

Обоснование использования рентгенографии для оценки физико-механических характеристик пиломатериалов

А.А. Тамби

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

a_tambi@mail.ru

Статья поступила 28.09.2015, принята 25.10.2015

Статья посвящена обоснованию возможности и целесообразности использования метода рентгенографии для оценки качества пиломатериалов. Приведены результаты исследований, доказывающие необходимость проведения сплошной оценки физико-механических характеристик пиломатериалов при их сортировании как по отечественным, так и по международным стандартам. В результате проведенных исследований установлено, что физико-механические свойства пиломатериалов зависят от геоклиматических условий их роста, местоположения в стволе дерева и строения древесины, в первую очередь содержания поздней древесины, наклона волокон и наличия сучков. Приведены результаты исследований плотности древесины ели, произрастающей в Ленинградской области, получены уравнения связи ее плотности и прочности. Высокая вариативность указанных параметров не позволяет при оценке качества пиломатериалов основываться только на среднестатистических данных. Обоснована необходимость разработки метода неразрушающего контроля, позволяющего сортировать пиломатериалы по назначению, базируясь на физических свойствах древесины. Разработана методика использования рентгенографии при оценке качества пиломатериалов, получены математические модели, учитывающие влияние пороков строения древесины на ее механические характеристики. Использование метода рентгенографии позволяет разделять пиломатериалы по физико-механическим характеристикам, а также присваивать им ценностные коэффициенты, на основании которых определяется качественный выход заготовок с требуемыми свойствами. Сортирование пиломатериалов по назначению, основанное на оценке их внутреннего состояния и физико-механических характеристик, позволит повысить качественный выход заготовок, что увеличит объемы использования и стоимость пиломатериалов, относимых сегодня по визуальным характеристикам к низшим сортам, что в свою очередь повысит экономическую эффективность лесопильных предприятий.

Ключевые слова: рентгенография; сортировка пиломатериалов; плотность древесины; прочность древесины.

X-ray methods to control physical and mechanical properties of the sawn timber

A.A. Tambi

St Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky per., St Petersburg, Russia

a_tambi@mail.ru

Received 28.09.2015, accepted 25.10.2015

The article devoted to the justification of opportunity and expediency of using the X-ray method to assess the quality of the sawn timber. The research results prove the necessity to make full assessment of physical and mechanical properties of the sawn timber when being sorted for either domestic or international standards. The research results demonstrated that physical and mechanical properties depend on the geometry of the sawn timber and climatic conditions of growth, wood location in the tree trunk and the wood structure, firstly, the content of late wood, the direction of the wood fibers and the sizes of twigs. The research results are given for the density of the spruce wood growing in Leningradskaya oblast. Equations are received for its density and strength. High variability of these parameters does not allow evaluating the sawn timber only by relying on the average data. The necessity is justified for developing non-destructive testing method which allows sorting the sawn timber according to its intended purpose, based on the physical properties of wood. X-ray method to assess the quality of the sawn timber is developed. Mathematic models are derived which take into account the impact of the wood structure defects on its mechanical characteristics. By using X-ray methods, it allows sorting the sawn timber according to its physical and mechanical characteristics, as well as assigning them value grades, useful for determining the volume of high-quality wood parts with the properties needed. Sorting the sawn timber for its intended purpose, based on the evaluation of its structure and physical and mechanical properties will improve the output quality of the wood parts and will increase the volume of use and the cost of the sawn timber which nowadays attributed only according to its visual characteristics to the lower grades. It will increase economical effectiveness of timber enterprises.

Key words: X-ray; sorting of the sawn timber; wood density; strength of wood.

Введение. Производство пиломатериалов в Российской Федерации направлено на обеспечение максимального объемного выхода обезличенных пиломатериалов, сортировка которых осуществляется после вы

пиловки, основываясь на размерах пороков на их поверхности. В соответствии с европейским стандартом EN 338 при выработке экспортных пиломатериалов подлежат оценке плотность и прочность древесины.

При выявлении несоответствия качественных характеристик требованиям потребителей пиломатериалы переводятся в низшие сорта и используются в основном для изготовления тары и упаковки, а также малоответственных деталей. При этом, например, пиломатериалы 3-го сорта могут быть использованы для изготовления элементов несущих конструкций, деталей окон и дверей, строганных деталей, деталей деревянных домов, в производстве мебели и др.

Пиломатериалы низших сортов не проходят дополнительную сортировки на лесопильных заводах, что усложняет производственные процессы их переработки на деревообрабатывающих предприятиях, поскольку в текущих условиях практически невозможно прогнозирование качественного выхода заготовок. Оценке должны подлежать не только участки с максимальным количеством видимых пороков, но и их распределение по длине пиломатериалов. Необходимо учитывать различие физико-механических свойств по длине пиломатериалов, определяющих их прочность при склеивании и приложении механических нагрузений.

Методы и средства сортировки не могут быть привязаны к отдельным стандартам и должны основываться на физических свойствах древесины.

Постановка задачи. Влияние видимых пороков древесины и дефектов обработки на поверхности пиломатериалов на их реальную несущую способность в разное время нашло отражение в работах многих исследователей. Полученные ими результаты указывают на несоответствие внешних признаков реальным механическим характеристикам древесины. Так, например, по данным Е.И. Савкова [1; 2] и В.Н. Волынского [3], реальная прочность пиломатериалов 3-го и 4-го сортов по ГОСТ 8486-86 может быть выше прочности пиломатериалов нулевого и 1-го сортов. При этом коэффициент вариации при проведении испытаний может достигать 40 % и более, что не позволяет гарантировать реальные физико-механические свойства пиломатериалов на основании только видимых пороков древесины. На изменчивость физико-механических свойств пиломатериалов в своих исследованиях указывают также В.В.

Кислый [4], А.М. Боровиков [5–7], В.Н. Волынский [8] и другие авторы

По мнению А.П. Рябокони [9–10], именно различия физико-механических свойств предопределили существующий в настоящее время разрыв между качеством древесины и требованиями отечественных стандартов лесопиления [11], в которых не нормируются плотность и прочность древесины. Нормирование этих параметров осуществляется на деревообрабатывающих предприятиях, производящих строительные материалы и несущие элементы конструкций в рамках СНиП и СП, однако отсутствие прямой связи с ГОСТ не позволяет таким предприятиям приобретать пиломатериалы с требуемыми свойствами.

Основное влияние на механические характеристики древесины оказывает содержание поздней древесины (плотность). Проф. П.Н. Хухрянским [12] определена связь между усредненными значениями прочности и плотности древесины без пороков (1):

$$\sigma = A + B\rho, \quad (1)$$

где σ — прочность древесины, МПа; A, B — постоянные; ρ — плотность древесины, кг/м³.

Для древесины Ленинградской области в результате собственных исследований получены следующие уравнения (2)–(3), имеющие схожий характер.

Зависимость прочности древесины от ее плотности может быть описана уравнениями (2) для древесины сосны и (3) для древесины ели:

$$\sigma = 0,3666 \cdot \rho - 93,383, \quad (2)$$

$$\sigma = 0,2194 \cdot \rho - 6,0449, \quad (3)$$

где σ — прочность древесины при статическом изгибе, МПа; ρ — плотность древесины при 12 % влажности.

На рис. 1 и 2 приведены результаты испытаний древесины из хлыстов сосны и ели и средние значения прочности древесины при статическом изгибе при $W = 12\%$. Из каждого хлыста испытано 168 и 276 образцов соответственно. Испытанию подвергались малые образцы длиной 300 мм, не имеющие таких пороков, как сучки и трещины. Наклон волокон в образцах варьировался в диапазоне 0–22 %.

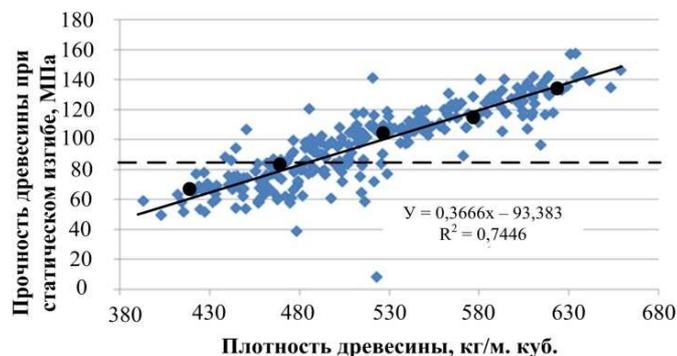


Рис. 1. Влияние плотности древесины сосны на ее прочность при статическом изгибе

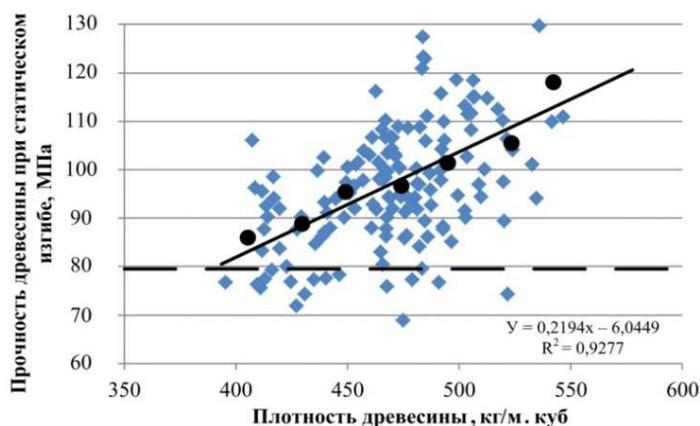


Рис. 2. Влияние плотности древесины ели на ее прочность при статическом изгибе

Анализ данных (рис. 1, 2) подтверждает наличие тесной связи между плотностью древесины и ее прочностью при статическом изгибе и необходимость учета влияния на механические характеристики не только плотности, но и структуры древесины, в первую очередь направления ее волокон. Угол наклона и количество перерезанных волокон определяются сбегом, что крупнено представлено на рис. 3.

Помимо того, в одном сорimente могут присутствовать участки древесины разной плотности, распределение которой в стволе дерева носит сложный характер (рис. 4). Влияние на ее структуру и, соответственно, механические свойства оказывают геоклиматические условия произрастания, (рис. 5) [13].

Исходя из результатов собственных исследований (рис. 1 – 4) и анализа литературных источников, можно утверждать, что механические свойства древесины зависят от плотности, направления волокон и размера сучков, что сегодня не в полной мере учитывается действующими стандартами на продукцию лесопиления.

Поскольку плотность и угол наклона волокон могут изменяться по объему ствола дерева в широких диапазонах, необходимо исследовать их влияние на механические характеристики пиломатериалов, а также разработать метод их контроля в пиломатериалах, реализация которого позволит также определять размеры и местоположение сучков, являющихся концентраторами напряжений.

Влияние наклона волокон на прочность древесины подробно изложено в трудах Н.Л. Леонтьева [14] и Л.М. Перельгина [15]. Наибольший интерес представляет влияние искусственного косослоя, вызванного перерезанием волокон при продольном делении бревен, особенно сильно проявляющегося в пиломатериалах, при их изготовлении из криволинейных сориментов.

В исследованиях Н.Л. Леонтьева выявлено [16], что степень влияния сучков на прочность древесины зависит от их относительных размеров, разновидности и вида действия сил. Испытаниями установлено, что в каждой группе качества есть заготовки всех категорий прочности [4].

Влияние косослоя на прочность древесины при статическом изгибе [14] может быть описано уравнением (4):

$$K_n = -1,912 \cdot H + 102,77, \quad (4)$$

где K_n — коэффициент, учитывающий снижение прочности древесины при наличии наклона волокон, %; H — наклон волокон, %, $0 \leq H \leq 27$ %.

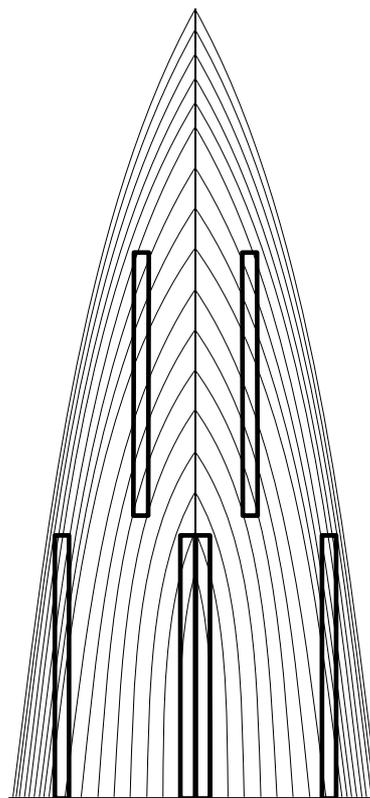


Рис. 3. Схема расположения пиломатериалов в стволе дерева

Определено, что с увеличением относительного размера сучка предел прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон у досок, брусьев и брусков резко падает. Подобные результаты получены и другими исследователями [11; 14].

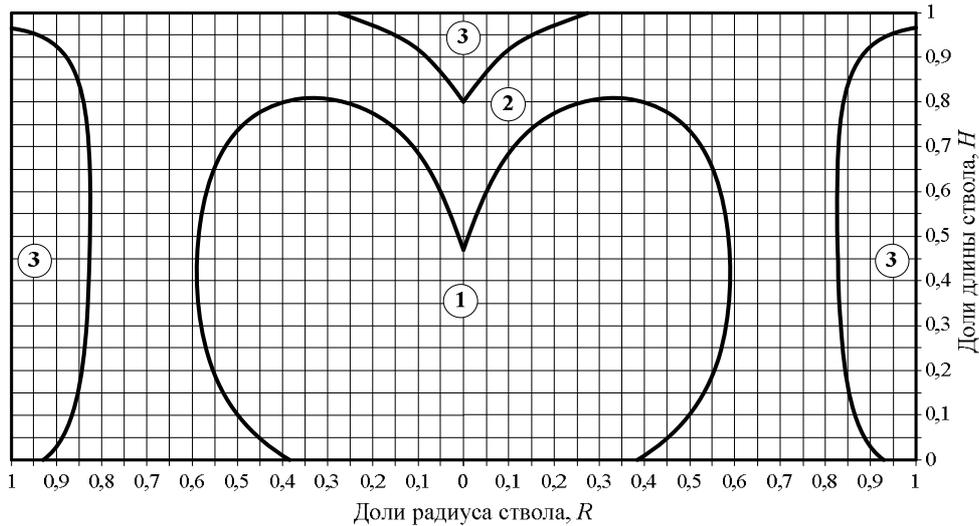


Рис. 4. Плотность древесины в различных частях ствола ели при 12%-ной влажности, кг/м³: 1 — 350-400; 2 — 400-450; 3 — 450-500

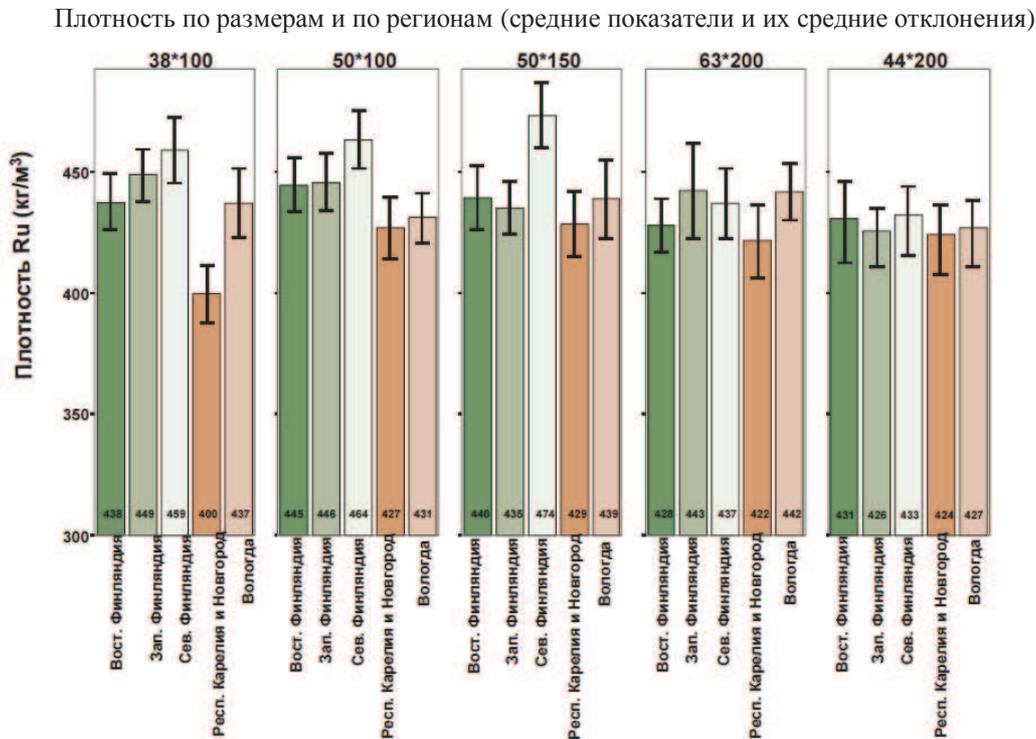


Рис. 5. Средние показатели плотности древесины ели по регионам

Источник: [13]

Влияние размера сучка на прочность древесины при статическом изгибе может быть описано уравнением (5):

$$K_c = -0,9655 \cdot C + 96,682, \quad (5)$$

где K_c — коэффициент, учитывающий снижение прочности древесины, при наличии сучка, %; C — размер сучка в долях ширины или толщины пиломатериала, %, $0 \leq C \leq 50\%$.

Таким образом, можно сделать вывод (рис. 1 – 5), что прочность древесины, при наличии пороков ее строения, должна определяться методами сплошной сортировки по критерию плотности с последующей корректировкой по формуле (6):

$$\sigma_{n/m} = \sigma \cdot K_n \cdot K_c, \text{ МПа} . \quad (6)$$

Используемые визуальные методы контроля не позволяют достоверно определить прочностные свойства и могут быть использованы только при изготовлении малоответственных элементов из древесины, поскольку не определяют плотность пиломатериалов. Косвенная оценка плотности по содержанию поздней древесины на торцах пиломатериалов также может содержать ошибки вследствие неравномерности толщины зон поздней древесины и перерезания волокон по длине сортиментов.

Оценка прочностных характеристик пиломатериалов существующими методами носит укрупненный

характер и определяет минимальное значение динамического модуля упругости пиломатериала (акустическая диагностика) или же его участка (прочностная сортировка). В случае выбраковки пиломатериалов результаты оценки не позволяют определить вид пороков, их количество и расположение. Использование весовых способов контроля плотности также не исключает погрешности за счет проведения совокупной оценки массы древесины и содержащихся в ней сучков, имеющих большую плотность.

Наиболее информативным методом оценки физико-механических характеристик пиломатериалов может являться рентгенография [18–32].

При ее использовании обеспечивается возможность одновременной оценки размеров, содержания поздней древесины по объему сортимента, наклона волокон, размеров и местоположения сучков в пиломатериалах.

Помимо этого при выполнении оценки качества пиломатериалов они могут быть разделены на зоны с любым шагом с последующим выводом информации о минимальной и средней прочности древесины, а также протяженности и количестве участков древесины с заданными физико-механическими характеристиками. При несоответствии минимальной прочности доски требованиям потребителей на основании результатов комплексной оценки пиломатериалы могут быть распилены на заготовки, реализуемые впоследствии деревообрабатывающим предприятиям.

Методика применения рентгенографии. При использовании метода рентгенографии физико-механические характеристики сухих пиломатериалов могут быть определены по следующему алгоритму:

1. Программное разделение пиломатериалов по длине на участки с произвольным шагом при

последующем выделении заданной длины заготовок с припуском на механическую обработку.

2. Определение плотности каждого участка пиломатериала.

Поглощение потока рентгеновского излучения описывается экспоненциальным законом. Интенсивность излучения I для любой толщины рассматриваемого объекта определяется выражением [17]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (7)$$

где I — интенсивность излучения, $MэВ$; I_0 — интенсивность пучка, прошедшего через объект, $MэВ$; μ — массовый коэффициент ослабления излучения; x — толщина объекта, через который прошло излучение, m .

3. Определение угла наклона волокон на каждом участке путем анализа интенсивности прошедшего излучения при двухплоскостной оценке пиломатериалов. При выработке предприятием только радиальных или тангенциальных пиломатериалов возможно применение одностороннего сканирования.

4. Выявление размеров и местоположение сучков в каждой зоне. Выявление трещин.

5. Определение минимальной плотности и прочности каждого участка, определяющих качественные характеристики пиломатериала.

6. Определение совокупной длины участков с разными свойствами.

7. Определение назначения пиломатериала: несущие конструкции, мебельные заготовки, обшивочные материалы и т. д. на основании минимальной плотности или протяженности зоны древесины заданной прочности.

Принципиальная схема проведения оценки качества пиломатериалов методом рентгенографии приведена на рис. 6.

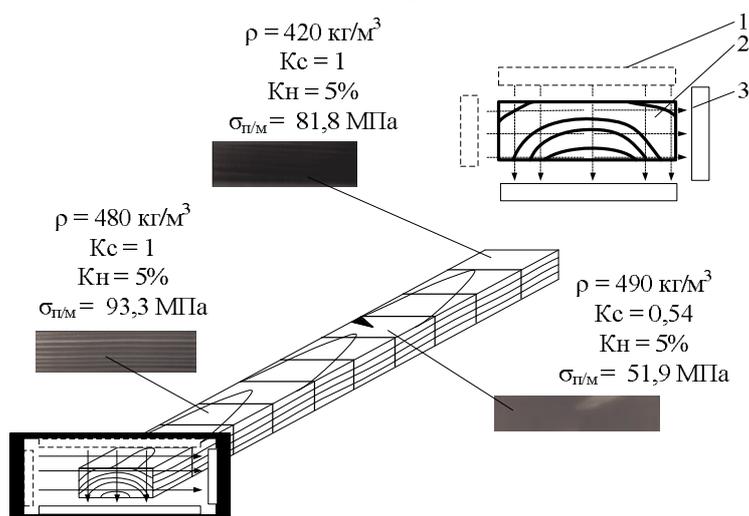


Рис. 6. Оценка физико-механических характеристик пиломатериалов методом рентгенографии: 1 — источник рентгеновского излучения; 2 — пиломатериал; 3 — приемник рентгеновского излучения

8. При невозможности использования пиломатериала в дальнейшем в цельном виде, без вырезки дефектных мест, что обуславливается их физико-механическими характеристиками, выполняется определение размеров зон древесины с равномерно распределенными свойствами по формуле (8). Определенные размеры

зон с заданными физико-механическими характеристиками могут являться ценностным коэффициентом пиломатериалов, $Ц_n$, выраженным в виде коэффициента от 0 до 1:

$$C_n = \frac{\sum_{i=1}^n l_{\sigma}}{l}, \quad (8)$$

где l — длина пиломатериала, m ; l_{σ} — протяженность участков с заданными физико-механическими характеристиками, m .

Присвоение ценностного коэффициента позволит лесопильным предприятиям диверсифицировать продукцию не только по сечениям пиломатериалов, но и по качественным характеристикам, включая выпуск заготовок с гарантированными свойствами различного назначения. Реализация таких заготовок возможна как в виде пиломатериалов, содержащих участки заданного качества, так и в виде конечной продукции, торцованной в размер по спецификации.

Выводы

1. Разработанный метод сортировки с использованием рентгенографии базируется на оценке физико-механических свойств пиломатериалов и может быть адаптирован к действующим российским и зарубежным стандартам, а также использоваться при поставке лесопильным предприятием заготовок различного назначения.

2. Сортировка пиломатериалов по физико-механическим характеристикам позволяет обеспечить гармонизацию требований ГОСТ, а также СНИП, СП и ТУ, предъявляемых к пиломатериалам в процессе изготовления конечной продукции.

3. Присвоение ценностного коэффициента пиломатериалам, содержащим пороки, который не позволяет отнести их к высшим сортам, повысит востребованность данной продукции деревообрабатывающими предприятиями.

Литература

1. Савков Е.И. Прочность пиломатериалов. М.: Гослесбумиздат, 1962. 88 с.
2. Савков Е.И. Механические свойства древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 63 с.
3. Волинский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины: моногр. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. 196 с.
4. Кислый В.В. Оценка качества продукции лесной и деревообрабатывающей промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 224 с.
5. Боровиков А.М., Хабарова Г.П. О визуальной сортировке брусьев по прочности // Изв. Высш. учеб. заведений - Лесной журнал. 1982. № 1. С. 14-17.
6. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М., Лесн. пром-сть, 1989. 294 с.
7. Боровиков А.М. Качество пиломатериалов. М., Лесн. пром-сть, 1990. 255 с.
8. Волинский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины: моногр. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2012. 224 с.
9. Рябоконт А.П. О качестве стволов сосны в древостоях различной густоты // Лесное хозяйство. 1978. № 5. С. 33-36.
10. Рябоконт А.П. Методология качества древесины // Материалы 111 международного симпозиума, 11-14 сент.

2000 г. «Строение, свойства и качество древесины-2000». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 265-268.

11. Селиверстов А.А. Сравнение методов лесозаготовок – влияние на качество древесины и производительность труда на лесозаготовительных предприятиях: проект; Исследования по качеству древесины: лит. обзор [Электронный ресурс] // ПетрГУ: портал. URL http://www.idanmetsatiето.info/fi/document.cfm?doc=show&doc_id=1206 (дата обращения: 03.04. 2015).

12. Хухрянский П.Н. Прочность древесины. М.: Гослесбумиздат, 1955. 152 с.

13. Verkasalo E., Kilpeläinen H., Wall T., Kannisto K. Результаты проекта «Качество и цена ели из России, используемой в производстве строительных спецматериалов и столлярно-строительных изделий в сравнении с елью из Финляндии» [Электронный ресурс]. URL. http://www.idanmetsatiето.info/rus/document.cfm?doc=show&doc_id=1108 (Дата обращения: 03.04. 2015).

14. Леонтьев Н.Л. Таблицы физико-механических свойств древесных пород СССР // Техн. бюл. ЦНИИМОД. М., 1940. № 17. С.130.

15. Перельгин Л.М. Древесиноведение. Л.: Гослесбумиздат, 1949. 375 с.

16. Леонтьев Н.Л. Влияние пороков на модули упругости древесины // Инф. листок ЦНИИМОД. М., 1949. № 28. С. 14 с.

17. Беллон К., Жуковский М.Е., Йениш Г.Р., Подолова С.В. Численное моделирование процессов рассеяния рентгеновского излучения при радиографическом контроле материалов [Электронный ресурс]. URL. <http://www.kel-dysh.ru/papers/2005/art15/def.html> (Дата обращения: 03.04.2015).

18. Wei Q, Leblon B., La Rocque A. On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review // Can. J. For. Res. 2011. Т. 41. P. 2120-2140.

19. Smolniakov V.I. The Perspectives of High-Accuracy X-Ray Fluorescent Analysis - Some Fundamental Aspects and Applications // In "Advances in X-Ray Analysis". 2008. Vol. 39. P. 815-820.

20. Bhandarkar S.M., Faust T.D., Tang M. Catalog: a system for deflection and rendering of internal log defects using computer tomography // Machine Vision and Applications. 2011. P 171-190.

21. Freyburger C., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J.M. 2009. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography // Annals of science. 2009. Vol. 66. P. 804-813.

22. Kruglowa T. In-situ assessment of density and material properties in timber structures by non-destructive and semi-destructive testing. Thesis for the degree of licentiate of engineering // Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012.

23. Rinn F., Schweingruber F.H., Schär E. RESISTOGRAPH and X-Ray Density Charts of Wood. Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species // Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood. 2008. Vol. 50, № 4. P. 303-311.

24. Salmi A., Meriläinen A., Torkkeli M., Peura M., Haapalainen J., Hægström E., Serimaa R. Microelasticity in wood using X-ray diffraction and ultrasound // Proceedings of the International Congress on Ultrasonics, Vienna, 2007.

25. Bucur V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. Berlin, 2003

26. Colin F., Mothe F., Freyburger C., Leba J.M., Morisset J.B., Fontaine F. Tracking rameal traces in sessile oak trunks

with X-ray computer tomography: biological bases, preliminary results and perspectives // *Trees* 2010. № 10. P.1007.

27. Liang S., Fu F. Relationship Analysis Between Tomograms and Hardness Maps in Determining Internal Defects in Euphrates Poplar // *Wood Research*, 2012. № 57 (2). P 221-230.

28. Rinn F. Technische Grundlagen der Impuls-Tomographie // *Baumzeitung*. 2003. №. 8. P. 29-31.

29. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI, 1994. 40 p.

30. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Teppoev A.V., Anan'eva N.I., Semishkur S.O., Bakhshieva M.A. Physical Non-destructive Methods for the Testing and Evaluation of the Structure of Wood Based Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014, Vol. 50, № 11. P 693-700.

31. Чубинский А.Н., Тамби А.А. Метод контроля клеевых соединений в процессе производства клееных брусков из цельной древесины // *Изв. С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. им. С.М. Кирова*. СПб., 2008. Вып. 185. С. 208-213.

32. А.Н. Чубинский, А.А. Тамби, А.А. Федяев, Н.Ю. Федяева, А.М. Кульков. Направления использования физических методов контроля структуры и свойств древесины. // *Системы. Методы. Технологии*. 2015. № 2 (26). С. 152-158.

References

1. Savkov E.I. The strength of lumber. M.: Goslesbumizdat, 1962. 88 p.

2. Savkov E.I. Mechanical properties of wood. M.: Lesn. prom-st', 1965. 63 p.

3. Volynskii V.N. The relationship and the variability of the physical and mechanical properties of wood: monogr. Arkhangel'sk: Izd-vo AGTU, 2000. 196 p.

4. Kislyi V.V. Assessment of quality timber and woodworking industry. M.: Lesn. prom-st', 1975. 224 p.

5. Borovikov A.M., Khabarova G.P. About visual sorting of bars according to durability // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal*. 1982. № 1. P. 14-17.

6. Borovikov A.M., Ugolev B.N. Handbook of wood. M., Lesn. prom-st', 1989. 294 p.

7. Borovikov A.M. The quality of lumber. M., Lesn. prom-st', 1990. 255 p.

8. Volynskii V.N. The relationship and the variability of the physical and mechanical properties of wood: monogr. SPb.: Lan', 2012. 224 p.

9. Ryabokon' A.P. About quality of trunks of a pine in forest stands of various density // *Lesnoe khozyaistvo*. 1978. № 5. P. 33-36.

10. Ryabokon' A.P. Methodology of the quality of wood // *Materialy 111 mezhdunarodnogo simpoziuma, 11-14 sent. 2000 g. «Stroenie, svoistva i kachestvo drevesiny-2000»*. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2000. P. 265-268.

11. Seliverstov A.A. Comparison of methods for harvesting - influence on quality of wood and labor productivity at the timber enterprises: proekt; Issledovaniya po kachestvu drevesiny: lit. obzor [Elektronnyi resurs] // *PetrGU: portal*. URL http://www.idanmetsatiето.info/fi/document.cfm?doc=show&doc_id=1206 (data obrashcheniya: 03.04.2015).

12. Khukhryanskii P.N. The strength of wood. M.: Goslesbumizdat, 1955. 152 p.

13. Verkasalo E., Kilpeläinen N., Wall T., Kannisto K. The results of the project "Quality and price of Christmas trees from Russia, used in the production of construction specialmaterials and millwork and building products in comparison with spruce from Finland" [Elektronnyi resurs]. URL. http://www.idanmetsatiето.info/rus/document.cfm?doc=show&doc_id=1108 (Data obrashcheniya: 03.04.2015).

14. Leont'ev N.L. Tables of physical and mechanical properties of the wood species of the USSR // *Tekhn. byul. TsNIIMOD*. M., 1940. № 17. P. 130.

15. Pereygin L.M. Wood Science. L.: Goslesbumizdat, 1949. 375 p.

16. Leont'ev N.L. Influence of defects on modules of elasticity of wood // *Inf. listok TsNIIMOD*. M., 1949. № 28. P. 14.

17. Bellon K., Zhukovskii M.E., Ienish G.R., Podolyako S.V. Numerical simulation of X-ray scattering at the radiographic inspection of materials [Elektronnyi resurs]. URL. <http://www.keldysh.ru/papers/2005/art15/def.html> (Data obrashcheniya: 03.04.2015).

18. Wei Q, Leblon B., La Rocque A. On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review // *Can. J. For. Res.* 2011. T. 41. P. 2120-2140.

19. Smolniakov V.I. The Perspectives of High-Accuracy X-Ray Fluorescent Analysis - Some Fundamental Aspects and Applications // In "Advances in X-Ray Analysis". 2008. Vol. 39. P. 815-820.

20. Bhandarkar S.M., Faust T.D., Tang M. Catalog: a system for defection and rendering of internal log defects using computer tomography // *Machine Vision and Applications*. 2011. P. 171-190.

21. Freyburger C., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J.M. 2009. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography // *Annals of science*. 2009. Vol. 66. P. 804-813.

22. Kruglowa T. In-situ assessment of density and material properties in timber structures by non-destructive and semi-destructive testing. Thesis for the degree of licentiate of engineering // Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012.

23. Rinn F., Schweingruber F.H., Schär E. RESISTO-GRAPH and X-Ray Density Charts of Wood. Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species // *Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*. 2008. Vol. 50, № 4. P. 303-311.

24. Salmi A., Meriläinen A., Torkkeli M., Peura M., Haapalainen J., Hæggröm E., Serimaa R. Microelasticity in wood using X-ray diffraction and ultrasound // *Proceedings of the International Congress on Ultrasonics, Vienna, 2007*.

25. Bucur V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. Berlin, 2003.

26. Colin F., Mothe F., Freyburger S., Leba J.M., Morisset J.B., Fontaine F. Tracking rameal traces in sessile oak trunks with X-ray computer tomography: biological bases, preliminary results and perspectives // *Trees* 2010. № 10. P. 1007.

27. Liang S., Fu F. Relationship Analysis Between Tomograms and Hardness Maps in Determining Internal Defects in Euphrates Poplar // *Wood Research*, 2012. № 57 (2). P 221-230.

28. Rinn F. Technische Grundlagen der Impuls-Tomographie // *Baumzeitung*. 2003. №. 8. P. 29-31.

29. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI, 1994. 40 p.

30. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Teppoev A.V., Anan'eva N.I., Semishkur S.O., Bakhshieva M.A. Physical Nondestructive Methods for the Testing and Evaluation of the Structure of Wood Based Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014, Vol. 50, № 11. P 693-700.

31. Чубинский А.Н., Тамби А.А. Control method of adhesive joints in the production process of glued solid wood bars // *Izv. S.-Peterb. gos. lesotekhn. akad. im. S.M. Kirova*. SPb., 2008. Vyp. 185. P. 208-213.

32. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Федяев А.А., Федяева Н.Ю., Kul'kov A.M. Use of physical methods to control the structure and properties of wood // *Systems. Methods. Technologies*. 2015. № 2 (26). P. 152-158.