

Исследование влияния физических свойств и строения древесины сосны на ее прочность

А.А. Тамби^{1 a}, О.В. Юркова^{2 b}, О.А. Куницкая^{3 c}, М.В. Степанищева^{4 d}

¹ООО «ТИС», пр. Товарищеский д. 22, кор. 3, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

³Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

⁴Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^aa_tambi@mail.ru, ^bolesya_yurkova@tiswood.ru, ^cola.ola07@mail.ru, ^dmarina01031977@inbox.ru

Статья поступила 1.10.2017, принята 16.10.2017

В производстве материалов, изделий и конструкций из древесины необходимо учитывать ее физические свойства и строение. Основными факторами, которые оказывают влияние на технологические и эксплуатационные свойства выпускаемой продукции, являются плотность и прочность древесины. Помимо того что плотность вариативна в рамках одной породы, она неравномерно распределяется по всему объему. Прочность древесины имеет тесную связь с плотностью, однако на характер ее изменения также оказывает влияние угол направления волокон. Совместная оценка этих факторов позволит повысить качественный и спецификационный выход продукции путем исключения из производственного процесса древесины с заведомо несоответствующими свойствами, что особенно важно при изготовлении конструктивных пиломатериалов.

На основании результатов исследований установлено местоположение имеющих разную прочность зон древесины в объеме хлыста сосны. Прогнозирование прочностных свойств позволит увеличить выход конструктивных пиломатериалов путем обоснования схем раскроя хлыстов и бревен. Кроме того, были определены закономерности изменения угла наклона волокон древесины в объеме хлыста сосны при распиловке вдоль центральной оси формируемых из него пиловочных бревен. Полученные математические модели повышают достоверность прогнозирования и оценки механических свойств при прочностной сортировке пиломатериалов, а их внедрение в технологические процессы лесозаготовительных и лесопильных предприятий способствует увеличению выхода пиломатериалов с заданными свойствами. Применение на практике результатов исследования позволяет обеспечить рациональное использование и сохранение древесины, а также снижение стоимости конструктивных пиломатериалов.

Ключевые слова: плотность древесины; угол наклона волокон; прочность пиломатериалов.

Research of the influence of the physical properties and structure of pine wood on its strength

A.A. Tambi^{1 a}, O.V. Yurkova^{2 b}, O.A. Kunitskaya^{3 c}, M.V. Stepanishcheva^{4 d}

¹"TIS" Ltd; 22, Tovarishcheskiy Per., Building #3, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institut'skiy Per., St. Petersburg, Russia

³Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia

⁴Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^aa_tambi@mail.ru, ^bolesya_yurkova@tiswood.ru, ^cola.ola07@mail.ru, ^dmarina01031977@inbox.ru

Received 1.10.2017, accepted 16.10.2017

In the production of materials, products and constructions made of wood, it is necessary to know the physical properties and structure of wood. The main factors that influence the technological and operational requirements of the products are their density and strength. In addition to the fact that the density is variable within a type of wood, it is not evenly located throughout the volume. The strength of wood is strongly dependent on the density. Nevertheless, it is also influenced by the slope of the wood fibers. Joint assessment of these factors will allow to increase the qualitative and specification output of products by excluding wood with obviously inappropriate properties from the production process, which is especially important in the production of structural lumber. The results of the research set the location of the wood in the volume of the pine trunks with different strength. Forecasting strength properties will increase the amount of structural sawn timber by justifying schemes for cutting tree lengths and logs. The regularities of the change in the angle of inclination of wood fibers in the volume of the pine whip were determined when cutting saw logs formed from it along the central axis. The received mathematical models allow to increase reliability of an estimation of mechanical properties at strong sorting of saw-timbers. Their introduction in technological processes of timber cutting and sawmill enterprises will allow to increase an output of saw-timbers with the required properties. The use of research results allows ensuring the rational use and preservation of wood, which will reduce the cost of structural sawn timber.

Key words: wood density; slope of wood fibers; strength of sawn timber.

Введение

Промышленными предприятиями Российской Федерации выпускается большое количество материалов, изделий и конструкций из древесины, отличающихся как назначением, так и условиями эксплуатации. Помимо видимых пороков древесины, определяющих сорт пиломатериалов в соответствии со стандартами РФ, при изготовлении ответственных конструкций необходимо учитывать изменчивость физико-механических характеристик древесины, проявляющихся даже в рамках одной породы [1–8]. Прочностные свойства сортиментов в зависимости от их назначения регламентируются соответствующими ГОСТ и СП, предъявляющими к древесине дополнительные, как правило, более жесткие требования, чем стандарты на продукцию первичной механической обработки.

Основными факторами, оказывающими влияние на технологические и эксплуатационные свойства продукции из древесины, являются ее плотность и прочность при соответствующем уровне влажности. Известно [1, 2, 9], что плотность древесины неравномерно распределяется в объеме круглых лесоматериалов. Разработанные денситограммы основных пород древесины [10, 11] в совокупности с применением современных методов неразрушающего контроля на базе компьютерной и магнитно-резонансной томографии [12, 13] позволяют достоверно определить изменение плотности в объеме сортиментов из древесины.

Установлено [14–19], что прочность древесины имеет тесную связь с плотностью, однако на характер ее изменения оказывают влияние не только возраст древесины и

наличие пороков, но и положение сортимента в сердцевинной, ювенильной, ядровой или заболонной зоне [20], а также угол наклона волокон древесины [1–3].

Необходимость использования в строительстве конструктивных пиломатериалов с нормируемыми прочностными характеристиками регламентируется ГОСТ 20850-2014 «Конструкции деревянные клееные. Общие технические условия», что требует совершенствования производственных процессов распиловки круглых лесоматериалов, направленного на увеличение выхода пиломатериалов с заданными физико-механическими характеристиками.

Повышение прочностных свойств пиломатериалов возможно путем внедрения предварительной оценки свойств круглых лесоматериалов на этапе выполнения лесозаготовительных работ [9], а также при составлении схем раскряжки с учетом распределения физико-механических свойств в объеме круглых лесоматериалов.

Целью исследования являются определение влияния строения древесины на ее механические характеристики, а также выявление качественных зон в объеме круглых лесоматериалов, обладающих различной прочностью.

Методика исследований. Объектом исследования стали хлысты сосны, заготовленной в Ленинградской области. Для проведения испытаний выполнена их раскряжка с шагом 2 м, в результате чего получены секции длиной 300 мм. Из них выпилены образцы прямоугольной формы размерами 20x20x300 мм (рис. 1).

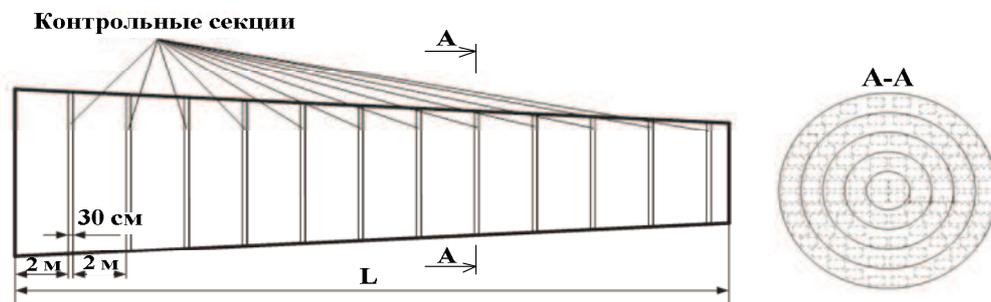


Рис. 1. Схема получения контрольных образцов

Полученные образцы были высушены до влажности $12 \pm 1 \%$, после чего по формуле (1) определена их плотность, $кг/м^3$:

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{b \cdot h \cdot l}, \quad (1)$$

где m_{12} — масса испытуемого образца при влажности $W = 12 \pm 1 \%$, кг; h — высота образца, м; b — ширина образца, м; l — длина образца, м.

Распиловка раскряжеванных сортиментов выполнялась вдоль центральной оси с целью моделирования реальных условий раскряжки бревен в процессе лесопиления. У каждого образца в соответствии с методикой ГОСТ 2140-81 «Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения» определялся наклон волокон по пласти и кромке в соответствии со схемой рис. 2. Пересчет экспериментальных значений выполнялся по формуле (2):

$$z = \frac{a}{b} \cdot 100, \% \quad (2)$$

где z — наклон волокон, %; b — длина общего направления волокон; a — отклонение волокон от продольной оси.

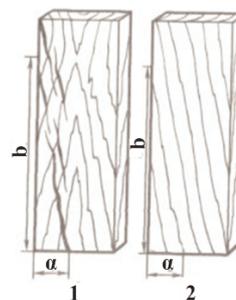


Рис. 2. Схема измерения наклона волокон: 1 — тангентальный наклон волокон в пиломатериале; 2 — радиальный наклон волокон на радиальной поверхности пиломатериала

Определение прочности древесины при статическом изгибе выполнялось с использованием разрывной машины Р-5 в соответствии с известной методикой [1]. Прочность древесины определяли по формуле (3), МПа. Схема нагружения образца при статическом изгибе приведена на рис. 3.

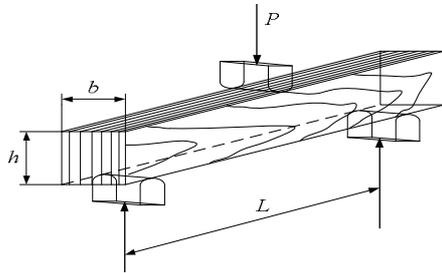


Рис. 3. Схема испытания древесины при статическом изгибе

$$\sigma_w = \frac{3P_{\max}L}{2bh^2}, \text{ МПа} \quad (3)$$

где P_{\max} — максимальная нагрузка, Н; L — расстояние между центрами опор, $L = 240$ мм; b — ширина образца, мм, $b = 20$ мм; h — высота образца, мм, $h = 20$ мм.

Математическая обработка полученных результатов произведена в соответствии с методикой [21] с использованием инструментов программного комплекса Statistica v.10. В нем же методом наименьших квадратов с использованием инструмента «карты линий уровня» рассчитан полигон распределения прочности в объеме хлыста.

Результаты исследований и их анализ. На основании проведенных исследований определены числовые параметры коэффициентов уравнения П.Н. Хухрянского [22] для условий Ленинградской области, описывающего связь между прочностью и плотностью древесины:

$$\tau = 0,36 \cdot \rho - 90,55, \text{ МПа} \quad (4)$$

где τ — прочность древесины, МПа; ρ — плотность древесины, кг/м³.

Уравнение (4) корректно описывает связь средних значений плотности и прочности древесины, $R^2 = 0,98$ (рис. 4), но, поскольку коэффициент вариации для отдельных значений достигает 23,3 %, в математическую модель необходимо введение дополнительных факторов, учитывающих влияние на прочность структуры древесины.

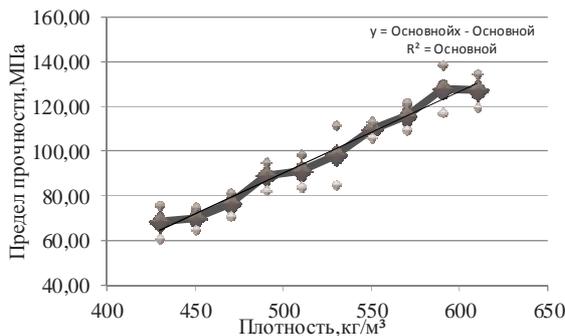


Рис. 4. Влияние плотности древесины на ее прочность при статическом изгибе

Известно, что на прочность древесины оказывает влияние наличие искусственного косослоя [1, 3] (табл. 1), а также изменение угла наклона волокон, измеренного на торце образцов [1].

Таблица 1

Влияние искусственного косослоя на прочность древесины сосны [3]

Свойства древесины	Прочность косослойной древесины, %, от прочности прямослойной древесины при наклоне волокон			
	5	9	17,5	27
Прочность при сжатии вдоль волокон	99,5	96,5	90,5	80,0
Прочность при статическом изгибе	94,0	90,5	66,0	51,5

В соответствии со схемой испытаний (рис. 2) были определены закономерности изменения угла наклона волокон древесины в объеме хлыста сосны при распиловке формируемых из него пиловочных бревен вдоль центральной оси. Установлено, что наклон волокон по пласти в среднем изменяется в диапазоне от 0 до 3 %, по кромке — от 0 до 10 %.

Схемы изменения наклона волокон в объеме хлыста сосны приведены на рис. 5, 6.

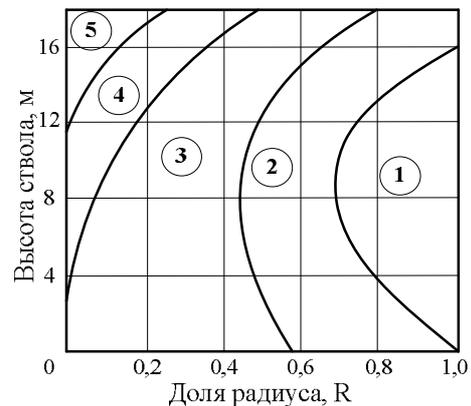


Рис. 5. Изменение угла наклона волокон по пласти образцов в объеме ствола дерева, %: 1 — менее 1,3; 2 — 1,3–2,3; 3 — 2,3–3,5; 4 — 3,5–5; 5 — более 5

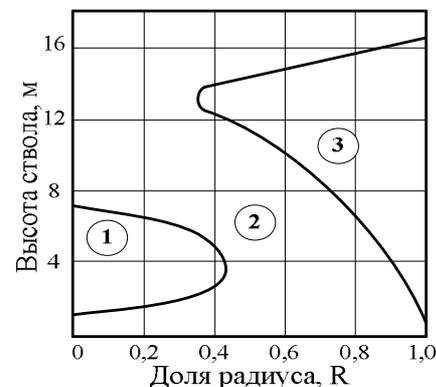


Рис. 6. Изменение угла наклона волокон по кромке образцов в объеме ствола дерева, %: 1 — более 7; 2 — 3–7; 3 — менее 3

Анализ рис. 5, 6 и данных табл. 1 позволяет сделать вывод о необходимости включения в математическую модель оценки прочности древесины (4) факторов, учитывающих наклон волокон.

Введение их в математическую модель (4) позволяет увеличить точность оценки прочности древесины, МПа, на 6,5 % — уравнение (5), $R^2 = 0,75$.

$$y = -94,6 - 0,3x_1 - 0,82x_2 + 0,37x_3 + 0,05x_4, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где x_1 — угол наклона волокон по кромке, %, 0–7; x_2 — угол наклона волокон по пласти, %, 0–10; x_3 — плотность древесины, 400–650 кг/м³; x_4 — угол наклона волокон на торце, 60–90°.

В результате исследований получена схема распределения прочности древесины в объеме хлыста сосны. С ее помощью может быть выполнена предварительная оценка механических свойств пиломатериалов, основанная на их местоположении в объеме хлыста при влажности 12 ± 1 % (рис. 7). Влияние местоположения сортимента в объеме хлыста на прочность древесины может быть описано уравнением (6), $R^2 = 0,71$.

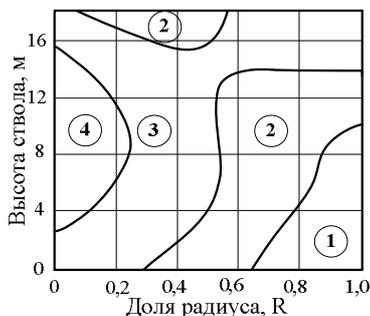


Рис. 7. Распределение прочности древесины в объеме ствола сосны, МПа: 1 — более 100; 2 — 80–100; 3 — 65–80; 4 — менее 64

$$y = 48,6 - 0,57x_1 + 81,4x_2, \text{ МПа}, \quad (6)$$

где x_1 — высота ствола дерева, м, $0 < x_1 < 20$; x_2 — доля радиуса хлыста, *о.е.*, $0 < x_2 < 1$.

Определенная закономерность изменения прочности древесины в объеме хлыста позволяет прогнозировать свойства формируемых сортиментов на этапе лесозаготовительных работ и может применяться при обосновании схем раскряжевки круглых лесоматериалов в зависимости от назначения конечной продукции. Кроме того, использование математической модели (6) позволит лесопильным предприятиям формировать схемы раскряжки пиловочных бревен с учетом качественных характеристик сырья, что обеспечит увеличение объемного выхода конструктивных пиломатериалов.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. Прочность древесины сосны обладает высокой вариативностью в объеме хлыста, что должно учитываться при разработке схем раскряжки круглых лесоматериалов.

2. В результате проведенных исследований определены коэффициенты классического уравнения П.Н. Хухрянского для условий Ленинградской области, описывающие связь между прочностью и плотностью древесины.

3. Введение в известную модель уточняющих факторов, учитывающих влияние наклона волокон древесины, позволило повысить точность оценки прочности на 6,5 %.

4. На основании экспериментальных данных составлена схема распределения прочности в объеме хлыста сосны для условий Ленинградской области.

5. Внедрение полученных моделей в технологические процессы лесозаготовительных и лесопильных предприятий позволит увеличить выход конструктивных пиломатериалов с заданными механическими характеристиками.

6. Представляется перспективным проведение дальнейших исследований с целью анализа влияния прироста и тангенциального наклона волокон, а также микростроения древесины на ее механические характеристики.

Литература

1. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами товароведения. М.: Лесн. промышленность, 2005. 366 с.
2. Волынский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость показателей физико-механических свойств древесины. 2-е изд. Архангельск: АГТУ, 2006. 196 с.
3. Леонтьев Н.Л. Таблицы физико-механических свойств древесных пород СССР. Технический бюллетень ЦНИИМОД №17/130. М., 1940.
4. Karlman L., Morling T., Martisson O. Wood Density, Annual Ring Width and Latewood Content in Larch and Scots Pine. Eurasian J. For. Res. 2005. Vol. 8-2. P. 91-96.
5. Ivkovic M., Washington J.G., Aljoy Abarquez, Jugollic, Michael B. Powell, Harry X. Wu. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. Wood Sci Technol (2009) 43:237–257 DOI 10.1007/s00226-008-0232-3.
6. Longuetaud F., Mothe F., Leban J.M., Mäkelä A. Picea sapwood width: variations within and between trees. Scand J. For. Res. 2006. № 21 (1). P. 41–53. doi:10.1080/02827580500518632.
7. Lahtela V., Kärki T. Improving the UV and water-resistance properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*) with impregnation modifiers // European Journal of Wood and Wood Products, July. 2014, Vol. 72, Is. 4. P. 445–452.
8. Butterfield B. (2006). The structure of wood: form and function. In: Walker, J.C.F., eds, Primary wood processing, 2nd edn. P. 1–22. Springer, Dordrecht.
9. Тамби А.А., Чубинский А.Н. Оценка соответствия плотности древесины требованиям к продукции деревообрабатывающих производств // Лесной журнал. 2016. № 3. С. 124–134.
10. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Хитров Е.Г., Шимкевич Ю.А., Семишкур С.О. Обоснование объемного выхода пиломатериалов для клееных деревянных конструкций на основе физических свойств древесины // Изв. С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. 2014. № 206. С. 146–154.
11. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Хитров Е.Г., Чаузов К.В., Швец В.Л., Бахшиева М.А., Быков Д.Ю. Обоснование объемного выхода конструктивных сосновых и еловых пиломатериалов // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. № 214. С. 247–259.
12. 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. DOI: 10.1134/S1061830914110023.

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

14. Юркова О.В., Никульшин С.С., Аношин Д.А., Семишкур С.О., Тамби А.А., Чубинский А.Н. Исследование прочности древесины хвойных пород ленинградской области // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. / КГТУ. Кострома, 2015. С. 48-50.

15. Varivodina I., Kosichenko N., Varivodin V., Sedliačik J. Interconnections among the rate of growth, porosity and wood water absorption // Wood Research. 2010. № 55 (1). P. 59-66.

16. 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.

17. Samson M. Potential of finger-jointed lumber for machine stress-rated lumder grades // Forest Products Journal. 1985. № 7-8. P. 422-425.

18. Kretschmann D.E. Mechanical properties of wood. In: Wood handbook – Wood as an engineering material, chapter 5. Madison: Forest Products Laboratory. 2010.

19. Тутурин С.В. Механическая прочность древесины // Физическая мезомеханика. 2004. Вып. 6, Т. 7. С. 85-88.

20. Бахшиева М.А., Чубинский Н.А. Анализ строения и свойств ювенильной древесины на качество пиломатериалов // Изв. С.-Петербур. лесотехн. акад. 2016. № 216. С. 202-214.

21. Пижурин А.А., Розенблит М.С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесн. промышленность, 1984. 232 с.

22. Хухрянский П.Н. Прочность древесины. М.: Гослесбуиздат, 1955. 152 с.

of the volume output of structural pine and spruce timbers // Izvestia SPbLTA. 2016. № 214. P. 247-259.

12. 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. DOI: 10.1134/S1061830914110023.

13. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Fedyaev A.A., Fedyaeva N.Yu., Kul'kov A.M. Directions of using physical methods for controlling the structure and properties of wood // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 2 (26). P. 152-158.

14. Yurkova O.V., Nikul'shin S.S., Anoshin D.A., Semishkur S.O., Tambi A.A., Chubinskii A.N. Investigation of the strength of coniferous wood in the Leningrad Region // Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa: sb. nauch. tr. / KGTU. Kostroma, 2015. P. 48-50.

15. Varivodina I., Kosichenko N., Varivodin V., Sedliačik J. Interconnections among the rate of growth, porosity and wood water absorption // Wood Research. 2010. № 55 (1). P. 59-66.

16. 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.

17. Samson M. Potential of finger-jointed lumber for machine stress-rated lumder grades // Forest Products Journal. 1985. № 7-8. P. 422-425.

18. Kretschmann D.E. Mechanical properties of wood. In: Wood handbook - Wood as an engineering material, chapter 5. Madison: Forest Products Laboratory. 2010.

19. Tuturin S.V. Mechanical strength of wood // Physical Mesomechanics. 2004. Vyp. 6, T. 7. P. 85-88.

20. Bakhshieva M.A., Chubinskii N.A. Analysis of the structure and properties of juvenile wood for sawnwood quality // Izvestia SPbLTA. 2016. № 216. P. 202-214.

21. Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. Research of woodworking processes. М.: Лесн. промышленность, 1984. 232 p.

22. Khukhryanskii P.N. Strength of wood. М.: Goslesbumizdat, 1955. 152 p.

References

1. Ugolev B.N. Wood Science with the Basics of Commodity Science. М.: Лесн. promyshlennost', 2005. 366 p.

2. Volynskii V.N. Interrelation and variability of indicators of physical and mechanical properties of wood. 2-e izd. Arkhangel'sk: AGTU, 2006. 196 p.

3. Leont'ev N.L. Tables of physico-mechanical properties of tree species of the USSR. Tekhnicheskii byulleten' TsNIIMOD № 17/130. М., 1940.

4. Karlman L., Morling T., Martisson O. Wood Density, Annual Ring Width and Latewood Content in Larch and Scots Pine. Eurasian J // For. Res. 2005. Vol. 8-2. P. 91-96.

5. Ivkovic M., Washington J.G., Aljoy Abarquez, JugoIlic, Michael B. Powell, Harry X. Wu. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. Wood Sci Technol (2009) 43:237-257 DOI 10.1007/s00226-008-0232-3.

6. Longuetaud F., Mothe F., Leban J.M., Mäkelä A. Picea-abies sapwood width: variations within and between trees. Scand // J. For. Res. 2006. № 21 (1). P. 41-53. doi:10.1080/02827580500518632.

7. Lahtela V., Kärki T. Improving the UV and water-resistance properties of Scots pine (Pinus sylvestris) with impregnation modifiers // European Journal of Wood and Wood Products, July. 2014, Vol. 72, Is. 4. P. 445-452.

8. Butterfield B. (2006). The structure of wood: form and function. In: Walker, J.C.F., eds, Primary wood processing, 2nd edn. P. 1-22. Springer, Dordrecht.

9. Tambi A.A., Chubinskii A.N. Evaluation of the conformity of the density of wood with the requirements for the products of woodworking industries // Forest Journal. 2016. № 3. P. 124-134.

10. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Khitrov E.G., Shimkevich Yu.A., Semishkur S.O. Substantiation of bulk output of sawn timber for glued wooden structures on the basis of physical properties of wood // Izvestia SPbLTA. 2014. № 206. P. 146-154.

11. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Khitrov E.G., Chauzov K.V., Shvets V.L., Bakhshieva M.A., Bykov D.Yu. Substantiation