

УДК 630*6

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ВИБРАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

Е. Ю. Салдаева, Е. М. Цветкова

Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
E-mail: saldaevaey@volgatech.net

Предложен и научно обоснован способ и соответствующая методика предварительного диагностирования прочностных свойств древесины, позволяющая отбирать перспективные экземпляры молодняка с высокими прочностными характеристиками.

Ключевые слова: прочностные свойства; модуль упругости; вибрационный метод.

Введение. Ценность лесов заключается не только в быстром росте, повышенной производительности насаждений, но и в особых технических свойствах выращиваемой древесины. Это хорошо осознали в зарубежных странах, особенно скандинавских, где в больших объёмах выполняются лесовосстановительные работы путём замены старых насаждений новыми. Причем, главное отличие в лесовосстановительных работах здесь заключается в акценте на управлении техническим качеством подростка и молодняков естественного происхождения путём раннего диагностирования физико-механических свойств древесины.

Неразрушающие методы и средства диагностики, позволяющие определить прочностные свойства древесины у молодых деревьев, пока не внедряются в лесоводственной практике нашей страны, а первые научные сведения о них встречаются лишь в единичных работах зарубежных учёных [1–3]. Важно отметить, что известные методы основаны на выявлении прочностных характеристик древесины через модуль упругости [4–7].

Проведённые исследования зарубежных учёных в данной области [1, 2] подтверждают достоверность и взаимосвязь

модуля упругости бокового побега и стволовой части дерева. Установлена следующая закономерность: выявленные у молодняков свойства древесины проявляются и у взрослых деревьев, что подтверждается результатами многолетних наблюдений австралийских учёных [5]: коэффициент корреляции прочностных свойств «молодой» и зрелой древесины составляет 0,8–0,9.

Это всё позволяет говорить о возможности и целесообразности определения прочностных свойств древесины на ранней стадии роста дерева (в возрасте до 10 лет) для дальнейшего прогнозирования данных свойств у спелой древесины.

Цель работы – разработка способа и методики предварительного диагностирования свойств древесины в молодняках по показателю динамического модуля её упругости для целевого выращивания древесины с высокими прочностными характеристиками.

Данная цель обусловила решение следующих задач:

- 1) разработать теоретические основы вибрационного способа и соответствующего аппаратно-программного комплекса для оценки прочностных свойств древесины на стадии молодняка до 10 лет;

2) разработать методику определения прочностных свойств древесины на образцах цилиндрической формы, отобранных от боковых ветвей дерева в возрасте до 10 лет для осуществления предварительного диагностирования прочностных свойств;

3) провести экспериментальные исследования по определению прочностных характеристик древесины ели предложенным способом и выполнить сравнительный анализ полученных результатов с общепринятым в мировой практике методом (ультразвуковой).

Теоретическое обоснование выбора способа предварительного диагностирования прочностных свойств. Прочностные свойства древесины характеризуются значением модуля упругости (МоУ). В настоящее время известны следующие способы определения МоУ: традиционный статический на изгиб, ультразвуковой метод и вибрационный [1, 4, 6, 7]. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки.

Способ определения модуля упругости древесины через прогиб, создаваемый изгибающим моментом на стволе с помощью рычажного приспособления и силы тяжести человека, применим только для расчёта статического модуля упругости древесины [6]. Недостатком данного способа является большая сложность и низкая производительность выполнения испытаний.

Более простым подходом для определения модуля упругости древесины является метод ультразвуковых волн, который применяли многие учёные в своих исследованиях, например А. Я. Голдштейн, В. И. Федюков и др. [6, 8]. Сущность данного метода заключается в определении скорости ультразвука путём измерения времени распространения упругой продольной волны по длине образца. Но определение достоверных показателей древесины данным методом затруднено неоднородностью размеров и формы испытываемых образцов.

Резонансный (вибрационный) метод позволяет определять динамический модуль упругости образцов по частоте собственных изгибных продольных колебаний. Методика проведения данного испытания изложена в ГОСТ 16483.31-74. Главным недостатком данного способа является использование стандартных образцов в форме прямоугольного бруска размерами 20×20×300 мм. Тогда как предварительное диагностирование производится на деревьях в возрасте 7–10 лет, а значит, изготовление стандартных образцов является невозможным.

Особый интерес представляет способ определения собственной резонансной частоты колебания образца в виде поперечно-радиальных кернов длиной от 70 до 150 мм и диаметром 4 мм [6]. Но он также не применим, поскольку невозможно отбирать керны из молодых деревьев ввиду их малого диаметра и ветвления, все эти факторы могут исказить реальную картину.

Подводя итоги теоретического исследования и анализа известных способов определения модуля упругости древесины, можно сделать вывод, что наибольший практический интерес в этом направлении имеет вибрационный метод, основанный на колебаниях образцов.

Вибрационный метод позволяет определять динамический модуль упругости образцов по частоте собственных изгибных колебаний [9, 10]. Данный метод является наиболее практичным, так как определяет динамический модуль упругости образцов разной формы и малого диаметра и относится к неразрушающему.

Для расчёта динамического модуля упругости Един (Н/м²) по параметрам изгибных колебаний консольного образца пользуются формулой:

$$E_{\text{дин.}} = f^2 4\pi^2 \ell^2 \rho / a_0^4 k^2, \quad (1)$$

где f – собственная частота, усреднённая по двум положениям образца (поворот на 90° вокруг собственной оси), Гц; ℓ – рабочая длина образца, м; ρ – плотность об-

разца, кг/м^3 ; $k^2=j/F$, где j – момент инерции поперечного сечения; F – площадь сечения; $a_0 = 1,875$ – волновое число для основной моды колебаний.

Для получения более точных, близких к истинному значению показателей динамического модуля упругости древесины на примере образцов с консольным типом крепления нужно учесть влияние массы «башмачка», который устанавливается на свободный конец образца для создания колебаний исследуемого черенка. С учётом этих дополнений истинная собственная частота будет определяться по формуле:

$$f_{\text{ист.}} = f(1 + \Delta m/m) \quad (2)$$

где Δm – масса «башмачка», кг; m – масса рабочей части образца, кг.

Таким образом, более достоверное, истинное значение динамического модуля упругости образца круглого сечения будет определяться по следующей расчётной формуле:

$$E_{\text{дин.}} = 64\pi^2 \ell^4 \rho f_{\text{ист.}}^2 / a_0^4 d^2, \quad (3)$$

где d – средний диаметр образца, м.

В лаборатории квалиметрии резонансной древесины Поволжского государственного технологического университета разработан специальный аппаратно-программный комплекс, позволяющий определять динамический модуль упругости по частоте перечных изгибных колебаний образца древесины в стадии молодняка [9].

Установка представляет собой систему из электромагнитного вибратора, возбуждающего колебания исследуемого образца с помощью «башмачка» из мягкого железа и электромагнитного датчика, регистрирующего амплитуду и частоту колебаний образца. С выхода звуковой платы гармонический сигнал по соединительному кабелю подаётся на вибратор. Сигнал с датчика поступает на вход звуковой платы компьютера, преобразуется в амплитудно-частотную характеристику образца, которая выводится на экран монитора. Модель разработанной установки представлена на рис. 1

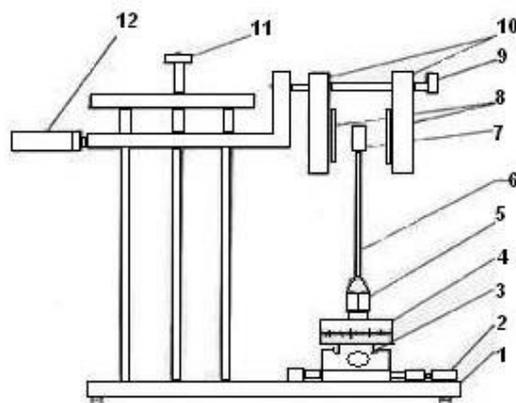


Рис. 1. Установка для определения динамического модуля упругости по частоте перечных изгибных колебаний «Резонанс-4»: 1 – станина, 2 – механизм перемещения образца в зазоре между вибратором и датчиком в направлении, перпендикулярном плоскостям вибратора и датчика, 3 – механизм перемещения образца параллельно плоскостям вибратора и датчика, 4 – лимб для поворота образца вокруг своей оси на фиксированный угол, 5 – держатель образца (цангового типа), 6 – образец, 7 – «башмачок» из мягкого железа для возбуждения и регистрации колебаний образца, 8 – вибратор и датчик, 9 – механизм изменения зазора между вибратором и датчиком, 10 – держатели вибратора и датчика, 11 – механизм вертикального перемещения вибратора и датчика

Методика определения прочностных свойств. Для измерения модуля упругости древесины с помощью установки «Резонанс-4» была разработана методика проведения испытаний.

В общем виде блок-схема методики определения динамического модуля упругости представлена на рис. 2.

Порядок проведения диагностики прочностных характеристик с использованием аппаратно-программного комплекса предусматривает выполнение шести этапов. Рассмотрим подробнее каждый из них.

1. *Отбор образцов в полевых условиях.* С помощью секатора от каждого исследуемого растущего дерева в возрасте 7–10 лет отрезаются по три боковые ветки, расположенных на разных высотах ствола (не менее чем с трёх точек: у основания, в срединной и вершинной частях), а также в разных направлениях относительно сторон света; места срезания заделываются садовым варом.

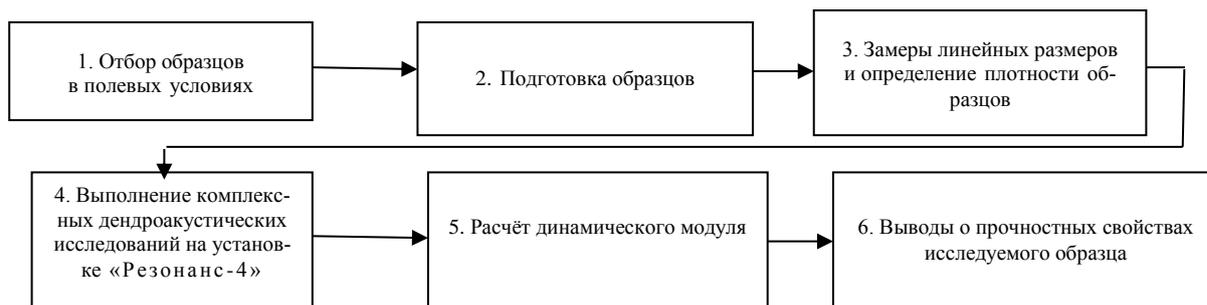


Рис. 2. Методика определения динамического модуля упругости вибрационным методом

На каждую отобранную ветвь закрепляется бирка с обозначением: формы дерева, стороны света, высоты, даты. Образцы плотно укладываются в герметичный пакет для того, чтобы избежать резкого высыхания, коробления, изломов и других возможных повреждений при транспортировке.

2. *Подготовка образцов.* Заготовленные для исследования ветви в оперативном режиме доставляются в лабораторию для дальнейших исследований. Подготовка к испытаниям и замерам проводится на сырых образцах. Каждая ветвь разрезается на черенки с учётом годичного прироста в количестве не менее трёх штук, начиная с последнего года ветви. После чего удаляется кора и подравниваются торцы перпендикулярно оси образца.

К каждому черенку прикрепляется небольшая бирка с соответствующим номером, что параллельно регистрируется в специальном рабочем журнале и компьютере.

3. *Замеры линейных размеров и определение плотности образцов.* С помощью штангенциркуля определяется длина образцов с точностью 0,1 мм. С помощью микрометра определяется диаметр образца с точностью 0,01 мм в двух перпендикулярных плоскостях с двух концов. Масса образца определяется на аналитических весах марки ВСТ-600/10.0 с точностью не менее 0,01 г. Плотность образца нестандартной формы рассчитывается по методике, описанной в [10].

4. *Выполнение комплексных дендроакустических исследований на установке «Резонанс-4».* Берётся образец длиной 70–

150 мм и диаметром 4,0–4,5 мм. Выбирается рабочая часть образца, длиной от 60 до 100 мм. На свободный конец рабочей части одевается «башмачок», образец вставляется в цанговый держатель и зажимается (рис. 1). С помощью ручек механизмов перемещения образца 11, 2 и 3 свободный конец образца выводится в центр симметрии системы вибратор–датчик. Затем ручкой механизма 9 устанавливается зазор между вибратором и датчиком, не допускающий их соприкосновения с образцом. Вибратор подключают к выходу звуковой платы, а датчик – к входу звуковой платы компьютера. Устанавливают необходимый диапазон частот в зависимости от характера выполняемых замеров. Производится тестирование образца. Данные, полученные в результате тестирования, выводятся на экран монитора в виде амплитудно-частотной гистограммы.

5. *Расчёт динамического модуля.* Помещение на свободный конец образца дополнительной массы Δm металлического «башмачка» уменьшает резонансную частоту образца. Исследования показали, что при $\Delta m/m < 0.6$, где Δm – масса «башмачка», а m – масса рабочей части образца, истинная резонансная частота определяется по формуле (2).

Расчёт динамического модуля сдвига изгибных колебаний производится по формуле (3).

6. Полученные значения M_0U сравниваются с установленными в нормативно-технической документации требованиями, и делаются выводы о прочностных свой-

ствах исследуемого образца, исходя из чего определяется его возможное промышленное применение.

Экспериментальные исследования по определению прочностных характеристик древесины. Натурным объектом для выполнения полевых исследований послужила архивно-маточная плантация резонансной формы ели, созданная в 1992–94 гг. на территории Учебно-опытного лесхоза Поволжского государственного технологического университета. В августе 2012 года были отобраны и исследованы по три боковые ветки, расположенные на разных высотах ствола от пяти контрольных деревьев из дикорастущего молодняка, находящегося рядом с привитыми опытными саженцами и в одинаковом с ними возрасте. Средняя плотность образцов составила 498 кг/м³.

Испытания данных образцов были произведены вибрационным способом по изложенной методике. Для проверки адекватности и сопоставимости данного способа модуль упругости образцов также

определяли известным ультразвуковым способом. Результаты исследований представлены в таблице.

Как видно из таблицы, большей точностью (Р) обладает виброакустический способ измерения. Проверена корреляция между ультразвуковым и виброакустическими способами. Положительный показатель корреляции, составляющий $r = 0,966$, свидетельствует о сопоставимости полученных значений МОУ. В данном случае расчётное значение критерия Фишера для выбранного уровня значимости $p = 0,05$ меньше табличного; это говорит об однородности значений модуля упругости, полученных вибрационным и ультразвуковым способами. Однако при этом для получения корректных результатов возникает необходимость введения поправочных коэффициентов. Вероятно, что существуют или могут быть разработаны иные способы идентификации, поэтому исследования в данном направлении целесообразно продолжать.

Результаты статистической обработки МОУ древесины

Показатели	Модуль упругости	
	ультразвуковой метод	вибрационный метод
Среднее значение, $M \pm m$	6706,211	4017,896
СКО, δ	1383,728	1221,480
Дисперсия, D	191470,708	149201,145
Коэффициент вариации V, %	20,634	30,401
Показатель точности P, %	5,158	7,600
Относительная погрешность	10,993	16,196
Критерий Фишера F_p	1,133	
Коэффициент корреляции, r	0,966	

Вывод. По сравнению со стандартными методами разрушающего контроля качества материала путём предварительной рубки дерева и изготовления опытных образцов вибрационный способ предварительного диагностирования имеет ряд неоспоримых преимуществ: сохраняется жизнеспособность обследованных деревь-

ев, что делает возможным формировать из них особо ценные древостои, к тому же, при значительной (многократной) экономии средств по сравнению с обычной практикой создания специальных плантаций за счёт лесных культур с общими расходами к возрасту их спелости не менее чем 1,0 млн. руб./га [11].

Также существуют другие лесоводственно-экономические преимущества предложенного способа:

- во-первых, именно естественные молодняки и подрост являются коренным фактором для поддержания непрерывного и неистощимого лесопользования, равно как и для воспроизводства лесов, улучшения качества, а также повышения их продуктивности; они обладают огромным лесовозобновительным ресурсом, заложенным самой природой; лучше приживаются и развиваются в данных лесорастительных условиях; к тому же, потребуется для

этого значительно меньшее по сравнению с лесными культурами вложение материальных и трудовых затрат;

- во-вторых, при этом нельзя сбрасывать со счетов и различие в качестве ствольной древесины, а именно превосходство естественных древостоев над искусственными в формировании более плотной и прочной древесины [8, 11].

Оперативность и простота выполнения диагностики позволяют проводить массовые измерения с минимальными материально-техническими и трудовыми затратами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-01-97045 р_поволжье_а.

Список литературы

1. Rohanova, A. Characteristics of spruce timber quality determined by ultrasonic and bending methods / A. Rohanova // Life Science Forestry and Wood Technology. – 2009. – № 69. – Pp. 234-238.
2. Lindstrom, H. Cell wall structure and wood properties determined by acoustics-a selective review / H. Lindstrom, R. Nakada, J. Ralston // European Journal of Wood and Wood. – 2003. – Vol. 61, Iss. 5. – Pp. 321-335.
3. Nakamura, N. Development of measuring Yong's modulus of planting stock / N. Nakamura // Journal of the Japanese Forestry Society. – 1997. – Vol. 79, Iss. 1. – Pp. 43-48.
4. ГОСТ 16483.31-74 Древесина. Резонансный метод определения модулей упругости и сдвига и декремента колебаний. – М.: Издательство стандартов ИПК, 1999. – 8 с.
5. Hsu Linda C.-Y. Nick King Modulus of elasticity of stemwood vs branchwood in 7-year-old Pinus radiate families / C.-Y. Hsu Linda, S. Chauhan Shakti // New Zealand Journal Forestry Science. – 2003. – Vol. 33. – Pp. 35-46.
6. Голдштейн, А. Я. Зависимость скорости распространения продольных импульсных ультразвуковых волн от геометрических размеров образцов натуральной и кодификационной полистиролом древесины березы // Химическая модификация древесины. – Рига: «ЗИНАТНЕ», 1975. – С. 35-38.
7. Пат.2439561 РФ. МПК А 01 G 33/46. Способ ранней диагностики резонансных свойств древесины / Федюков В.И., Салдаева Е.Ю.; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. – №2009111148:заяв. 26.03.09; опубл. 10.01.12. – Бюл. № 1.– 5с.:ил.
8. Федюков, В. И. Состояние и перспектива ранней диагностики технических свойств подроста и молодняков / В.И. Федюков / Лесное хозяйство. – 2013.– № 1. – С. 18-20.
9. Федюков, В. И. Ранняя диагностика технического качества подроста как важный элемент интенсификации лесопользования в России / В.И. Федюков, Е.Ю. Салдаева, Е.М. Цветкова // Лесной журнал. –2012.– № 6. – С. 16-23.
10. Полубояринов, О. И. Плотность древесины / О.И. Полубояринов. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 159 с.
11. Кобельков, М. Е. Лесное семеноводство на пороге перемен / М.Е Кобельков// Лесная Россия. – 2008. – № 9. – С. 4-8.

Статья поступила в редакцию 12.09.13.

Ссылка на статью: Салдаева Е. Ю., Цветкова Е. М. Предварительное диагностирование прочностных свойств древесины по показателю динамического модуля упругости вибрационным способом // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 2 (22). – С.

Информация об авторах

САЛДАЕВА Екатерина Юрьевна – доцент кафедры стандартизации, сертификации и товароведения, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – древесиноведение, технология производства и контроль качества продукции, а также стандартизация, сертификация и управление качеством продукции. Автор 20 публикаций.

ЦВЕТКОВА Екатерина Михайловна – аспирант, ассистент кафедры стандартизации, сертификации и товароведения, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – древесиноведение, управление качеством продукции. Автор 15 публикаций.

PRELIMINARY DIAGNOSIS OF STRENGTH PROPERTIES OF WOOD BY DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY (VIBRATING MANNER)

E. Yu. Saldaeva, E. M. Tsvetkova

Volga State University of Technology,
3, Pl.Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation
E-mail: saldaevaey@ volgatech.net

Key words: *mechanical properties; modulus; vibrating manner.*

ABSTRACT

*The problem of conservation and augmentation of high quality timber is considered. The condition is analysed and practical importance of early diagnostics of wood in its production abroad is proved. The goal of the research is to develop the method of preliminary diagnostics of technical quality of young growth by dynamic modulus of elasticity for targeted cultivation of wood with high strength characteristics. Experimental studies were carried out on the basis of an accredited laboratory of qualimetry of sounding timber (Volga State University of Technology), the method was pretested in clone bank of sounding fir in Training and Experimental Forestry of Volga Tech. A non-destructive method of early diagnostics of technical quality (strength) of young growth of Pine was offered. The method was based on the contact between acoustic and strength characteristics of wood. It allows to select unique samples without cutting down trees and to organize targeted cultivation of wood with certain technical characteristics of wood. **Results.** The results of the modulus of elasticity of wood, obtained by ultrasonic and vibroacoustic methods, are offered in the paper. Such acoustic indices as fundamental frequency of oscillations of single-sided support sample, speed of propagation of soundwave along the sample were used as the evaluation criteria. The values, obtained by these methods, are homogeneous and have a positive correlation, indicating comparability of the data. Vibroacoustic measuring method is more accurate. **Conclusions.** At this stage of the research it was found that the most appropriate way to diagnose the acoustic properties of the trees at a young age is vibroacoustic method which should be used together with "Resonance -4" plant. However, to get correct results, a need in introduction of correction factors arises. It is likely that there are other ways of identification or some new ways of identification can be developed. Thus, it is expedient to continue the researches in this area.*

The research was carried out within the grant of Russian Foundation for Basic Research №13-01-97045 r_povolzhe_a

REFERENCES

1. Rohanova A. Characteristics of spruce timber quality determined by ultrasonic and bending methods. *Life Science Forestry and Wood Technology*. 2009. № 69. Pp. 234-238.
2. Lindstrom H., Nakada R., Ralston J. Cell wall structure and wood properties determined by acoustics-a selective review. *European Journal of Wood and Wood*. 2003. Vol. 61, Iss. 5. Pp. 321-335.
3. Nakamura N. Development of measuring Yong's modulus of planting stock. *Journal of the Japanese Forestry Society*. 1997. Vol. 79, Iss. 1. Pp. 43-48.
4. GOST 16483.31-74. Drevesina. Rezonansnyy metod opredeleniya moduley uprugosti i sdviga i dekrementa kolebaniy [National State Standard 16483.31-74. Wood. The Resonance Method of Determining of the

Modulus of Elasticity and Decrement of Oscillation]. Moscow: Izdatelstvo standartov IPK, 1999. 8 p.

5. Hsu Linda C.-Y., Chauhan Shakti S. Nick King Modulus of elasticity of stemwood vs branchwood in 7-year-old Pinus radiata families. *New Zealand Journal Forestry Science*. 2003. Vol. 33. Pp. 35-46.

6. Goldshtejn A. Ja. Zavisimost skorosti rasprostraneniya prodolnykh impulsnykh ultrazvukovykh voln ot geometricheskikh razmerov obraztsov naturalnoy i kodifikatsionnoy polistirolo-m drevesiny breezy [Dependence of Velocity of Pulse Propagation of Longitudinal Ultrasonic Waves on Geometrical Dimensions of the Samples of Natural and Codified by Bifurcation of Polystyrene Birch]. *Khimicheskaya modifikatsiya drevesiny* [Chemical Modification of Wood]. Riga: Zinatne, 1975. Pp. 35-38.

7. Fedyukov V.I., Saldaeva E.Yu. *Sposob ranney diagnostiki rezonansnykh svoystv drevesiny* [The Method of Early Detection of the Resonant Properties of Wood]. Patent RF, no 2439561, 2012.

8. Fedyukov V.I. Sostoyanie i perspektiva ranney diagnostiki tekhnicheskikh svoystv podrosta i mladnyakov [Status and Prospects of Early Diagnosis of Technical Properties of Young Growth]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry]. 2013. № 1. Pp. 18 -20.

9. Fedyukov V.I., Saldaeva E.Yu., Tsvetkova E.M. Rannyyaya diagnostika tekhnicheskogo kachestva podrosta kak vazhnyy element intensivatsii lesopolzovaniya v Rossii [Early Diagnosis of the Technical Quality of Young Growth as an Important Element of Intensification of Forest Management in Russia]. *Lesnoy zhurnal* [Forest Magazine]. 2012. № 6. Pp. 16-23.

10. Poluboyarinov O. I. *Plotnost drevesiny* [Density of Wood]. Moscow: Lesnaya. promyshlennost, 1976. 159 p.

11. Kobelkov M.E. Lesnoe semenovodstvo na poroge peremen [Forest Seedage on the Threshold of Changes.]. *Lesnaya Rossiya* [Russian Forestry]. 2008. № 9. Pp. 4-8.

The article was received 12.09.13.

Citation for an article: Saldaeva E. Yu., Tsvetkova E. M. Preliminary diagnosis of strength properties of wood by dynamic modulus of elasticity (vibrating manner). *Vestnik of Volga State University of Technology*. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2014. No 2(22). Pp.

Information about the authors

SALDAEVA Ekaterina Yuryevna – Associate Professor at the Chair of Standardization, Certification and Merchandizing, Volga State University of Technology. Research interests – wood science, technology, production and quality control and standardization, certification and quality control. The author of 20 publications.

TSVETKOVA Ekaterina Mikhailovna – Postgraduate student, teaching assistant at the Chair of Standardization, Certification and Merchandizing, Volga State University of Technology. Research interests – wood science, product quality control. The author of 15 publications.