

УДК 53.083.2

**И. Г. Федосенко, Е. В. Чесновский**

Белорусский государственный технологический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭХО-МЕТОДА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕВЕСИНЫ ОСНОВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПОРОД**

В статье описывается методика определения и прогнозирования физико-механических и качественных характеристик древесины различных пород, а также элементов древесины различных строительных конструкций при помощи метода неразрушающего контроля.

В зависимости от скорости проходящей звуковой волны, определены качественные характеристики древесины основных строительных пород, произрастающих на территории Республики Беларусь, таких как сосна, ель и береза. Произведена оценка влияния различных качественных характеристик, на скорость прохождения звука через внутреннюю структуру материала.

Полученные модели, связывающие качественные характеристики древесины со скоростью ультразвука, пропущенного через ее структуру, позволяют прогнозировать и оценивать неразрушающим способом со значительной точностью состояние древесины различных пород.

**Ключевые слова:** прогнозирование, древесина, качество, эхо-метод, влажность, плотность, скорость, прочность, модуль упругости, порода.

**I. G. Fedosenko, E. V. Chesnovskii**

Belarussian State Technological University

**APPLICATION OF THE ECHO-METHOD TO PREDICT THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF WOOD OF THE MAIN CONSTRUCTION SPECIES**

The article describes the method of determining and predicting the physico-mechanical and quality characteristics of wood of various species, as well as elements of wood of various building structures, using the method of non-destructive testing.

Depending on the magnitude of the speed of the transmitted sound wave, the qualitative characteristics of the wood of the main construction species growing in the Republic of Belarus, such as pine, spruce and birch, are determined. An assessment was made of the effect of various quality characteristics on the speed of sound through the internal structure of the material.

The resulting models linking the qualitative characteristics of wood with the speed of ultrasound passed through its structure, allow us to predict and evaluate the state of various types of wood with considerable accuracy in a non-destructive way.

**Key words:** forecasting, wood, quality, echo-method, humidity, density, speed, strength, modulus of elasticity, rock.

**Введение.** Древесина является одним из основных строительных материалов. Прогнозирование и оценка качественных характеристик древесины различных пород занимает очень важное место как при строительстве, так и при эксплуатации различных объектов из древесины [1]. При проведении строительных, ремонтных или реставрационных работ оценка качественных характеристик древесины является первоочередной задачей, значительные трудности возникают при отборе образцов для стандартных испытаний на прочность, недостаток информации о физико-механических свойствах древесины может привести к замене части строительной конструкции без полного обоснования утраты ее несущей способности [2].

В настоящий момент ультразвуковой неразрушающий контроль является наиболее мобильным и актуальным для оценки и прогнозирования качественных характеристик древеси-

ны и древесных конструкций. Принцип ультразвукового метода контроля свойств материалов основан на факте, что твердые материалы являются хорошими проводниками звуковых волн [3]. Посредством чего волны отражаются не только от граничных поверхностей, но и от внутренних дефектов (трещины, пустоты, различные включения). Эффект взаимодействия звуковых волн с материалом усиливается по мере уменьшения их длины и, соответственно, увеличения частоты колебаний.

**Основная часть.** С целью определения, прогнозирования и оценки качественных характеристик древесины основных строительных пород, произрастающих на территории Республики Беларусь и прилегающей к ней территории государств-соседей, при помощи скорости проходящего через нее звука был выбран измерительный прибор «Пульсар-2.1» [4]. Прибор позволяет определить прочность, плот-

ность и модуль упругости бетонов, а также звуковой индекс абразивов по предварительно установленным градуировочным зависимостям перечисленных параметров от скорости распространения ультразвуковых импульсов [5].

Работа прибора основана на измерении времени и скорости прохождения ультразвукового импульса в материале изделия от излучателя к приемнику [6]. Измерение скорости распространения ультразвука происходило в двух направлениях: продольном и радиальном.

Работа прибора «Пульсар-2.1» может быть обеспечена [7]:

– при поверхностном прозвучивании, при помощи датчика поверхностного прозвучивания в сборе с коническими насадками на фиксированной базе длиной  $(120 \pm 1)$  мм с сухим контактом;

– при сквозном прозвучивании, при помощи датчика сквозного прозвучивания на произвольной базе с контактной смазкой или поверхностным и угловым прозвучивании с сухим контактом (конусные насадки) [8].

После измерения скорости на тех же образцах были проведены испытания на поперечный изгиб, для расчета модуля упругости [9] по ГОСТ 16484.9-73 [10] и предела прочности по ГОСТ 16483.10-73 [11].

Реальная влажность каждого образца была определена с помощью весового метода по ГОСТ 16483.7-71 [12], а плотность [13] – по ГОСТ 16483.1-84 [14].

В результате дальнейшей проработки полученных данных установлены уравнения регрессионной зависимости скорости распространения звука ( $V$ ) от плотности ( $\rho_6$ ) и влажности ( $W$ ) древесины сосны, ели и березы [15].

Используя представленные выше зависимости, можно легко оценить значение одного из трех входящих в уравнение показателей (скорости звука, плотности и абсолютной влажности древесины), а также спрогнозировать дальнейшее влияние вышеперечисленных качественных характеристик на внутреннюю структуру древесины.

Графические зависимости предела прочности и модуля упругости от скорости проходящего звука в материале представлены в публикации [15].

Ниже представлены уравнения регрессионной зависимости предела прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) от скорости проходящего звука ( $c$ ) для древесины сосны, ели и березы соответственно:

$$\begin{aligned}\sigma_c &= 0,01 \cdot (3,09 \cdot 10^{-3} \cdot c^2 - 8,99 \cdot c - \\ &\quad - 2,18 \cdot 10^{-7} \cdot c^3); \\ \sigma_e &= 0,01 \cdot (11,9 \cdot c - 4,53 \cdot 10^{-3} \cdot c^2 + \\ &\quad + 4,59 \cdot 10^{-7} \cdot c^3); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_6 &= 0,01 \cdot (38,11 \cdot c - 0,015 \cdot c^2 + 1,61 \cdot 10^{-6} \cdot c^3); \\ \sigma &= 0,01 \cdot (2,29 \cdot 10^{-3} \cdot c^2 - 6,28 \cdot c - \\ &\quad - 1,62 \cdot 10^{-7} \cdot c^3); \\ E_c &= 0,001 \cdot (3,56 \cdot 10^{-3} \cdot c^2 - 10,48 \cdot c - \\ &\quad - 2,51 \cdot 10^{-7} \cdot c^3); \\ E_e &= 0,001 \cdot (17,66 \cdot c - 7,19 \cdot 10^{-3} \cdot c^2 + \\ &\quad + 7,53 \cdot 10^{-7} \cdot c^3); \\ E_6 &= 0,001 \cdot (22,99 \cdot c - 9,47 \cdot 10^{-3} \cdot c^2 + \\ &\quad + 1,02 \cdot 10^{-6} \cdot c^3); \\ E &= 0,001 \cdot (2,84 \cdot 10^{-3} \cdot c^2 - 8,12 \cdot c - \\ &\quad - 2,01 \cdot 10^{-7} \cdot c^3). \end{aligned}$$

Зависимости предела прочности, модуля упругости древесины при произвольной влажности ( $W$ ) и базисной плотности ( $\rho_6$ ) от скорости проходящего звука ( $c$ ) описываются следующими формулами:

$$\begin{aligned}\sigma_c &= 0,01 \cdot (1,22 \cdot c - 29,77 \cdot W + 3,34 \cdot \rho_6); \\ \sigma_e &= 0,01 \cdot (1,85 \cdot c - 3,01 \cdot W - 13,34 \cdot \rho_6); \\ \sigma_6 &= 0,01 \cdot (2,41 \cdot c - 33,79 \cdot W - 5,05 \cdot \rho_6); \\ \sigma &= 0,01 \cdot (0,748 \cdot c - 27,42 \cdot W - 8,74 \cdot \rho_6); \\ E_c &= 0,001 \cdot (1,09 \cdot c - 35,84 \cdot W + 6,08 \cdot \rho_6); \\ E_e &= 0,001 \cdot (3,52 \cdot c - 4,17 \cdot W - 38,32 \cdot \rho_6); \\ E_6 &= 0,001 \cdot (1,97 \cdot c - 37,89 \cdot W + 0,409 \cdot \rho_6); \\ E &= 0,001 \cdot (0,499 \cdot c - 36,12 \cdot W + 12,91 \cdot \rho_6). \end{aligned}$$

Во многих литературных источниках для расчета модуля упругости всех видов материалов рекомендовано уравнение линеаризованного вида:  $E = a \cdot \rho \cdot V^2$ , однако в результате исследований во время оценки линеаризованной и полиномиальной моделей было установлено, что полиномиальная модель лучше подходит для определения зависимости модуля упругости древесины от скорости проходящего звука в материале.

Уравнения регрессионной зависимости полинома, которые были получены нами в ходе обработки экспериментальных данных, показывают более точные значения при расчете качественных характеристик древесины отдельных пород по скорости проходящего через нее звука.

Для определения и прогнозирования качественных характеристик древесины основных строительных пород нам необходима скорость проходящего через нее звука, которая, в свою очередь, зависит от плотности. Точное определение плотности зачастую затруднительно и требует частичного разрушения исследуемого материала или конструкции, что недопустимо для неразрушающего определения качественных характеристик.

Поэтому использование полиномиального уравнения для прогнозирования качественных характеристик основных строительных пород по скорости проходящего звука предпочтительней.

**Заключение.** Полученные модели, связывающие физико-механические свойства и каче-

ственные характеристики со скоростью проходящего звука, пропущенного через структуру древесины, позволяют определять и прогнозировать неразрушающим способом со значительной точностью состояние древесины основных строительных пород, произрастающих

на территории Республики Беларусь и прилегающей к ней территории. Также они дают возможность планировать мероприятия по консолидации материала, укреплению материала строительной конструкции или замене утраченного несущую способность элемента.

### Литература

1. Горшин С. Н., Максименко Н. А., Горшина Е. С. Защита памятников деревянного зодчества. М.: Наука, 1992. 279 с.
2. Интеграция археологических и этнографических исследований: сб. науч. тр.: в 2 т. / Ин-т археологии и этнографии. Иркутск, 2013. Т. 2. 310 с.
3. Сергиенко Ю. К. Исследование ультразвукового метода обнаружения внутренней гнили в круглых лесоматериалах: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Моск. лесотехн. ин-т. М., 1968. 26 с.
4. Бирдаров Н. Влияние некоторых факторов на акустические свойства древесины // Лесной вестник. 2013. № 3. С. 112–115.
5. Физические методы испытаний древесины / А. Н. Чубинский [и др.]. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 125 с.
6. Экспериментальное исследование влияния температуры и влажности на распространение акустических волн в древесине / Я. И. Соколовский [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. трудов / Брянск. гос. инженер.-технол. акад. Брянск, 2011. Вып. 30. С. 228–235.
7. Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия: ГОСТ Р 52931-2008. Введ. 01.07.2009. М.: Стандартинформ, 2009. 31 с.
8. Bucur V. Acoustics of Wood. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag Publ., 2006. 394 p.
9. Сивов Ю. А. Определение скорости звука, модуля юнга и внутреннего трения резонансным методом / Томск. политех. ун-т. Томск, 2012. 9 с.
10. Древесина. Метод определения модуля упругости при статическом изгибе: ГОСТ 16483.9-73. Введ. 01.07.74. М.: Изд-во стандартов, 1974. 7 с.
11. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе: ГОСТ 16483.3-84. Введ. 01.07.85. М.: Изд-во стандартов, 1985. 7 с.
12. Древесина. Метод определения влажности: ГОСТ 16483.7-71. Введ. 01.01.73 М.: Издательство стандартов, 1973. 4 с.
13. Пауль Э. Э., Кухта В. Н. Зависимость механических свойств древесины от ее плотности // Лесное и охотничье хозяйство. 2011. № 10. С. 20–23.
14. Древесина. Метод определения плотности: ГОСТ 16483.1-84. Введ. 01.07.85. М.: Изд-во стандартов, 1985. 7 с.
15. Федосенко И. Г., Чесновский Е. В., Мазаник Н. В. Разработка неразрушающего метода оценки состояния древесины конструкций исторических памятников // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2. С. 273–278.

### References

1. Gorshin S. N., Maksimenko N. A., Gorshina Ye. S. *Zashchita pamyatnikov derevyannogo zodchestva* [Protecting monuments of wooden architecture]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 279 p.
2. *Integratsiya arkhologicheskikh i etnograficheskikh issledovaniy: sbornik nauchnykh трудов: v 2 tomakh* [Integration of archaeological and ethnographic research: collection of scientific papers: in 2 vol.]. Irkutsk, 2013, vol. 2. 310 p.
3. Sergienko Yu. 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. techn. sci.]. Moscow, 1968. 26 p. (In Russian).
4. Birdarov N. The influence of some factors on the acoustic properties of wood. *Lesnoy vestnik* [Forest Newsletter], 2013, no. 3, pp. 112–115 (In Russian).
5. Chubinskiy A. N., Tambi A. A., Varankina G. S., Fedyayev 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.
6. 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. *Sbornik nauchnykh трудов: "Actual'nyye problemy lesnogo kompleksa"* [Proceedings of scientific papers "Actual problems of the forest complex"]. Bryansk, 2011, issue 30, pp. 228–235 (In Russian).

7. GOST R 52931-2008. Devices for control and regulation of technological processes. General specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 31 p. (In Russian).
8. Bucur V. Acoustics of Wood. Berlin; Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2006. 394 p.
9. Sivov Yu. A. *Opredeleniye skorosti zvuka, modul'ia yunga i vnytrennego trenia rezonansnym metodom* [Determination of the speed of sound, the modulus of the yung and internal friction by the resonance method]. Tomsk, 2012. 9 p.
10. GOST 16483.9-73. Wood. Method for determining the modulus of elasticity under static bending. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1974. 7 p. (In Russian).
11. GOST 16483.3-84. Wood. Method for determining the ultimate strength in static bending. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985. 7 p. (In Russian).
12. GOST 16483.7-71. Wood. Method for determination of humidity. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1973. 4 p. (In Russian).
13. Paul E. E., Kukhta V. N. Dependence of the mechanical properties of wood on its density. *Lesnoye i ohotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and Hunting], 2011, no. 10, pp. 20–23 (In Russian).
14. GOST 16483.1-84. Wood. Method for determining the density. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985. 4 p. (In Russian).
15. Fedosenko I. G., Chesnovskii E. V., Mazanik N. V. Development of a nondestructive method for assessing the state of timber constructions of historical monuments. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources. 2017, no. 2, pp. 273–278 (In Russian).

#### Информация об авторах

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

#### Information about the authors

**Fedosenko Ivan Gavriilovich** – PhD (Engineering), 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

**Chesnovskii Evgenii Viktorovich** – PhD student, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: justknowsky\_evgenii@mail.ru

Поступила 11.03.2019