

УДК 53.083.2

**И. Г. Федосенко, Е. В. Чесновский, Н. В. Мазаник**  
Белорусский государственный технологический университет

### **РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ КОНСТРУКЦИЙ ИСТОРИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ**

В статье описывается исследование состояния древесины неразрушающим методом при помощи измерения времени и скорости распространения ультразвука при поверхностном и сквозном прохождении волн.

В зависимости от величины скорости распространения звуковой волны определены основные физико-механические свойства древесины главных строительных пород, таких как сосна, ель и береза. Проведена оценка влияния породы (плотности) и влажности древесины на скорость звука в материале.

Полученные зависимости предела прочности и модуля упругости древесины при статическом изгибе, плотности древесины в зависимости от скорости распространения звука в материале позволяют оценить со значительной точностью состояние древесины неразрушающим способом и планировать мероприятия по консолидации материала, укреплению конструкции или замене утратившего несущую способность элемента.

**Ключевые слова:** древесина, ультразвук, влажность, плотность, скорость, изгиб, прочность, модуль упругости.

**I. G. Fedosenko, E. V. Chesnovskiy, N. V. Mazanik**  
Belarussian State Technological Univesity

### **DEVELOPMENT OF NON-DESTRUCTIVE METHOD OF ESTIMATION OF STATUS OF WOOD STRUCTURES OF HISTORICAL MONUMENTS**

The article describes the study of the state of wood by a non-destructive method by measuring the time and speed of ultrasound propagation during surface and through passage of waves.

Depending on the magnitude of the sound wave propagation velocity, the basic physical and mechanical properties of the main building woods such as pine, spruce and birch are determined. The influence of the rock (density) and humidity of the wood on the speed of sound in the material was estimated.

The obtained dependences of the tensile strength and modulus of elasticity of wood in static bending, the density of wood, depending on the speed of sound propagation in the material, enable us to estimate the state of wood with a non-destructive method with great accuracy and plan measures for consolidating the material, strengthening the structure or replacing the missing element.

**Key words:** wood, ultrasound, moisture, density, speed, bending, strength, modulus of elasticity.

**Введение.** К исторической древесине относят древесину из археологических раскопов, затонувших судов, памятников деревянного зодчества или иных конструкций, которые представляют историческую и культурную ценность [1]. Состояние исторической древесины традиционно оценивается как по плотности материала, так и по твердости. Однако использование плотности и твердости для оценки состояния строительной древесины нежелательно по ряду причин: 1) адекватно оценить плотность возможно только на малых образцах, отделение которых от крупногабаритного элемента деревянной конструкции станет разрушающим мероприятием [2]; 2) твердость оценивается по поверхности элемента локально и не дает полного представления об общем состоянии элемента конструкций.

Наиболее совершенным методом неразрушающей оценки состояния материала крупно-

габаритных элементов является томография, которая бывает магнитно-резонансной, позитронно-эмиссионной, линейной, компьютерной, оптической. Метод томографии применим для выделенного из конструкции элемента, но на практике это сделать трудно или невозможно по многим причинам. В частности, нельзя разобрать объект на элементы по причине необратимости действий. Определение плотности такой древесины должно проводиться без разборки конструкции и повреждения материала [3]. Наилучшим с точки зрения оценки структуры и скорости обследования будет способ рентгенографии, однако, с точки зрения безопасности и трудоемкости он ограничен в использовании и крайне нежелателен. Этих недостатков лишен способ определения изменения скорости звука, проходящего через материал. Высокочастотные колебания не вызывают разрушение материала, а значит могут

быть применены для диагностики хрупкой разрушенной древесины [4].

Скорость распространения ультразвуковых волн в материале зависит от его плотности и упругости, наличия дефектов (трещин и пустот), определяющих прочность и качество [5]. Следовательно, измерением затухания волны в элементах изделий, конструкций и сооружений можно получать информацию о прочности и однородности; модуле упругости и плотности; наличии дефектов и их локализации, что даст возможность оперативно оценивать качество древесины элементов исторических построек непосредственно на месте их размещения, не разрушая их при этом.

Исследования в области ультразвуковой диагностики материалов имеют историю и ведутся по сегодняшний день, однако, не существует данных, которые можно было бы использовать для оценки состояния исторической древесины пород, произрастающих в нашей стране. Этот факт не дает возможности достоверно оценить физико-механические свойства древесины и разработать экспресс-способ их оценки по скорости ультразвука.

**Основная часть.** С целью выяснения зависимости основных физико-механических показателей древесины от скорости прохождения через нее звука был выбран измерительный прибор Пульсар-2.1, который позволяет выявлять дефекты, определять прочность, плотность и модуль упругости строительных материалов, а также звуковой индекс абразивов по предварительно установленным градуировочным зависимостям данных параметров от скорости распространения ультразвуковых импульсов [6]. Прибор разработан для диагностики минеральных материалов и древесины среди них нет, также как нет и базы данных, по которой можно было бы, измеряя скорость звука, прошедшего через древесину [7], определять ее физико-механические свойства.

Основные области применения: определение прочности, поиск дефектов в бетонных сооружениях по аномальному снижению скорости, оценка глубины трещин, оценка пористости, трещиноватости и анизотропии композитных материалов и горных пород, определение модуля упругости [8] и плотности материалов [9]. Прибор обеспечивает работу:

- при поверхностном прозвучивании с датчиком поверхностного прозвучивания в сборе на фиксированной базе ( $120 \pm 1$ ) мм с сухим контактом;
- сквозном прозвучивании с датчиками сквозного прозвучивания на произвольной базе с контактной смазкой или поверхностном и уг-

ловом прозвучивании с сухим контактом (конусные насадки).

Для проведения испытаний были отобраны образцы из заболонной части древесины. Отобрано 40 образцов древесины сосны, 30 образцов древесины ели, 35 образцов древесины березы и 9 образцов археологической древесины сосны размерами  $20 \times 20 \times 300$  мм без видимых пороков. Образцы всех пород, за исключением археологической древесины, были разделены на 5 групп. Каждой группе присваивалась индивидуальная маркировка, соответственно группе влажности 10, 30, 90, 150, 200%. Вся древесина была предварительно кондиционирована до атмосферно-сухого состояния. Затем группами образцы помещались в емкости с водой, в которых длительное время выдерживались до достижения требуемой влажности. Влажность постоянно контролировалась с помощью взвешивания образцов.

Измерение скорости распространения ультразвука происходило в двух направлениях: продольном и радиальном.

Работа Пульсар-2.1 основана на измерении времени и скорости прохождения ультразвукового импульса в материале изделия от излучателя к приемнику. Скорость ультразвука вычисляется делением расстояния между излучателем и приемником на время, которое требуется звуковой волне для прохождения между ними. Выполняется серия измерений (задается в серии от 1 до 10 измерений), которая также подвергается математической обработке с отбраковкой выбросов и определением среднего значения, коэффициента вариации, коэффициента неоднородности. Для повышения достоверности в каждом измерительном цикле выполняли по 5 измерений и результат автоматически усреднялся прибором [10].

Осуществлялось сквозное прозвучивание образцов с использованием геля и сухим контактом (конусные насадки) по двум вариантам, которые изображены на рис. 1.

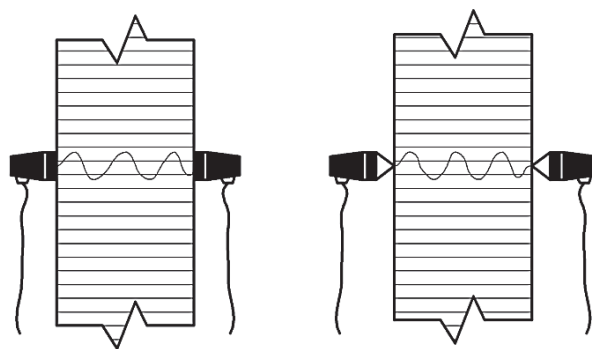


Рис. 1. Варианты прозвучивания древесины при помощи прибора Пульсар 2.1

После измерения скорости образцы помещались в герметичные емкости (для исключения потери влажности) до испытаний на поперечный изгиб. При статическом изгибе образцов на испытательной машине MTSElectromechanical 100 kN, обеспечивающей заданную скорость нагружения образца, определяли перемещение нагружающей головки и нагрузку, после чего рассчитывали модуль упругости по ГОСТ 28840-90 [11] и предел прочности по ГОСТ 16483.10-73 [12].

Для определения реальной влажности каждого образца с помощью весового метода ГОСТ 16483.7-71 [13] и его плотности [14] по ГОСТ 16483.1-84 [15] после проведенных испытаний на изгиб из каждого образца выпиливалась секция влажности размерами 20×20×30 мм, по которой при помощи сушильно-весового метода определялась индивидуальная влажность.

По полученным данным установлены зависимости скорости распространения звука ( $V$ ) от плотности ( $\rho_6$ ) и влажности ( $W$ ) древесины сосны, ели и березы соответственно:

$$V_c = 4620,794 - 9,815 \cdot W + 2,793 \cdot \rho_6;$$

$$V_e = 6951,234 - 6,815 \cdot W + 3,777 \cdot \rho_6;$$

$$V_b = 6116,580 - 8,141 \cdot W + 1,099 \cdot \rho_6;$$

$$V = 5971,624 - 8,201 \cdot W - 0,719 \cdot \rho_6.$$

Пользуясь этими зависимостями, легко оценить значение одного из трех входящих в уравнение показателей (скорости звука, плотности и аб-

солютной влажности древесины). Также найдена зависимость предела прочности и модуля упругости от скорости распространения ультразвука, которые графически представлены на рис. 2 и 3.

Получены уравнения регрессии зависимости предела прочности ( $\sigma$ ), модуля упругости ( $E$ ) и плотности ( $\rho$ ) от скорости распространения ультразвука, для древесины сосны, ели и березы предел прочности можно определить как

$$\sigma_c = 1714,229 - 0,936 \cdot V + 0,00016 \cdot V^2 - 9,141 \cdot V^3;$$

$$\sigma_e = 6344,389 - 3,593 \cdot V + 0,00067 \cdot V^2 - 4,183 \cdot V^3;$$

$$\sigma_b = -13356,8 + 8,285 \cdot V + 0,001 \cdot V^2 - 1,18 \cdot V^3;$$

$$\sigma = 1772,404 - 0,954 \cdot V + 0,00017 \cdot V^2 - 9,177 \cdot V^3;$$

$$E_c = 89,899 - 0,055 \cdot V + 1,070 \cdot V^2 - 6,155 \cdot V^3;$$

$$E_e = 337,194 - 0,179 \cdot V + 3,112 \cdot V^2 - 1,714 \cdot V^3;$$

$$E_b = -1361,330 - 0,828 \cdot V - 0,00017 \cdot V^2 - 1,138 \cdot V^3;$$

$$E = 173,009 - 0,095 \cdot V + 1,710 \cdot V^2 - 9,431 \cdot V^3;$$

$$\rho_c = 5204,002 - 1,366 \cdot V + 9,38 \cdot V^2;$$

$$\rho_e = 3557,919 - 0,809 \cdot V + 4,567 \cdot V^2;$$

$$\rho_b = 2242,684 - 0,024 \cdot V - 4,925 \cdot V^2;$$

$$\rho = 5757,096 - 1,524 \cdot V - 0,00011 \cdot V^2.$$

В литературных источниках для всех материалов для расчета модуля упругости рекомендуется уравнение линеаризованного вида:  $E = a \cdot \rho \cdot V^2$ , однако во время оценки модели было установлено, что полиномиальная модель лучше подходит для описания зависимости модуля упругости древесины ели от скорости звука.

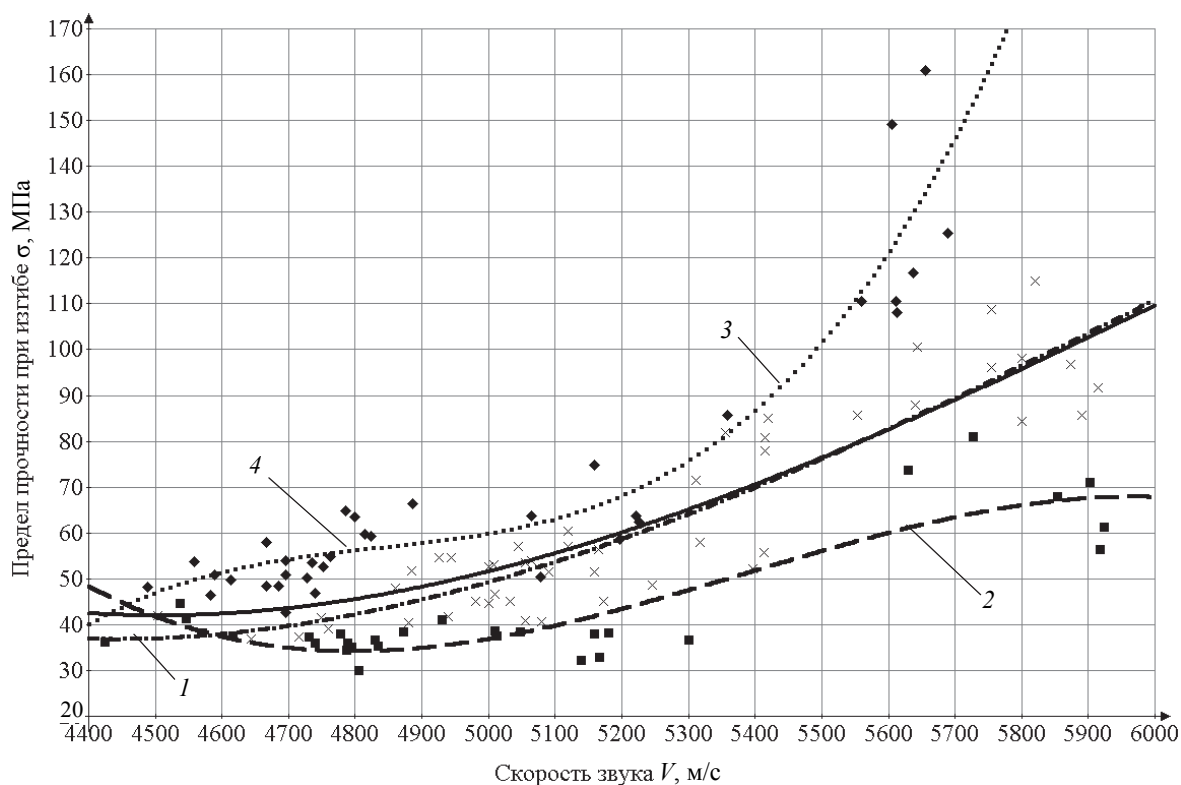


Рис. 2. Зависимость предела прочности от скорости распространения звука в материале:  
1, 2, 3 и 4 — зависимости для древесины сосны, ели, березы  
и обобщенная для всех исследованных пород древесины соответственно

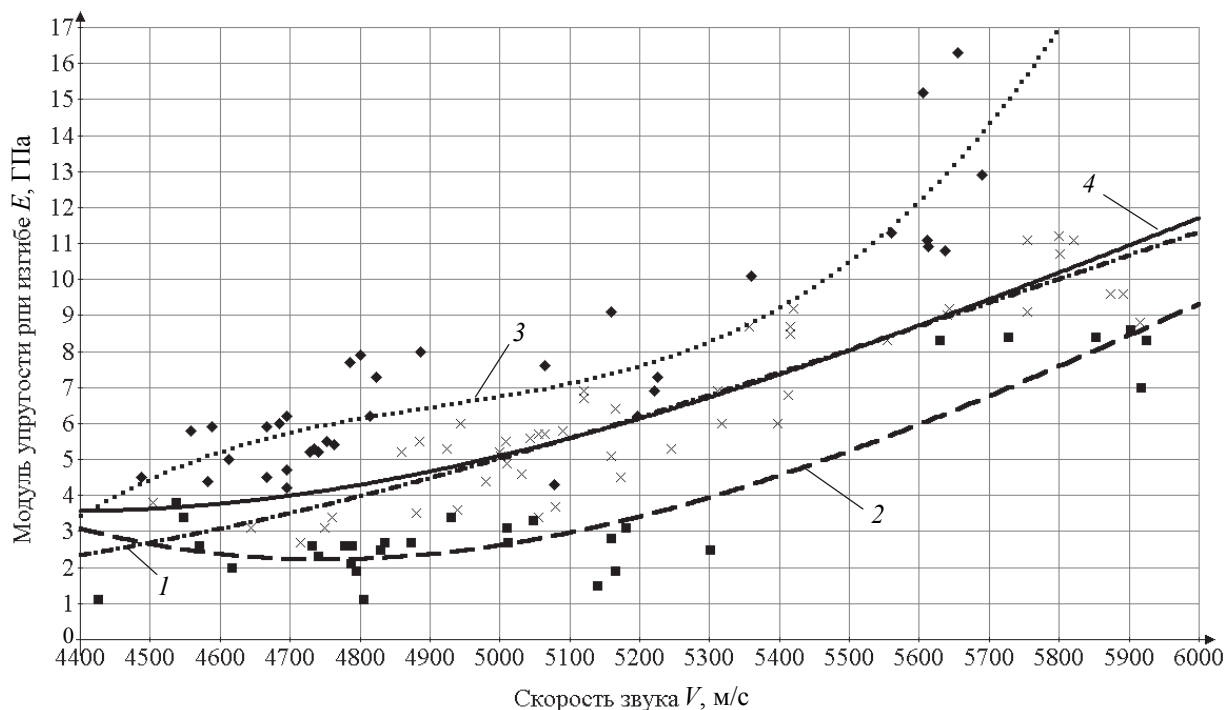


Рис. 3. Зависимость модуля упругости от скорости распространения звука в материале:  
1, 2, 3 и 4 – зависимости для древесины сосны, ели, березы  
и обобщенная для всех исследованных пород древесины соответственно

#### Сравнение полиномиальных и линеаризованных моделей

Порода	Полиномиальная модель		Линеаризованная модель	
	уравнение регрессии	$R^2$	уравнение регрессии	$R^2$
Сосна	$E_c = 89,899 - 0,055 \cdot V + 1,070 \cdot V^2 - 6,155 \cdot V^3$	0,84	$E_c = 3,469 \cdot 10^{-10} \cdot \rho \cdot V^2$	0,81
Ель	$E_c = 337,194 - 0,179 \cdot V + 3,112 \cdot V^2 - 1,714 \cdot V^3$	0,84	$E_c = 2,129 \cdot 10^{-10} \cdot \rho \cdot V^2$	0,63
Береза	$E_c = -1361,330 - 0,828 \cdot V - 0,00017 \cdot V^2 - 1,138 \cdot V^3$	0,81	$E_c = 3,314 \cdot 10^{-10} \cdot \rho \cdot V^2$	0,80
Общее	$E = 173,009 - 0,095 \cdot V + 1,710 \cdot V^2 - 9,431 \cdot V^3$	0,55	$E = 3,145 \cdot 10^{-10} \cdot \rho \cdot V^2$	0,77

В таблице приведено сравнение полиномиальных моделей и моделей вышеупомянутого вида.

При сравнении уравнений по критерию точности очевидно, что уравнения полинома, которые были получены нами, позволяют найти более точные значения при расчете физико-механических свойств древесины отдельных пород по скорости распространения звука. Кроме того, скорость звука зависит от плотности и учитывает ее, к тому же, точное определение плотности древесины часто затруднительно и требует отделения образцов от элемента, что, как было сказано выше, является недопустимой мерой. Поэтому использование полиномиального уравнения предпочтительней для экспресс-метода оценки свойств исторической древесины в постройках по скорости ультразвука.

**Заключение.** Полученные модели, связывающие физико-механические свойства со скоростью ультразвука, пропущенного через структуру древесины, позволяют оценивать неразрушающим способом со значительной точностью состояние древесины и планировать мероприятия по консолидации материала, укреплению конструкции или замене утратившего несущую способность элемента.

Использование ультразвуковой диагностики для оценки исторической древесины памятников требует также дальнейшего изучения в части влияния дефектов, приобретенных в связи с условиями эксплуатации, возможности доступа к отдельным типам элементов в связи с требованиями реставраторов и др.

#### Литература

1. Горшин С. Н., Максименко Н. А., Горшина Е. С. Защита памятников деревянного зодчества. М.: Наука, 1992. 279 с.
2. Левинский Ю. Б., Лавров М. Ф., Семенова С. А. Новый методологический подход к исследованию распределения плотности по сечению и высоте ствола в древесине (на примере древесины лиственницы даурской, произрастающей в Якутии) // Деревообработка: технологии, оборудование,

менеджмент XXI века: труды VIII Междунар. евразийского симпозиума. Екатеринбург, 2013. Режим доступа: [http://symposium.forest.ru/article/2013/2\\_tehno-logy/pdf/Levinskyi2.pdf](http://symposium.forest.ru/article/2013/2_tehno-logy/pdf/Levinskyi2.pdf) (дата доступа: 20.04.2017).

3. Интеграция археологических и этнографических исследований: сб. науч. трудов: в 2 т. / гл. ред. Н. А. Томилов, отв. ред. Д. Дж. Андерсон, М. А. Корусенко, С. С. Тихонов, А. В. Харинский. 2013. Т. 2. 310 с.

4. Физические методы испытаний древесины / А. Н. Чубинский [и др.]. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 125 с.

5. Бирдаро Н. Влияние некоторых факторов на акустические свойства древесины // Лесной вестник МГУЛ. 2013. С. 112–115.

6. Сергиенко Ю. К. Исследование ультразвукового метода обнаружения внутренней гнили в круглых лесоматериалах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / МЛТИ. М., 1968. 26 с.

7. Экспериментальное исследование влияния температуры и влажности на распространение акустических волн в древесине / Я. И. Соколовский [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. 2011. Вып. 30. С. 228–235.

8. Сивов Ю. А. Определение скорости звука, модуля Юнга и внутреннего трения резонансным методом // Издательство Томского политехнического университета. 2012. 9 с.

9. Мельничук И. А., Йассин Солиман Й. М., Черданцева О. А. Диагностика внутреннего состояния деревьев *Tilia Cornada Mill.* с использованием комплекса аппаратуры акустической ультразвуковой томографии «АРБОТОМ» // Вестник РУДН. 2012. Сер.: Агрономия и животноводство. С. 25–32.

10. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006. 394 с.

11. Древесина. Метод определения модуля упругости при статическом изгибе: ГОСТ 16483.9-73. Введ. 01.07.74. М.: Госстандарт СССР: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 7 с.

12. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе: ГОСТ 16483.3-84. Введ. 01.07.85. М.: Госстандарт СССР: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 7 с.

13. Древесина. Метод определения влажности: ГОСТ 16483.7-71. Введ. 01.01. М.: Госстандарт СССР: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 4 с.

14. Пауль Э. Э., Кухта В. Н. Зависимость механических свойств древесины от ее плотности // Лесное и охотничье хозяйство, 2011. № 10. С. 20–23.

15. Древесина. Метод определения плотности: ГОСТ 16483.1-84. Введ. 01.07.85. М.: Госстандарт СССР: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 7 с.

## References

1. Gorshin S. N., Maksimenko N. A., Gorshina E. S. *Zashchita pamyatnikov derevyannogo zodchestva* [Protecting monuments of wooden architecture]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 279 p.

2. Levinskyi Yu. B., Lavrov M. F., Semenova S. A. A new methodological approach to the study of the distribution of density along the cross-section and the height of the trunk in wood (On the example of larch wood of the Dahurian, growing in Yakutia). *Trudy Mezhdunar. evraziyskogo simpoziuma («Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menezhment XXI veka»)*. Ekaterinburg, 2013. Available: [http://symposium.forest.ru/article/2013/2\\_tehnology/pdf/Levinskyi2.pdf](http://symposium.forest.ru/article/2013/2_tehnology/pdf/Levinskyi2.pdf) (accessed 20.04.2017).

3. Integration of archaeological and ethnographic research. *Sbornik nauchnykh trudov* [Proceedings of IrSTU], 2013, vol. 2. 310 p. (In Russian).

4. Chubinskiy A. N., Tambi A. A., Varankina G. S., Fedyaev A. A., Chubinskiy M. A., Shvets V. L., Chauzov K. V. *Fizicheskiye metody ispytaniy drevesiny* [Physical Methods of Testing Wood]. St. Petersburg, SPBGLTU Publ., 2015. 125 p.

5. Birdaro N. The influence of some factors on the acoustic properties of wood. *Lesnoy vestnik MGUL* [Forest Newsletter MGUL], 2013, pp. 112–115 (In Russian).

6. Sergienko Ju. K. *Issledovaniye ul'trazvukovogo metoda obnaruzheniya vnutrenney gnili v kruglykh lesomaterialakh: Avtoref. dis. cand. tekhn. nauk* [Investigation of the ultrasonic method for detecting internal rot in round timber: Abstract of thesis cand. of tech. sci.]. Moscow, 1968. 26 p.

7. Sokolovskiy Ya. I., Kens I. R., Storozhuk O. L., Borisov V. M. Experimental study of the influence of temperature and humidity on the propagation of acoustic waves in wood. *Actual'nyye problemy lesnogo kompleksa: sb. nauch. trudov BGITA* [Actual problems of the forest complex: proceedings BGITA], 2010, pp. 228–235 (In Russian).

8. Sivov Yu. A. Determination of the speed of sound, the modulus of the yung and internal friction by the resonance method. *Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Publishing house of the Tomsk Polytechnic University], 2012. 9 p. (In Russian).

9. Mel'nichuk I. A., Yassin Soliman J. M., Cherdantseva O. A. Diagnosis of the internal state of Tilia Cornada Mill trees with the use of the complex of acoustic ultrasound tomography equipment "Arbotom". *Vestnik RUDN. Ser.: Agronomiya i zhivotnovodstvo* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Ser: Agronomy and Animal Husbandry], 2012, pp. 25–32 (In Russian).
10. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 394 p.
11. GOST 16483.9-73. Wood. Method for determining the modulus of elasticity under static bending. Moscow, Gosstandart SSSR: IPK Izd-vo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).
12. GOST 16483.3-84. Wood. Method for determining the ultimate strength in static bending. Moscow, Gosstandart SSSR: IPK Izd-vo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).
13. GOST 16483.7-71. Wood. Method for determination of humidity. Moscow, Gosstandart SSSR: IPK Izd-vo standartov Publ., 1999. 4 p. (In Russian).
14. Paul E. E., Kukhta V. N. Dependence of the mechanical properties of wood on its density. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and Hunting], 2011, no. 10, pp. 20–23 (In Russian).
15. GOST 16483.1-84. Wood. Method for determining the density. Moscow, Gosstandart SSSR: IPK Izd-vo standartov Publ., 1999. 4 p. (In Russian).

### Информация об авторах

**Федосенко Иван Гаврилович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

**Чесновский Евгений Викторович** – магистрант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: justknowsky\_evgenii@mail.ru

**Мазаник Наталья Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Mazanik\_n\_v@belstu.by

### Information about authors

**Fedosenko Ivan Gavriilovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

**Chesnovskiy Evgeniy Viktorovich** – Master's degree student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: justknowsky\_evgenii@mail.ru

**Mazanik Natall'ia Vladimirovna** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nata.mazanik@mail.ru

Поступила 20.04.2017