

УДК 674.061

**И. К. Божелко**

Белорусский государственный технологический университет

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КОМБИНИРОВАННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ**

На железных дорогах до сих пор широко применяют деревянные шпалы и брусья в силу ряда их преимуществ перед другими. Помимо всего прочего, использование изделий и конструкций из древесины взамен железобетонным позволяет существенно снизить мировые выбросы CO<sub>2</sub>. Основными проблемами производства деревянной шпалопродукции являются сложности проведения сушки толстомерного материала до предпропиточной влажности и его глубокой равномерной пропитки антисептиком. Однако наиболее острой проблемой является необходимость использования дефицитного высококачественного древесного сырья больших диаметров (свыше 26 см). В данной работе рассматриваются альтернативные решения цельной шпалы – комбинированные шпалы. Для оценки полученных конструкций были проведены расчеты модели, учитывающей анизотропию древесины, усушку, разбухание и прилагаемую нагрузку с использованием метода конечных элементов. Оценка напряженно-деформированного состояния деревянной шпалы производилась по относительным напряжениям Хилла. Выполненные расчеты показали целесообразность применения комбинированных шпал в железнодорожном хозяйстве. В подтверждение расчетным данным проведены полномасштабные испытания полученных деревянных конструкций по определению предела прочности при статическом изгибе и предела прочности клевого соединения. Разрушающая нагрузка клееной шпалы составила 144,5 кН, составной – 142,8 кН, цельной – 135,1 кН. Среднее значение предела прочности клевого соединения составило 5,9 МПа. Данные показатели превосходят требуемые стандартом значения.

**Ключевые слова:** комбинированная шпала, модель, напряженно-деформированное состояние, критерий Хилла, прочность, аутогезия.

**I. K. Bozhelko**

Belarusian State Technological University

**PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES  
OF COMBINED WOODEN SLEEPERS**

Wooden sleepers and bars are still widely used due to a number of their advantages over others on the railways. Using of wood products and structures in place of reinforced concrete can significantly reduce the global emissions of CO<sub>2</sub>. The main problems in the production of wooden sleepers are the difficulty of drying the thick material to pre-impregnation moisture and its deep uniform impregnation with the wood preservative. However, the most acute problem is the need to use scarce high-quality wood raw materials of large diameters (over 26 cm). In this paper, we consider alternative solutions for solid sleepers – combined sleepers. Calculations were made to evaluate the designs. The model takes into account the anisotropy of the wood, shrinkage, swelling and applied load using the finite element method. The stress-strain state of the wooden sleepers was estimated from the relative strains of Hill. The performed calculations showed the purposeful application of combined sleepers in the railway industry. In confirmation of the calculated data, full-scale tests of the obtained wooden structures were made. They determined the ultimate strength at static bending and the strength of the adhesive joint. The breaking load of the glued sleepers was 144.5 kN, the composite – 142.8 kN, the whole – 135.1 kN. The average value of the strength of the adhesive bond was 5.9 MPa. These figures are higher than the required values.

**Key words:** combined sleeper, model, stress-strain state, Hill's criterion, strength, autohesion.

Введение. Широкое использование изделий и конструкций из древесины снижает «парниковый эффект» и благотворно влияет на экологию на Земле. По подсчетам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН хранение углерода деревянными изделиями фактически компенсирует все выбросы парниковых газов, связанных с их производством. Ученые из Йельской школы лесного хозяйства и экологических исследований и Университета Вашинг-

тонского Колледжа окружающей среды подсчитали, что использование большего количества дерева и меньшего – стали и бетона в строительстве позволяет существенно сократить глобальные выбросы углекислого газа и потребление ископаемого топлива [1]. Так 14–31% мировых выбросов CO<sub>2</sub> можно избежать путем предотвращения выбросов, связанных со сталью и бетоном; путем сохранения CO<sub>2</sub> в целлюлозе и лигнине в деревянных изделиях и конструкциях,

а 12–19% годового мирового потребления ископаемого топлива может быть сэкономлено путем использования отходов древесины.

Все это является неоспоримым преимуществом производства и использования конструкций и изделий из древесины, в том числе и деревянной шпалопродукции, перед железобетонными [2].

Основная часть. Деревянные шпалы изготавливаются по ГОСТ 78–2014 [3]:

шпала 1-го типа, пропитанная – используется для главных путей;

шпала 2-го типа, пропитанная – используется для подъездных и станционных путей.

Шпалы из дерева подразделяются на три вида:

– обрезные (отесанные со всех четырех сторон);

– полуобрезные (отесанные только с трех сторон);

– необрезные (отесанные только сверху и снизу).

Наибольшее распространение и применение на сегодняшний день получили обрезные шпалы 2-го типа.

Порода древесины для шпал может быть разная. В европейских странах предпочитают бук и дуб. В Республике Беларусь и Российской Федерации наибольшее распространение получила древесина хвойных пород, преимущественно сосна. Такие шпалы более подвержены механическому износу, но имеют значительно меньшую стоимость.

Для предотвращения преждевременного гниения обязательно проводят пропитку шпал [4, 5, 6]. На данный момент разработаны и используются экологически безопасные способы автоклавной обработки древесины, эксплуатируемой в тяжелых условиях в контакте с водой и почвой [7, 8].

Основными проблемами производства деревянной шпалопродукции являются:

1. Сложность проведения сушки толстомерного материала до предпропиточной влажности. В настоящее время используется исключительно атмосферная сушка на открытых площадках, характеризующаяся большой длительностью, сезонностью, а также большими потерями древесины от растрескивания (особенно торцов шпал), «замораживанием» оборотных средств в зимний период [9].

2. Сложность осуществления глубокой и равномерной пропитки антисептиком. Ситуация существенно улучшается путем применения специального наколочного оборудования [10]. Однако даже в этом случае не достигается сквозной пропитки древесины.

3. Необходимость использования высококачественного древесного сырья больших диаметров (свыше 26 см). Особенно остро пробле-

ма нехватки такого сырья стоит ввиду сокращения сырьевой базы высокосортного леса в возрасте 80–100 лет.

В связи с дефицитом крупномерной древесины объемы производства цельных шпал из года в год сокращаются, а их стоимость постоянно увеличивается. Возможным решением проблемы дефицита толстомерного сырья, необходимого для производства цельных деревянных шпал, может стать производство составных деревянных шпал [11–13].

В данной работе рассматриваются альтернативные решения цельной шпалы – комбинированные шпалы. В первом случае шпала представляет конструкцию в виде трех брусков, склеенных между собой резорциновым клеем ФРФ-50 в вертикальной плоскости (рис. 1).



Рис. 1. Комбинированная клееная шпала

Использованные режимы склеивания представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры склеивания шпалы с использованием клея ФРФ-50**

Показатель	Значение
Порода древесины	Сосна
Вязкость клея по ВЗ-4, с	65
Расход клея, г/м <sup>2</sup>	200
Время открытой выдержки, мин	7
Давление склеивания, МПа	0,4
Продолжительность закрытой выдержки под давлением, ч	10
Температура склеивания, °С	20 ± 2

Во втором случае комбинированная шпала собрана из двух цельных деревянных брусков, соединенных между собой в горизонтальной плоскости болтами (рис. 2).

Для оценки полученных конструкций была получена модель, учитывающая анизотропию древесины, усушку и разбухание с использованием метода конечных элементов [14–17].

Оценка напряженно-деформированного состояния деревянной шпалы производилась по относительным напряжениям Хилла. Использование критерия прочности Хилла позволяет четко отслеживать эволюцию разрушения шпалы в зависимости от прогиба по полю пластических деформаций (рис. 3).



Рис. 2. Комбинированная сборная шпала

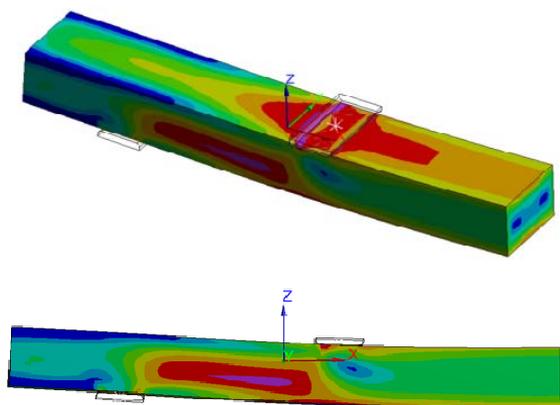


Рис. 3. Напряженное состояние шпалы по критерию Хилла в момент разрушения при статическом четырехточечном изгибе

На рисунке хорошо видна область больших напряжений в зоне смятия (под подкладкой). Кроме того, отчетливо видна область возникновения сдвиговой трещины в срединной плоскости шпалы (на рис. 4).

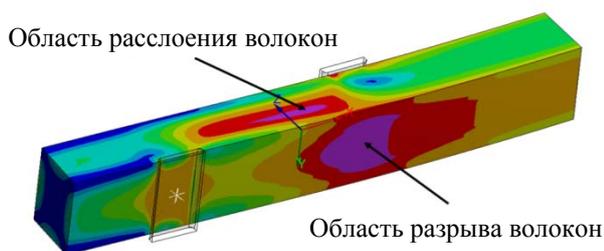


Рис. 4. Локализация зон разрушения в шпале

Моделирование показывает, что разрушение шпалы при 4-точечном изгибе (основное требование для деревянных шпал в соответствии с ГОСТ 28469-90 [18]) сопровождается разрывом волокон в зоне растяжения (под давящей пластиной, см. рис. 4) и расслоением волокон срединной области шпалы.

Выполненный расчет напряженного деформированного состояния клееной и составной шпал при различных влажностных перепадах и нагрузках показал возможность их использования в реальных путевых условиях.

Целесообразность полученных деревянных конструкций также подтверждена полномасштабными испытаниями. Для этого были проведены испытания по определению предела прочности при статическом изгибе цельной, составной и клееной шпал 2-го типа в соответствии с ГОСТ 28469-90.

Испытание шпал на статический изгиб проводили до пропитки. Время от момента производства клееных шпал и до начала их испытательного состава было более 10 сут, в течение которых они хранились при температуре  $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $(65 \pm 5)\%$ . Испытаниям были подвергнуты по три шпалы каждого типа из одной партии. Схема приложения нагрузки приведена на рис. 5.

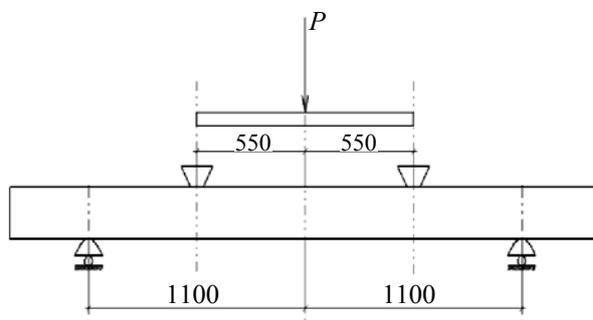


Рис. 5. Схема приложения нагрузки

Нагрузка была приложена на пласт шпалы так, чтобы ее направление было параллельно пластам слоев. В местах приложения нагрузки, а также на опорах были уложены стальные подкладки размерами  $290 \times 160 \times 10$  мм. Во избежание перерезания волокон края подкладок, обращенные к древесине, были закруглены. Скорость нагружения обеспечивала достижение максимальной нагрузки 120 кН в течение 120 с. Контрольную нагрузку поддерживали постоянной в течение 10 мин. В соответствии с ГОСТ 28469-90 шпалы считаются выдержавшими испытание на статический изгиб, если они выдерживают контрольную нагрузку 120 кН без образования новых трещин и увеличения размеров отмеченных трещин и несклеенных участков.

Таблица 2

## Результаты испытаний деревянных шпал на статический изгиб

Образец	Фактические размеры сечения, мм	Влажность, %	Нагрузка, кН	Модуль упругости, ГПа	Максимальная нагрузка, кН
Цельная шпала	230×161	20,7	22,0	10,4	135,1
Составная шпала	226×157	20,0	22,0	11,3	142,8
Клееная шпала	240×163	20,5	22,0	13,2	144,5

Все образцы шпал выдержали испытание. После этого испытания определялась разрушающая нагрузка при статическом изгибе для каждого типа шпал. Полученные физико-механические показатели представлены в табл. 2. Наибольшие нагрузки в 144,5 и 142,8 кН потребовались для разрушения клееных и составных шпал соответственно. Для цельных шпал она составила 135,1 кН. Характер разрушения шпал представлен на рис. 6–8.



Рис. 6. Разрушение цельной шпалы



Рис. 7. Разрушение составной шпалы

Потери несущих способностей образцов цельной и составной шпал произошли вследствие разрыва поперек волокон и раскалывания вдоль волокон древесины в зоне чистого изгиба. Образец клееной шпалы разрушился по сучку крайнего слоя в зоне чистого изгиба.

Таким образом, при сравнении рис. 3, 4 и 5, 6, 7 видно, что зоны разрушения шпал, определенные с помощью моделирования, полностью согласуются с данными натурных испытаний.

Помимо определения предела прочности при статическом изгибе для образцов клееных шпал были проведены испытания по определению предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины в соответствии с ГОСТ 33120-2014 [19].



Рис. 8. Разрушение клееной шпалы

Сущность метода заключается в приложении усилия к единичному клеевому соединению при продольном сжатии (параллельно волокнам древесины). Форма и размеры образцов для испытаний показаны на рис. 9.

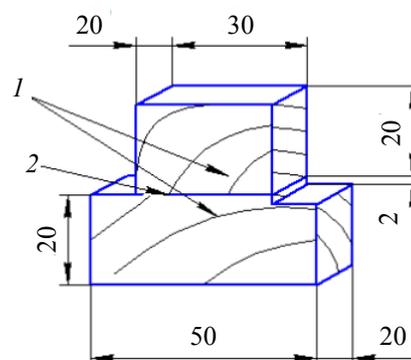


Рис. 9. Образец для определения прочности клеевых соединений:  
1 – деревянные ламели; 2 – клеевой шов

Таблица 3

**Результаты испытаний по определению предела прочности клевого соединения при скалывании вдоль волокон деревянных клееных шпал**

Среднее значение влажности образцов, %	Расход клея, г/м <sup>2</sup>	Площадь разрыва $S$ , мм <sup>2</sup>	Среднее значение разрушающей нагрузки $P$ , кН	Среднее значение предела прочности клевого соединения $\sigma$ , МПа
20	200	600	3540	5,9

Приспособление с установленным в нем образцом помещали на опорную платформу испытательной машины таким образом, чтобы ось пуансона приспособления совпадала с осью нагружающего устройства испытательной машины. Образцы нагружали непрерывно при скорости перемещения нагружающей головки испытательной машины 0,60 мм/мин. Испытание продолжали до разрушения образца. Разрушающую нагрузку определяли с погрешностью не более 50 Н.



Рис. 10. Характер разрушения образцов

Предел прочности клевого соединения ( $\sigma$ ) выражали в паскалях и вычисляли по формуле с точностью до 0,1 МПа:

$$\sigma = \frac{P}{S},$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, Н;  $S$  – площадь склеивания, м<sup>2</sup>, вычисляемая с точностью до 0,000001.

По результатам испытаний вычисляли среднее арифметическое значение разрушающего напряжения ( $\sigma$ ) в паскалях. При этом фиксировали также характер разрушения клевого соединения. Результаты испытаний представлены в табл. 3. Среднее значение предела прочности клевого соединения составило 5,9 МПа, что на 34,1% больше показателя, требуемого стандартом. Разрушения образцов носят аутогезионный характер и представлены на рис. 5.

Заключение. Проведены исследования новых конструкций полноразмерных деревянных шпал, полученных из нескольких элементов путем их склеивания или соединения болтами. Расчет напряженно-деформированного состояния предложенных комбинированных шпал показал целесообразность их применения в железнодорожном хозяйстве. В подтверждение расчетных данных проведены полномасштабные испытания полученных деревянных конструкций. Разрушающая нагрузка при 4-точечном прогибе клееной шпалы составила 144,5 кН, составной – 142,8 кН, цельной – 135,1 кН. Среднее значение предела прочности клевого соединения составило 5,9 МПа, что на 1,5 МПа больше стандартного.

Использование комбинированных деревянных шпал позволяет существенно минимизировать диаметры раскаиваемых бревен, тем самым способствует более рациональному использованию лесных ресурсов.

### Литература

1. Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation With Wood and Forests / Oliver C. D. [et al.] // Journal of Sustainable Forestry. 2014. No. 33 (3). P. 329–331. DOI: 248.
2. Состояние вопроса производства и эксплуатации железнодорожных шпал из различных материалов / Курьянова Т. К. [и др.] // Лесотехнический журнал. Деревообработка. Химические технологии. 2017. Вып. 4. С. 157–166.
3. Шпалы деревянные для железных дорог широкой колеи. Общие технические условия: ГОСТ 78-2014. Минск: Госстандарт, 2016. 14 с.
4. Технологические процессы пропитки древесины на шпалопрпиточных заводах. М.: МПС СССР, 1988. 48 с.
5. Защита древесины. Автоклавная пропитка маслянистыми защитными средствами: ГОСТ 20022.5-93. Введ. 01.01.1995. М.: Изд-во стандартов, 2001. 5 с.
6. Защита древесины. Параметры защищенности: ГОСТ 20022.0-93. Минск: Изд-во стандартов, 2002. 42 с.

7. Божелко И. К., Снопков В. Б. Технология пропитки шпал водорастворимым антисептиком Tanalith E 3492 // Труды БГТУ. Сер. II, Лесн. и деревообаб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 189–192.
8. Божелко И. К., Снопков В. Б. Технология низкотемпературной пропитки шпалопродукции // Труды БГТУ. Сер. II, Лесн. и деревообаб. пром-сть. 2011. Вып. XIX. С. 204–207.
9. Донченко Л. Ф. Сокращение технологического запаса шпал на складе атмосферной сушки Борисовского ШПЗ // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. 2004. Вып. XII С. 213–217.
10. Божелко И. К., Снопков В. Б. Влияние накальвания древесины на качество пропитки // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. 2014. Вып. XXII. С. 118–121.
11. Деревянная шпала: пат. 2400587 RU, МПК E 01 B 3/10, B 27 M 3/14 / В. А. Шамаев, И. Н. Медведев, В. С. Овчинников, В. А. Кондратюк; заявитель ООО «Лигнум», ФГУП «Государственный научный центр лесопромышленного комплекса»; заявл. 21.07.2009; опубл. 27.09.2010. Бюл. № 27.
12. Деревометаллическая шпала: пат. 2262564 RU, МПК E 01 B 3/10, B 27 M 3/14 / Л. А. Занегин; заявитель ОАО «Иркутский научно-исследовательский институт лесной промышленности»; заявл. 06.04.2004; опубл. 20.10.2005. Бюл. № 29.
13. Составная шпала: пат. 2256020 RU, МПК E 01 B 3/10, B 27 M 3/14 / Л. А. Занегин; заявитель ОАО «Иркутский научно-исследовательский институт лесной промышленности»; заявл. 08.01.2004; опубл. 10.07.2005. Бюл. № 19.
14. Божелко И. К. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния деревянных конструкций и изделий в процессе эксплуатации // Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. 2014. Випуск 155. С. 116–119.
15. Moses D. M., Prion H. G. L. Anisotropic Plasticity and the Notched Wood Shear Block // Forest Prod J. 2002. No. 52. P. 43–54.
16. Moses D. M., Prion H. G. L. A Three-Dimensional Model for Bolted Connections in Wood // Can J Civil. 2003. No. 30. P. 555–567.
17. Moses D. M., Prion H. G. L. Stress and Failure Analysis of Wood Composites: A New Model // Compos Part B-Eng. 2004. No. 35. P. 251–261.
18. Шпалы и брусья деревянные клееные для трамвайных путей. Технические условия: ГОСТ 28469-90. М.: Стандартинформ, 2006. 7 с.
19. Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений: ГОСТ 33120-2014. М.: Стандартинформ, 2015. 18 с.

### References

1. Oliver C. D., Nassar N. T., Lippke B. R., McCarter J. B. Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation With Wood and Forests. *Journal of Sustainable Forestry*, 2014, no. 33 (3), pp. 329–331. DOI: 248.
2. Kuryanova T. K., Platonov A. D., Mikheevskaya M. A., Parinov D. A., Safonov A. O., Mozgovoy N. V., Pervakova Ye. A. Condition of production and operation of railway sleepers from various materials. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal. Derevoobrabotka. Khimichskie tekhnologii* [Forestry Journal. Woodworking. Chemical Technology], 2017, no. 2, pp. 157–166 (In Russian).
3. GOST 78-2014. Wooden sleepers for full gauge railways. Specifications. Minsk, Gosstandart Publ., 2016. 9 p. (In Russian).
4. *Tekhnologicheskie protsessy propitki drevesiny na shpalopropitochnykh zavodakh* [Technological processes of impregnation of wood in sleeper impregnated factories]. Moscow, MPS SSSR Publ., 1988. 48 p.
5. GOST 78-2014. Wooden sleepers for full gauge railways. Specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2001. 5 p. (In Russian).
6. GOST 20022.0-93. Protection of wood. Security Settings. Minsk, Izdatel'stvo standartov Publ., 2002. 42 p. (In Russian).
7. Bozhelko I. K., Snopkov V. B. Technology of impregnating sleepers with a water-soluble antiseptic Tanalith E 3492. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2007, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 189–192 (In Russian).
8. Bozhelko I. K., Snopkov V. B. Technology of low-temperature impregnation of sleepers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 204–207 (In Russian).
9. Donchenko L. F. Reduction of the technological supply of sleepers in the atmospheric drying warehouse of Borisov SHPZ. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2004, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 213–217 (In Russian).
10. Bozhelko I. K., Snopkov V. B. Influence incising of wood on quality of treatment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 118–121 (In Russian).
11. Shamaev V. A., Medvedev I. N., Ovchinnikov V. S., Kondratyuk V. A. *Derevyannaya shpala* [Wood sleepers]. Patent RU, no. 2400587, 2010.

12. Zaneġin L. A. *Derevometallicheskaya shpala* [Woodmetallic sleepers]. Patent RU, no. 2262564, 2005.
13. Zaneġin L. A. *Sostavnaya shpala* [Composite sleepers]. Patent RU, no. 2256020, 2005.
14. Bozhelko I. K. Forecasting of strained-deformed condition of wooden constructions and products during operation. *Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu sil's'kogo spodarstva imeni Petra Vasilenka* [Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko], 2014, no. 155, pp. 116–119.
15. Moses D. M., Prion H. G. L. Anisotropic Plasticity and the Notched Wood Shear Block. *Forest Prod J*, 2002, no. 52, pp. 43–54.
16. Moses D. M., Prion H. G. L. A Three-Dimensional Model for Bolted Connections in Wood. *Can J Civil Eng*, 2003, no. 30, pp. 555–567.
17. Moses D. M., Prion H. G. L. Stress and Failure Analysis of Wood Composites: A New Model. *Compos Part B-Eng*, 2004, no. 35, pp. 251–261.
18. GOST 28469-90. Ties and beams are wooden glued for tram ways. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2006, 7 p. (In Russian).
19. GOST 33120-2014. Wooden glued constructions. Methods for determining the strength of adhesive joints. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 18 p. (In Russian).

#### **Информация об авторе**

**Божелко Игорь Константинович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bkbstu@mail.ru

#### **Information about the author**

**Bozhelko Igor' Konstantinovich** – PhD (Engineering), Head of the Department of Woodworking Technology (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bkbstu@mail.ru

*Поступила 12.03.2018*