента для разных частотных диапазонов. Анализ можно проводить только на низшей собственной частоте образца, зависящей от его регламентных размеров и упругих свойств древесины. Между тем декремент не одинаков в частотном диапазоне [3, 4, 7, 8]. Эту особенность также необходимо учитывать при построении расчетных динамических моделей конструкций из древесины [5, 15]. В мировой практике для определения диссипативных свойств рекомендуется метод [17], который предполагает консольное крепление образцов и анализ затухающих колебаний. Данный метод несколько расширяет возможности исследователя, однако имеет недостатки, связанные с влиянием размеров образцов и способа крепления [4]. Попытки математического моделирования рассеяния энергии в древесине и конструкциях оказываются приближенными и эмпирическими [18–21]. Встречаются работы [7, 8, 11, 18], содержащие более подробную информацию о диссипативных свойствах древесины. В них отмечается существенная зависимость этих свойств от ориентации волокон древесины относительно направления вынуждающей силы. Таким образом, разработка новых методик [5] и выявление основных закономерностей диссипации энергии как по объему тела, так и для различных частотных областей является актуальной.

В настоящей работе решаются следующие задачи:

- экспериментальное определение декремента механических колебаний для образцов из древесины;
- установление влияния анизотропии древесины на декремент колебаний;
- выявление воздействия масштабного фактора на декремент колебаний;
- построение расчетной модели образца для оценки достоверности результатов натурных экспериментов.

#### *Объекты и методы исследования*

Экспериментальное исследование упругих и диссипативных характеристик древесины проведено на стержневых образцах 4 (рис. 1) с помощью оригинальной методики [5, 9, 15]. Данный подход предполагает исследование затухающей кривой, полученной для механической системы в виде заземленного стержня 4 с точечной массой на свободном конце 1.

Образец из древесины одним концом прикрепляется к станине прибора с помощью зажимного устройства 5. На другой конец плотно крепится металлический элемент («колпачок») массой 0,47 г. Это необходимо для осуществления связи между неметаллическим образцом и электромагнитным датчиком 3. На этот датчик с персонального компьютера (ПК) подается детерминированный электромагнитный сигнал заданной частоты. В результате возбуждаются изгибные колебания образца. Перемещениядвигающегося вместе с образцом колпачка анализируются посредством другого электромагнитного датчика 2, сигнал от которого поступает на вход звуковой платы ПК. Совпадение частоты электромагнитного сигнала с датчика 3 с собственной частотой образца приводит к возрастанию амплитуды колебаний, что отображается на мониторе ПК.

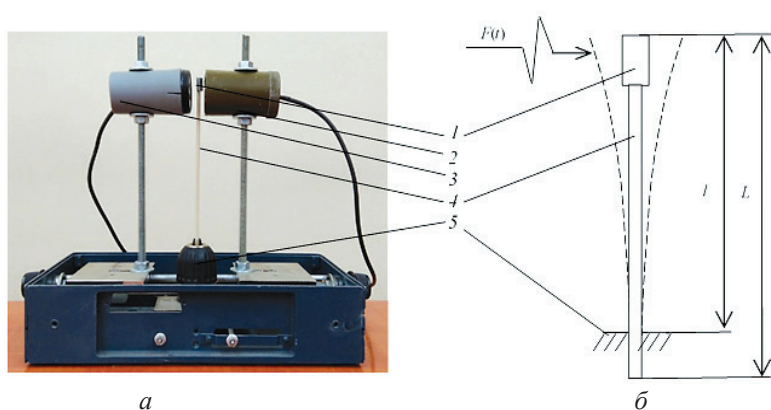


Рис. 1. Исследуемые образцы: *a* – помещенные в установку для определения упругих и диссипативных характеристик; *б* – схематичное представление образца с «колпачком», защемленным зажимным устройством

Fig. 1. Studied samples: *a* – placed in the test setup for determining elastic and dissipative properties; *б* – schematic view of a sample with a “cap” clamped by a clamping device

В случае прекращения подачи сигнала на датчик 3 образец переходит в режим затухающих колебаний (рис. 2). Анализ полученной затухающей кривой позволяет делать выводы о диссипативных свойствах образца. С помощью программы PowerGraph производится обработка полученных цифровых данных. Для оценки рассеяния энергии колебаний по частоте можно проводить спектральный анализ. Это позволяет определять спектр низших собственных частот образцов, выявлять скрытые периодичности, оценивать по высоте пиков влияние той или иной частоты на колебательный процесс.

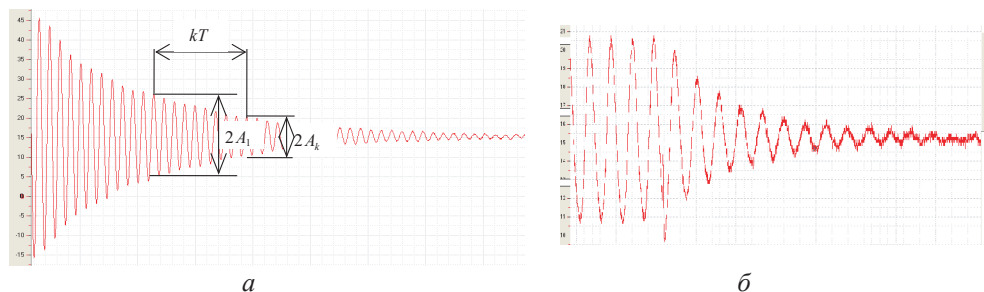


Рис. 2. График затухающих колебаний образца древесины, ориентированного: *a* – вдоль волокон; *б* – в радиальном направлении. *A* – амплитуда колебаний; *T* – условный период; *k* – количество условных периодов

Fig. 2. Graph of damped oscillations of a sample oriented: *a* – along the grain; *б* – in the radial direction. *A* – oscillation amplitude; *T* – conventional period; *k* – number of conventional periods

В результате обработки затухающих кривых устанавливался декремент  $\Delta$  и логарифмический декремент колебаний  $\delta$  по известным формулам [10, 22]:

$$d^{k-1} = \frac{A_k}{A_1}; \quad k = 5, 6, 7, \dots, 11; \quad \Delta = \frac{1}{d}; \quad \delta = \ln(\Delta), \quad (1)$$

где *d* – это коэффициент геометрической прогрессии, отражающий интенсивность уменьшения амплитуд затухающих колебаний; *k* – целое число условных периодов колебаний.

Величина  $k$  для уменьшения погрешности может выбираться большой. В нашем случае для образцов, затухание свободных колебаний которых имело медленный характер,  $k = 11$ . Образцы, ориентированные в радиальном направлении, отличались интенсивным затуханием колебаний. В этом случае принималось  $k = 5$ .

Расчет модуля упругости в продольном направлении образца производится на основе известного соотношения для низшей собственной частоты образца  $f_1$  [9]. Формула (2) выводится на основании метода Рэлея для балки, жестко заделанной одним концом и имеющей точечную массу на другом конце [6, 10]:

$$f_1 = \sqrt{\frac{3EI}{ml^3 + \frac{33}{140}m_0l^4}}, \quad (2)$$

где  $I$  – геометрическая характеристика поперечного сечения образца диаметром  $d$ ,  $I = \frac{\pi d^4}{64}$ ;  $m$  – масса колпачка, г,  $m = 0,47$ ,  $m_0 = \frac{M}{L}$ ,  $M$  – масса образца,  $L$  – длина образца;  $EI$  – изгибная жесткость образца.

Формула (2) не учитывает влияния сдвиговых деформаций и затухания колебаний. Принятие во внимание этих параметров применительно к геометрическим размерам исследуемых образцов и полученных величин собственных частот дает погрешность не более 1 % по сравнению с точным аналитическим решением [2]. Из формулы (2) получается выражение для модуля упругости в продольном направлении образца:

$$E = \frac{f_1^2 l^3 (m + 0,24m_0 l)}{3I}. \quad (3)$$

Обладая экспериментально полученной величиной первой собственной частоты колебаний  $f_1$ , данными о физических и геометрических параметрах образца можно оценивать модуль упругости в продольном направлении.

Образцы древесины ели получены из ствола диаметром 500 мм с помощью возрастного бурава (1–4, рис. 3). Индекс  $a$  соответствует направлению вдоль волокон древесины,  $r$  – радиальному направлению,  $t$  – окружному. Остальные образцы (5–9) извлечены из другого ствола ели. Нумерация произведена по мере возрастания угла ориентации образца от продольного направления волокон. При этом модуль упругости в продольном направлении образца должен уменьшаться [1] с возрастанием угла внедрения возрастного бурава в ствол для извлечения образца.

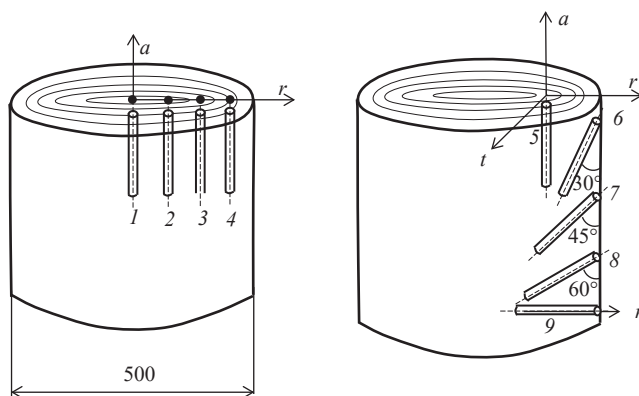


Рис. 3. Схема расположения образцов  
Fig. 3. Sample layout diagram

Другая партия образцов была изготовлена из древесины березы. Порода древесины изменена с целью обобщения получаемых результатов и подтверждения достоверности используемой методики.

Под каждым порядковым номером было несколько образцов. Проведена серия экспериментов по определению упруго-диссипативных свойств этих образцов согласно описанной выше методике (табл. 1). В процессе экспериментальных исследований и обработки получаемых кривых отбирались образцы со средними упруго-диссипативными характеристиками. Эксперименты осуществлялись в помещении при температуре воздуха 20–22 °С и влажности 60 %. Влажность образцов приводилась к нормализованной согласно ГОСТ 16483.7–71 сушильно-весовым способом по отдельной партии из 30 образцов.

Таблица 1

Физические и геометрические параметры образцов  
Physical and geometric parameters of the samples

| Параметр            | Образец |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Древесина ели       |         |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Диаметр, мм         | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|                     | 4,3     |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Длина <i>l</i> , мм | 100     |      |      |      | 90   |      |      |      |      |
| Масса <i>M</i> , г  | 1,02    | 1,17 | 1,00 | 1,19 | 0,80 | 0,81 | 0,81 | 0,82 | 0,80 |
| Длина <i>L</i> , мм | 113     | 114  | 113  | 114  | 101  | 102  | 101  | 103  | 100  |
| Древесина березы    |         |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Диаметр, мм         | 1       |      |      | 2    |      |      | 3    | 4    |      |
|                     | 5,0     | 4,0  | 3,0  | 5,0  | 4,0  | 3,0  | 3,3  | 3,3  |      |
| Длина <i>l</i> , мм | 140     |      |      |      |      |      | 170  |      |      |
| Масса <i>M</i> , г  | 2,30    | 1,68 | 0,93 | 2,77 | 1,85 | 1,03 | 0,80 | 0,93 |      |
| Длина <i>L</i> , мм | 150     |      |      |      |      |      | 179  | 180  |      |

Результаты исследования и их обсуждение

На основании экспериментальных затухающих кривых по формуле (1) определялись логарифмические декременты. По формуле (3) рассчитывались модули упругости древесины в направлении ориентации возрастного бурава, извлекающего образец. Для оценки влияния масштабного фактора у образцов 1 и 2 после первой серии экспериментов равномерным снятием материала с поверхности уменьшался диаметр до достижения 4 мм. Затем проводилась вторая серия испытаний, после которой диаметр уменьшался до 3 мм и эксперименты повторялись. Для образцов 1–4 произведена сравнительная оценка диссипативных свойств заболонной и ядровой древесины. Таким образом, было исследовано 9 образцов, для каждого из которых получено несколько затухающих кривых. Для каждого образца установлен средний декремент колебаний, среднее квадратическое отклонение *C*. Для доверительной вероятности  $\gamma = 0,95$  с помощью коэффициента Стьюдента  $t_\gamma$  определена средняя ошибка  $P = 4,7\%$ . Следовательно, результаты измерений можно считать надежными: истинное значение логарифмического декремента лежит в 5%-м интервале с вероятностью 0,95.

Они не позволяют сделать вывод о зависимости диссипативных свойств древесины (табл. 2) от ее принадлежности к заболонной или ядровой зонам ствола. С целью выявления влияния упругих свойств на диссипативные использованы образцы 5–9, вырезанные под разными углами в продольно-радиальной плоскости (*ar*).

Таблица 2

Упруго-диссипативные характеристики образцов из древесины ели  
Elastic-dissipative properties of spruce wood samples

| Параметр                   | Образец                |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| <i>E</i> , ГПа             | 10,6                   | 18,0  | 10,0  | 14,5  | 10,5  | 2,2   | 0,4   | 0,2   | 0,1   |
| $\delta$                   | 0,053                  | 0,058 | 0,052 | 0,059 | 0,070 | 0,180 | 0,230 | 0,260 | 0,370 |
| <i>C</i>                   | 0,355·10 <sup>-2</sup> |       |       |       | –     | –     | –     | –     | –     |
| <i>t<sub>γ</sub></i>       | 2,132                  |       |       |       | –     | –     | –     | –     | –     |
| <i>P</i> , %               | 6,9                    |       |       |       | –     | –     | –     | –     | –     |
| <i>v</i> экспериментальная | 140                    | 219   | 137   | 160   | 160   | 74    | 31    | 25    | 15    |
| <i>v</i> расчетная (МКЭ)   | 143                    | 205   | 139   | 164   | 163   | 76    | 31    | 26    | 15    |

Примечание: *v* – низшая собственная частота колебаний; МКЭ – метод конечных элементов.

По данным таблицы, истинное значение логарифмического декреमेंта для образцов 1–4 с вероятностью 0,9 лежит в интервале (0,055±0,0037). Экспериментально определенный модуль упругости по низшей частоте колебаний образца получается точным, поскольку данная величина, использованная при расчете МКЭ, дает практически такую же частоту. В худшем случае ошибка лежит в пределах 6 %. В то же время модуль упругости древесного материала у образцов 1–4 существенно различается. Видимо, это связано с заметной разницей плотности древесного материала, из которого были вырезаны эти образцы: один состоял преимущественно из более ранней древесины, а другой – из более поздней.

Зависимость между упругими и диссипативными свойствами прослеживается четко. С уменьшением модуля упругости в продольном направлении образца (от 18 ГПа до 100 МПа) его диссипативные свойства, определяемые логарифмическим декрементом, возрастают (от 0,05 до 0,37). Зависимости логарифмического декреमेंта колебаний и модуля упругости образца в продольном направлении от угла *α* (угол между продольной осью образца и направлением волокон древесины в образце) представлены на рис. 4.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает нелинейную обратно пропорциональную зависимость между упругими и диссипативными свойствами. Образцы с высоким модулем упругости, вырезанные в продольном направлении, обладают наиболее низким логарифмическим декрементом. И наоборот, образцы, вырезанные в радиальном направлении и имеющие в 20–30 раз меньший модуль упругости, обладают в 7 раз большим логарифмическим декрементом. Известные справочные данные [1] хорошо согласуются с результатами поставленных экспериментов. Расхождения между ними объясняются тем, что использованная формула (3) получена для изотропной структуры и не учитывает влияние сдвиговых деформаций [22].

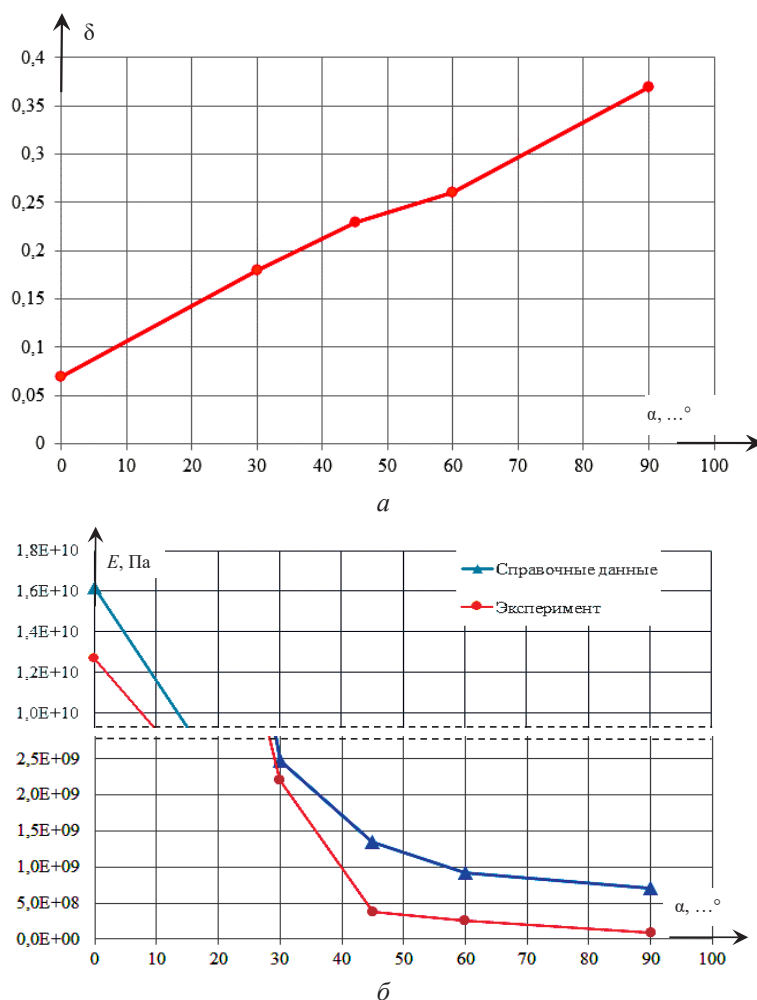


Рис. 4. Анизотропия логарифмического декремента колебаний древесины:  
 $a$  – ели;  $b$  – сосны

Fig. 4. Anisotropy of logarithmic decrement of wood vibrations:  $a$  – spruce;  $b$  – pine

Для оценки влияния масштабного фактора использованы 4 образца, вырезанные вдоль волокон древесины березы (см. табл. 1). У образцов 1 и 2 после каждой серии экспериментов менялся размер поперечного сечения. При этом установившиеся колебания образцов последовательно возбуждались гармонической силой с разной амплитудой. Сначала возбуждались колебания образца диаметром 5 мм посредством гармонической силы  $F(t) = 0,2F\sin(pt)$ . После перехода образца в режим установившихся колебаний источник вибраций выключался, образец переходил в режим затухающих колебаний, и производилось измерение декремента. Затем возбуждались колебания образца диаметром 4 мм посредством гармонической силы  $F(t) = 0,6F\sin(pt)$  – измерялся декремент. В третий раз с тем же образцом диаметром 3 мм использовалась максимальная вынуждающая сила  $F(t) = F\sin(pt)$  – измерялся декремент. Таким образом, было исследовано 8 образцов, для каждого из которых получено 3 затухающих кривых с различным уровнем начальной амплитуды. Для каждого образца установлен средний декремент колебаний, среднее квадратическое отклонение, определена точность опыта (табл. 3).

Таблица 3

Упругие и диссипативные характеристики образцов из древесины березы  
Elastic and dissipative properties of birch wood samples

| Показатель                  | Образец |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 1       |       |       | 2     |       |       | 3     | 4     |
| $F_0$ , 20 %*               | 1,14    | 1,17  | 1,07  | 1,19  | 1,17  | 1,03  | 1,07  | 1,10  |
| $F_0$ , 60 %                | 1,29    | 1,16  | 1,06  | 1,26  | 1,11  | 1,03  | 1,06  | 1,07  |
| $F_0$ , 100 %               | 1,31    | 1,18  | 1,04  | 1,22  | 1,14  | 1,03  | 1,05  | 1,08  |
| $\Delta_{ср}$               | 1,25    | 1,17  | 1,06  | 1,22  | 1,14  | 1,03  | 1,06  | 1,08  |
| $C$                         | 0,09    | 0,01  | 0,03  | 0,04  | 0,03  | 0     | 0,01  | 0,02  |
| $t_\gamma$                  | 2,353   | 3,182 | 3,182 | 2,353 | 3,182 | 5,841 | 3,182 | 3,182 |
| $\gamma$                    | 0,90    | 0,95  | 0,95  | 0,90  | 0,95  | 0,99  | 0,95  | 0,95  |
| $P$ , %                     | 9,6     | 1,6   | 2,6   | 4,6   | 4,8   | 0     | 1,7   | 2,5   |
| $\delta$                    | 0,22    | 0,17  | 0,06  | 0,20  | 0,13  | 0,03  | 0,06  | 0,08  |
| $E_a$ , ГПа                 | 16      | 20    | 18    | 12    | 14    | 13    | 16    | 18    |
| $\nu$ экспериментальная, Гц | 88      | 69    | 40    | 72    | 55    | 43    | 63    | 64    |
| $\nu$ расчетная МКЭ, Гц     | 89      | 70    | 41    | 75    | 54    | 44    | 64    | 66    |

\*20, 60, 100 % – интенсивность силового воздействия на образец.

На основе статистической обработки экспериментальных данных получается, что истинный декремент колебаний, рассчитанный для образца 1 диаметром 5 мм лежит в пределах  $1,13 \leq 1,25 \leq 1,37$  с вероятностью 90 %. Это наименее удачный результат из полученных. Для образца 2 диаметром 3 мм истинный декремент равен 1,03 с вероятностью 99 %. Это наиболее удачный вариант. В целом результаты измерений получились надежными. Анализ представленных в таблице данных показывает отсутствие влияния амплитуды колебаний на декремент колебаний. У образца 1 декремент возрастает на 15 %, у образца 3 – уменьшается на 2 %. В случае образца 2 изменения отсутствуют. При этом влияние размеров образца на его диссипативные свойства очевидно. С уменьшением их размеров (объем образцов снизился более чем в 2 раза) логарифмический декремент колебаний получается в 4–6 раз меньше. Этот эффект не следует связывать исключительно с размерами колеблющегося тела. Уменьшение размеров образца приводит к падению его инерционных и жесткостных свойств. При этом точечная масса (металлический колпачок) была неизменной. Уменьшенный объем материала древесины был не в состоянии обеспечить такой же уровень рассеивания энергии механических колебаний, как более массивный образец. Следовательно, этот эффект может быть связан с изменением соотношения между упругими и инерционными свойствами механической системы (образец с колпачком) в пользу последних – происходит изменение динамических свойств образца. В связи с этим для затухания колебаний тонких образцов требуется более длительный период времени, чем для затухания колебаний более массивных образцов. Следует также отметить, что образцы из древесины березы имеют несколько больший модуль упругости, чем образцы из древесины ели, и несколько меньший декремент колебаний. Это согласуется с данными [1, 13].

Экспериментально определенный модуль упругости по низшей частоте колебаний образца получается точным, поскольку данная величина, использованная при расчете МКЭ, дает практически такую же частоту. В худшем случае ошибка получается в пределах 3 %. Нестабильность модуля упругости для одного и того же материала у образцов 1 и 2 объясняется неравномерным снятием материала с поверхности образца при изменении его диаметра (отклонение от цилиндрической формы).

Конечно-элементная модель [9, 14, 15] на основе полученных данных построена с помощью программного комплекса Ansys [16]. Для дискретизации образцов использованы 3-узловые балочные конечные элементы с 6 степенями свободы в узле. Данный конечный элемент построен на основе теории С.П. Тимошенко, учитывающей деформации сдвига [22]. Задача динамики описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$[M] \{ \ddot{q} \} + [B] \{ \dot{q} \} + [K] \{ q \} = \{ F(t) \}, \quad (4)$$

где  $[M]$ ,  $[B]$ ,  $[K]$  – матрицы масс, демпфирования, жесткости конструкции соответственно;  $\{ \ddot{q} \}$ ,  $\{ \dot{q} \}$ ,  $\{ q \}$  – векторы обобщенных ускорений, скоростей и перемещений соответственно. Вектор нагрузки имеет вид  $\{ F(t) \} = F_0 \sin(pt)$ , где  $p$  – круговая частота возбуждения;  $t$  – время. Дифференциальные уравнения (4) моделируют вынужденные моногармонические колебания механической системы с вязким трением. Коэффициенты матрицы демпфирования подбираются эмпирически. Порядок матриц равняется числу степеней свободы. Для задания упругих свойств древесины использованы данные [1] и результаты проведенных экспериментов в части модуля упругости в продольном направлении образца. Сопоставление частот ( $f_1$ ), определенных с помощью разработанной экспериментальной методики [5], с частотами, рассчитанными МКЭ, показывает их соответствие.

### Заключение

Разработана методика экспериментальной оценки упругих и диссипативных характеристик древесины. Для образцов из древесины ели и березы определены модули упругости и декременты колебаний. Полученные результаты сопоставлены с известными данными. Установлено удовлетворительное соответствие. С целью проверки адекватности результатов на базе метода конечных элементов построена расчетная динамическая модель консольной балки из древесины – образца. Исследован спектр колебаний образца в зависимости от его физико-механических свойств. Установлено хорошее соответствие результатам натурных экспериментов. На примере образцов из древесины ели установлена нелинейная обратно пропорциональная взаимосвязь логарифмического декремента колебаний образца от модуля упругости в продольном направлении.

Таким образом, для древесины декремент зависит от направления действия напряжений, возникающих в материале колеблющегося тела. Поскольку физико-механические свойства древесины (ортотропного тела) определяются 9 упругими постоянными, то, соответственно, и характеристики, описывающие рассеяние энергии колебаний в древесине, должны содержать 9 констант. Однако проведение экспериментов для их корректного определения представляется достаточно сложным. В связи с этим в первом

приближении для определения характеристик рассеяния можно использовать известные диаграммы анизотропии модулей упругости, опираясь на которые, с учетом полученной обратно пропорциональной зависимости между модулем упругости образца и его декрементом, можно приближенно оценивать декременты колебаний в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях. При этом корректное установление рассеяния энергии в древесине должно проводиться тензором диссипативных характеристик аналогично тензору упругих постоянных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.  
Ashkenazi E.K., Ganov E.V. *Anisotropy of Structural Materials*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 247 p. (In Russ.).
2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высш. шк., 1980. 408 с.  
Biderman V.L. *Theory of Mechanical Oscillations*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1980. 408 p. (In Russ.).
3. Макарьева Т.А. Исследование акустических характеристик древесины, используемой для дек музыкальных инструментов, и разработка методов их контроля в условиях производства: дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 200 с.  
Makar'yeva T.A. *A Study of the Acoustic Properties of Wood Employed for Musical Instrument Tops and the Development of Methods for Their Control in Production Conditions*: Cand. Engin. Sci. Diss. Moscow, 1975. 200 p. (In Russ.).
4. Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Гюнал И., Шишкин В.М. Теоретико-экспериментальный метод определения аэродинамической составляющей демпфирования тест-образца ромбовидного поперечного сечения // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2016. № 4. С. 200–219.  
Paimushin V.N., Firsov V.A., Gyunal I., Shishkin V.M. Theoretical-Experimental Method for Determination of Aerodynamic Damping Component of Test Samples with Diamond-Shaped Cross-Section. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 200–219. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.4.12>
5. Патент 2715222 C1 РФ, МПК G01N. Способ определения упруго-диссипативных характеристик древесины: № 2019103387: заявл. 07.03.2019; опубл. 26.02.2020 / С.В. Шлычков.  
Shlychkov S.V. *Method of Determining Elastic-Dissipative Characteristics of Wood*. Patent RF, no. RU 2715222 C1, 2020. 8 p. (In Russ.).
6. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.  
Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Handbook of Materials Strength*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1988. 736 p. (In Russ.).
7. Пищик И.И. Датирование древесины длительной выдержки неразрушающими методами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 31 с.  
Pishchik I.I. *Non-Destructive Dating of Long-Aged Wood*: Dr. Engin. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2005. 31 p. (In Russ.).
8. Пищик И.И. К вопросу использования длительно выдержанной древесины в музыкальных инструментах // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2012. № 3. С. 115–119.  
Pishchik I.I. On the Issue of Using Long-Seasoned Wood in Musical Instruments. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 3, pp. 115–119. (In Russ.).
9. Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М., Шлычков С.В. Идентификация упругих свойств древесины // Фундамент. исследования. 2013. № 10, ч. 12. С. 2625–2629.

Saldaeva E.Y., Tsvetkova E.M., Shlychkov S.V. Identification of the Elastic Properties of Wood. *Fundamental research*, 2013, no. 10, part 12, pp. 2625–2629. (In Russ.).

10. Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. М.: Высш. шк., 1973. 456 с.

Svetlitskiy V.A., Stasenko I.V. *Collection of Tasks in the Theory of Oscillations*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 456 p. (In Russ.).

11. Тулузаков В.В. О логарифмическом декременте затухания резонансной древесины // Науч. тр. МЛТИ. 1981. Вып. 131. С. 11–14.

Tuluzakov V.V. On the Logarithmic Decrement of Attenuation of Resonant Wood. *Nauchnyye trudy MLTI*, 1981, iss. 131, pp. 11–14. (In Russ.).

12. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Ugolev B.N. *Wood Science and Forest Commodity Science*. Moscow, MGUL Publ., 2007. 351 p. (In Russ.).

13. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский, М.Е. Бродов, М.В. Быстрое и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.

Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M., Brodov M.E., Bystroye M.V., et al. *Physical Quantities: Handbook*. Ed. by I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhova. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1991. 1231 p. (In Russ.).

14. Шлычков С.В. Влияние породы древесины на качество акустических панелей // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2016. Т. 20, № 4. С. 60–63.

Shlychkov S.V. Influence of Wood Species on the Quality of Acoustic Panels. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 60–63. (In Russ.).

15. Шлычков С.В., Тарасова О.Г. Идентификация упруго-диссипативных свойств древесины // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы, конструкции, технологии. 2022. № 3. С. 34–42.

Shlychkov S.V., Tarasova O.G. Identification of Elastic-Dissipative Properties of Wood. *Bulletin of Volga State University of Technology. Series "Materials. Constructions. Technologies"*, 2022, no. 3, pp. 34–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2022.3.34>

16. *ANSYS Mechanical APDL Verification Manual*. ANSYS, Inc. Release 15.0 Southpointe, November 2013, 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317. ANSYS Inc., 2013. Available at: <http://www.ansys.com> (accessed 21.06.26).

17. *ASTM E-756. Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials*. S. I. ASTM Intern., 2004.

18. Bremaud I., Gril J., Thibaut B. Anisotropy of Wood Vibrational Properties: Dependence on Grain Angle and Review of Literature Data. *Wood Science and Technology*, 2011, vol. 45, pp. 735–754. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0393-8>

19. Bremaud I., Gril J. Moisture Content Dependence of Anisotropic Vibrational Properties of Wood at Quasi Equilibrium: Analytical Review and Multi-Trajectories Experiments. *Holzforschung*, 2021, vol. 45, no. 4, pp. 313–327. <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0028>

20. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Berlin, Springer, 2006. 394 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

21. Guiman M.V., Stanciu M.D., Roșca I.C., Georgescu S.V., Năstac S.M., Câmpean M. Influence of the Grain Orientation of Wood upon Its Sound Absorption Properties. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 17, art. 5998. <https://doi.org/10.3390/ma16175998>

22. Timoshenko S.P., Gere J.M. *Mechanics of Materials*. New York, Van Nostrand Company, 1972. 575 p.

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The author declares no conflict of interest