

УДК 53.083.2

И. Г. Федосенко, Е. В. Чесновский

Белорусский государственный технологический университет

**МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА
СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПОСТРОЕК**

В статье описывается методика определения физико-механических свойств деградированной археологической древесины и элементов древесины исторических построек неразрушающим методом ультразвуковой диагностики без разборки постройки.

Рассматриваются средства измерений и вспомогательные устройства, рекомендации по предварительной подготовке области в месте проведения измерений, проведению измерений необходимых параметров и непосредственное определение физико-механических параметров археологической древесины.

Приведены формулы для оценки степени разрушенности структуры деревянного элемента конструкции. Предложена классификация древесины сосны по степени деградации в зависимости от плотности и трещиноватости (пористости).

Установление степени разрушенности структуры деревянного элемента и класса деградации исторических построек позволит планировать мероприятия по консолидации материала, укреплению конструкции или замене утратившего несущую способность элемента.

Ключевые слова: древесина, ультразвук, влажность, плотность, скорость, прочность, модуль упругости, классификация, постройка, пористость.

I. G. Fedosenko, E. V. Chesnovskiy

Belarusian State Technological Univesity

**METHODOLOGY OF OPERATIONAL ANALYSIS
OF WOODEN CONSTRUCTION CONDITION**

The article describes the technique for determining the physical and mechanical properties of degraded archaeological wood and wood elements of historic buildings, a non-destructive method of ultrasonic diagnostics without disassembling the building.

Measuring tools and auxiliary devices, recommendations for preliminary preparation of the area at the place of measurement, recommendations for measuring the necessary parameters and direct determination of the physical and mechanical parameters of archaeological wood are given.

Formulas are given for estimating the degree of destruction of the structure of a wooden structural element. The classification of pine wood is proposed, according to the degree of degradation, depending on the density and fracturing (porosity).

Determination of the degree of destruction of the structure of the wooden element and the class of degradation of historical buildings will allow planning activities for consolidating the material, strengthening the structure or replacing the missing element.

Key words: wood, ultrasound, moisture, density, speed, strength, modulus of elasticity, classification, construction, porosity.

Введение. Сохранение памятников исторического и культурного наследия является одной из ключевых проблем современности. Мировое культурное наследие, неотъемлемой частью которого являются памятники деревянного зодчества, может быть не потеряно, если будут приняты неотложные меры по его сохранению [1].

При проведении реставрационных и ремонтных работ оценка качества древесины исторических построек является первоочередной задачей [2]. Для этого необходима информация об изменении физико-механических свойств исторической древесины, получение которой влечет за собой отбор образцов, например, для проведения стандартных испытаний на прочность и плотность, что является разрушающим

и необратимым мероприятием для исторических построек.

Методы неразрушающего контроля позволяют определять прочность конструкций без ослабления сечения и снижения несущей способности материала. К неразрушающим методам контроля относятся механические (ударные, отрыва, скалывания) и ультразвуковые способы [3].

Ультразвуковые способы используются для определения прочности хрупких и нехрупких материалов [4]. Оценка прочности конструкций производится по скорости распространения звука в материале при помощи ультразвуковых приборов [5].

Изменение скорости распространения ультразвуковых колебаний в элементах древесины

исторических построек может дать нам информацию о многих физико-механических параметрах, не разрушая при этом исторические памятники.

Основная часть. С целью выяснить зависимость основных физико-механических показателей древесины от скорости прохождения через нее звука был выбран измерительный прибор Пульсар-2.1, который позволяет 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].

Работа Пульсар-2.1 основана на измерении времени и скорости прохождения ультразвукового импульса в материале изделия от излучателя к приемнику. Осуществлялось сквозное прозвучивание образцов с использованием геля и сухим контактом (конусные насадки). Измерение скорости распространения ультразвука происходило в двух направлениях: продольном и радиальном [7].

После измерения скорости на тех же образцах были проведены испытания на поперечный изгиб, для расчета модуля упругости [8] по ГОСТ 16484.9-73 [9] и предела прочности по ГОСТ 16483.10-73 [10].

Реальная влажность каждого образца была определена с помощью весового метода ГОСТ 16483.7-71 [11], а плотность [12] по ГОСТ 16483.1-84 [13].

По полученным данным установлены уравнения регрессионной зависимости скорости распространения звука (V) от плотности (ρ_6) и влажности (W) древесины сосны, ели и березы [14].

Также получены уравнения регрессии зависимости предела прочности (σ), модуля упругости (E) и плотности (ρ) от скорости распространения ультразвука в продольном волокнам направлении, для тех же пород.

Получены уравнения регрессионной зависимости предела прочности (σ) и модуля упругости (E) от скорости распространения ультразвука в радиальном направлении к волокнам, влажности (W) и плотности (ρ_6). Для древесины сосны, ели и берез предел прочности можно определить как:

$$\sigma_c = -23,176 - 0,319 \cdot W + 0,027 \cdot V_p + 0,125 \cdot \rho_6; \quad (1)$$

$$\sigma_e = -99,824 - 0,057 \cdot W + 0,043 \cdot V_p + 0,204 \cdot \rho_6; \quad (2)$$

$$\sigma_6 = -9,031 - 0,518 \cdot W + 0,069 \cdot V_p - 0,029 \cdot \rho_6; \quad (3)$$

$$\sigma = -23,759 - 0,278 \cdot W + 0,034 \cdot V_p + 0,091 \cdot \rho_6; \quad (4)$$

$$E_c = -5,209 - 0,036 \cdot W + 0,003 \cdot V_p + 0,019 \cdot \rho_6; \quad (5)$$

$$E_e = -22,655 - 0,009 \cdot W + 0,008 \cdot V_p + 0,036 \cdot \rho_6; \quad (6)$$

$$E_6 = -1,763 - 0,052 \cdot W + 0,006 \cdot V_p + 0,003 \cdot \rho_6; \quad (7)$$

$$E = -5,906 - 0,033 \cdot W + 0,004 \cdot V_p + 0,014 \cdot \rho_6. \quad (8)$$

В результате разработана методика для определения физико-механических свойств деградированной археологической древесины и элементов исторических построек неразрушающим методом ультразвуковой диагностики.

При проведении измерений физико-механических свойств материала конструкции могут применяться следующие средства измерений и вспомогательные устройства: измеритель времени и скорости распространения ультразвука Пульсар 2.1 по ГОСТ Р 52931-2008 [15]; игольчатый влагомер Gann Compact S; столярный инструмент, необходимый для вскрытия поверхности деревянных элементов исторических построек.

В местах, где наблюдается большая влажность древесины, разрушения от различных внешних факторов или от воздействия веса конструкции, необходимо производить контроль свойств древесины. Это связано с тем, что места риска определяют общую устойчивость конструкции и выбор мероприятий по реконструкции.

К элементам конструкции может быть ограничен доступ в случаях, когда постройки ранее были покрыты штукатуркой или иной обшивкой.

В случае открытой конструкции не требуется принимать никаких дополнительных мер по доступу к элементам конструкции.

Если историческая постройка покрыта вагонной доской или любым другим материалом, то доступ к ней можно получить различными способами: при помощи ручного столярного инструмента либо при помощи электромеханического инструмента для обеспечения доступа измерительной вилки прибора Пульсар 2.1. Если же вагонная доска очень длинных размеров или ее затруднительно отрывать от конструкции, необходимо просверлить отверстия диаметром 50 мм на расстоянии друг от друга 100 мм, для того чтобы можно было подать конические наконечники к элементу конструкции.

У датчика поверхностного прозвучивания есть ограничения по высоте измерения. От кончиков конических наконечников до самого корпуса датчика будет равна 50 мм. В некото-

рых случаях необходимо получить доступ к элементу конструкции с большим диаметром отверстия, около 250 мм, для полного погружения измерительной вилки (рис. 1).

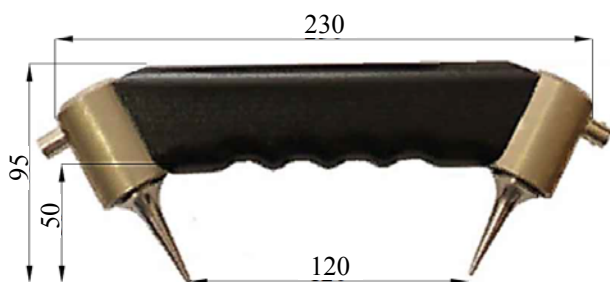


Рис. 1. Общий вид измерительной вилки прибора Пульсар 2.1

Штукатурка может убираться сверлением отверстий диаметром 50 мм на минимальном расстоянии друг от друга 100 мм, для того чтобы можно было приложить конические наконечники к элементу конструкции либо разрушить штукатурку во всей области измерения, но в случае со штукатуркой это необязательно.

На рис. 2 представлена схема разрушения поверхности, ограничивающей доступ к поверхности элемента постройки.

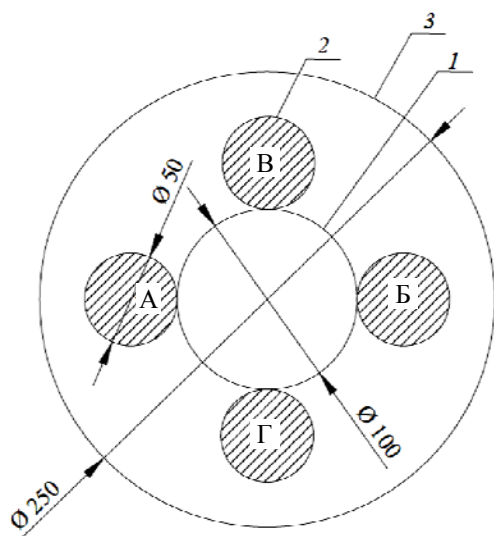


Рис. 2. Схема разрушения поверхности:

- 1 – минимальный диаметр окружности, на котором можно замерять скорость звука при помощи измерительной вилки;
- 2 – отверстие, необходимое для прохождения конических наконечников измерительной вилки прибора;
- 3 – окружность, которую нужно получить в случае необходимости полного доступа измерительной вилки прибора к элементу конструкции;
- А, Б – отверстия для измерения скорости распространения звука только в продольном направлении;
- В, Г – отверстия для измерения скорости распространения звука в продольном и тангенциальном направлении

При необходимости контроля датчиками на произвольном расстоянии (отличном от базы измерения – 120 мм) необходимо:

- присоединить датчики сквозного прозвучивания и надеть на них конические насадки;
- просверлить отверстия в любом месте доступа к элементу конструкции;
- измерить расстояние между точками приложения концов конических насадок;
- внести измеренное расстояние в пункт меню прибора «База измерения»;
- выбрать метод сквозного прозвучивания и измерить необходимые параметры.

Для измерения скорости распространения ультразвука при помощи метода сквозного прозвучивания к прибору подключаются датчики сквозного прозвучивания. Измеряется длина (база) контролируемой поверхности конструкции, это может быть, например, диаметр бревна, толщина или длина доски, толщина или длины бруса и др. Ввести значения в пункт главного меню прибора «База измерения» с точностью до 1 мм. В пункт меню прибора «Количество измерений» необходимо задать серию от 1 до 10 измерений. В случае измерения скорости без конических насадок техническая смазка наносится на рабочие плоскости датчиков сквозного прозвучивания.

Далее перейти в режим измерения. Установить датчики соосно по линии прозвучивания на противоположных сторонах контролируемого элемента конструкции и датчики прижать, притирая к поверхности элемента конструкции.

Контролируя на дисплее прибора измеряемое время T , мкс, и скорость V , м/с, распространения ультразвукового импульса, убедиться в стабильности показаний и при отклонениях показаний времени на 0,1–0,2 мкс от установившегося значения нажать клавишу, зафиксировав в памяти единичный замер. При завершении серии прибор выдаст результат измерения – средние значения времени распространения ультразвукового импульса, средние значения скорости распространения ультразвукового импульса.

Для измерения скорости распространения ультразвука при помощи метода поверхностного прозвучивания к прибору присоединяется измерительная вилка, представленная на рис. 1.

Методика измерения аналогична сквозному прозвучиванию, но при измерении скорости этим методом необходимо в меню прибора задать режим измерения «Поверхностное прозвучивание» и задать новую базу измерения, равную расстоянию между концами конических наконечников (120 мм). Так же, применяя этот метод, необходимо пользоваться схемой, представленной на рис. 2.

После нахождения скорости прохождения звука в археологической древесине нужно узнать ее текущую влажность при помощи игольчатого влагомера Gann Compact S. Получив эти два параметра, необходимо вычислить физико-механические характеристики.

Для определения плотности археологической древесины исторических построек нужно пользоваться следующими зависимостями:

– для ядровых пород, таких как сосна:

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

– для безъядровых пород, таких как ель:

$$\rho_e = 3557,919 - 0,809 \cdot V + 4,567 \cdot V^2; \quad (10)$$

– для лиственных пород, таких как береза:

$$\rho_b = 2242,684 - 0,024 \cdot V - 4,925 \cdot V^2; \quad (11)$$

– в случае невозможности установления породы элемента постройки:

$$\rho = 5757,096 - 1,524 \cdot V - 0,00011 \cdot V^2, \quad (12)$$

где ρ_c – плотность древесины сосны, кг/м³; ρ_e – плотность древесины ели, кг/м³; ρ_b – плотность древесины березы, кг/м³; ρ – обобщенная плотность для всех пород, кг/м³; V – скорость распространения звука вдоль волокон для всех пород, м/с.

Модуль упругости для выбранного элемента конструкции рассчитывается по следующим формулам:

– для ядровых пород, таких как сосна:

$$E_c = 3,469 \cdot 10 - 10 \cdot \rho_c \cdot V^2; \quad (13)$$

– для безъядровых пород, таких как ель:

$$E_e = 3,469 \cdot 10 - 10 \cdot \rho_e \cdot V^2; \quad (14)$$

– для лиственных пород, таких как береза:

$$E_b = 3,469 \cdot 10 - 10 \cdot \rho_b \cdot V^2; \quad (15)$$

– в случае невозможности установления породы элемента постройки:

$$E = 3,469 \cdot 10 - 10 \cdot \rho \cdot V^2, \quad (16)$$

где E_c , E_e , E_b – модуль упругости для древесины сосны, ели, березы соответственно, м/с; E – обобщенный модуль упругости для всех пород, м/с.

Получив значения плотности исследуемых элементов исторических построек, нужно определить их базисную плотность по диаграмме для определения базисной плотности древесины.

Предел прочности для археологической древесины выбранного элемента конструкции рассчитывается по следующим формулам:

– для ядровых пород, таких как сосна:

$$\sigma_c = 14,090 + 8,72 \cdot E_c - 0,01 \cdot \rho_c; \quad (17)$$

– для безъядровых пород, таких как ель:

$$\sigma_e = 23,488 + 5,506 \cdot E_e - 0,00036 \cdot \rho_e; \quad (18)$$

– для лиственных пород, таких как береза:

$$\sigma_b = 13,548 + 9,077 \cdot E_b - 0,01 \cdot \rho_b; \quad (19)$$

– в случае невозможности установления породы элемента постройки:

$$\sigma = 18,709 + 7,898 \cdot E - 0,008 \cdot \rho, \quad (20)$$

где σ_c , σ_e , σ_b – предел прочности для древесины сосны, ели, березы соответственно, м/с; σ – обобщенный предел прочности любой породы, м/с.

Произвести оценку степени разрушенности структуры деревянного элемента конструкции по следующим формулам:

$$C_{д.рб} = \frac{\rho_{б.этал} - \rho_{б.арх}}{\rho_{б.этал}} \cdot 100\%; \quad (21)$$

$$C_{д.т} = \frac{S_{\Sigma}}{L_{баз}} \cdot 100\%, \quad (22)$$

где $C_{д.рб}$ – степень деградации древесины по базисной плотности, %; $C_{д.т}$ – степень деградации древесины по трещиноватости, %; $\rho_{б.этал}$ – базисная плотность эталонной древесины, кг/м³; $\rho_{б.арх}$ – базисная плотность археологической древесины, кг/м³; $L_{баз}$ – длина базы измерения прибора, мм; S_{Σ} – суммарная ширина трещи на измеряемом участке $L_{баз}$, мм.

Эталонной называют древесину, которая принимается за эталон для археологической древесины, т. е. если порода археологической древесины это сосна, тогда базисная плотность эталонной древесины будет базисной плотностью здоровой древесины сосны.

По полученным результатам необходимо классифицировать объект по степени деградации в зависимости от плотности и трещиноватости (пористости).

Степень деградации объекта будет оцениваться по уменьшению плотности археологической древесины, в сравнении с плотностью здоровой (эталонной) древесины той же породы:

- от 0 до 20% – I класс деградации;
- от 20 до 25% – II класс деградации;
- от 25 до 33% – III класс деградации;
- от 33 до 47% – IV класс деградации;
- выше 47% – V класс деградации.

Степень деградации объекта по трещиноватости будет оцениваться по усредненному значению суммарной ширины трещин на измеряемом участке археологической древесины:

- от 0 до 3% – I класс деградации;
- от 3 до 4% – II класс деградации;
- от 4 до 5% – III класс деградации;
- от 5 до 9% – IV класс деградации;
- 9% – V класс деградации.

Таким образом, при принятии решений по реставрации объекта для классов I и II, достаточно использовать огне- и биозащитные со-

ставы. Для классов III, IV, V необходимо укреплять структуру, т. е. использовать полимерные составы.

Заключение. Разработанная методика определения физико-механических свойств древесины исторических построек позволяет при помощи ранее полученных моделей, связываю-

щих физико-механические свойства со скоростью ультразвука, оценивать неразрушающим способом со значительной точностью состояние древесины конструкции и планировать мероприятия по консолидации материала, укреплению конструкции или замене утратившего несущую способность элемента.

Литература

1. Горшин С. Н., Максименко Н. А., Горшина Е. С. Защита памятников деревянного зодчества. М.: Наука, 1992. 279 с.
2. Корусенко М. А., Тихонов С. С., Харинский А. В. Интеграция археологических и этнографических исследований: сборник научных трудов: в 2 т. Иркутск: ИрГТУ, 2013. Т. 2. 310 с.
3. Физические методы испытаний древесины / А. Н. Чубинский [и др.]. СПб.: Санкт-Петербург, ГЛТУ, 2015. 125 с.
4. Бирдаро Н. Влияние некоторых факторов на акустические свойства древесины // Лесной вестник МГУЛ, 2013. С. 112–115.
5. Сергиенко Ю. К. Исследование ультразвукового метода обнаружения внутренней гнили в круглых лесоматериалах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 205.21.01. М., 1968. 26 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. тр. БГИТА. Брянск, 2011. Вып. 30. С. 228–235.
7. Bucur V. Acoustics of Wood. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Publ., 2006. 394 p.
8. Сивов Ю. А. Определение скорости звука, модуля юнга и внутреннего трения резонансным методом. Томск: Томский политехнический университет, 2012. 9 с.
9. Древесина. Метод определения модуля упругости при статическом изгибе: ГОСТ 16483.9-73. Введ. 01.07.74. М.: Издательство стандартов, 1999. 7 с.
10. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе: ГОСТ 16483.3-84. Введ. 01.07.85. М.: Издательство стандартов, 1999. 7 с.
11. Древесина. Метод определения влажности: ГОСТ 16483.7-71. Введ. 01.01.73. М.: Издательство стандартов, 1999. 4 с.
12. Пауль Э. Э., Кухта В. Н. Зависимость механических свойств древесины от ее плотности // Лесное и охотничье хозяйство. 2011. № 10. С. 20–23.
13. Древесина. Метод определения плотности: ГОСТ 16483.1-84. Введ. 01.07.85. М.: Издательство стандартов, 1999. 7 с.
14. 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.
15. Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия: ГОСТ Р 52931-2008. Введ. 01.07.2009 М.: Стандартинформ, 2009. 31 с.

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. Korusenko M. A., Tikhonov S. S., Kharinsky A. V. *Integratsiya arkheologicheskikh i etnograficheskikh issledovaniy. Sbornik nauchnykh trudov: v 2 tomakh* [Integration of archaeological and ethnographic research]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2013. Vol. 2. 310 p.
3. Chubinskiy A. N., Tambi A. A., Varankina G. S., Fedyaev A. A., Chubinskiy M. A., Shvets V. L., Chauzov K. V. *Fizicheskie metody ispytaniy drevesiny* [Physical Methods of Testing Wood], St. Petersburg, Sankt-Peterburg Publ., GLTU Publ., 2015. 125 p.
4. Birdaro N. The influence of some factors on the acoustic properties of wood. *Lesnoy vestnik MGUL* [Proceedings of MGUL], 2013, pp. 112–115 (In Russian).
5. Sergienko Yu. K. *Issledovanie 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).
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 trudov:*

Actual'nye problemy lesnogo kompleksa [Proceedings of BGITA: Actual problems of the forest complex], 2010, pp. 228–235 (In Russian).

7. Bucur V. Acoustics of Wood. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2006. 394 p.

8. Sivov Yu. A. *Opreделение skorosti zvuka, modulya yunga i vnytrennego treniya rezonansnym metodom* [Determination of the speed of sound, the modulus of the yung and internal friction by the resonance method]. Tomsk, TPU Publ., 2012. 9 p.

9. GOST 16483.9-73. Wood. Method for determining the modulus of elasticity under static bending. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

10. GOST 16483.3-84. Wood. Method for determining the ultimate strength in static bending. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

11. GOST 16483.7-71. Wood. Method for determination of humidity. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 4 p. (In Russian).

12. Paul E. E., Kukhta V. N. Dependence of the mechanical properties of wood on its density. *Lesnoe i ohotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and Hunting], 2011, no. 10, pp. 20–23 (In Russian).

13. GOST 16483.1-84. Wood. Method for determining the density. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 4 p. (In Russian).

14. Fedosenko I. G., Chesnovskii E. V., Mazanik N. V. Development of a nondestructive method for assessing the state of timber constructions of historical monuments. *TrudyBGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature Management and Processing of Renewable Resources. Minsk, 2017, no. 2, pp. 273–278 (In Russian).

15. GOST P 52931-2008. Devices for control and regulation of technological processes. General specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 31 p. (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

Chesnovskiy Evgeniy 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 05.03.2018