

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ ОСИНЫ (*POPULUS TREMULA*), МОДИФИЦИРОВАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

© 2023 г. А.А. Вьюгинова^{1,*}, А.В. Теплякова^{1,**}, Е.С. Попкова^{1,***}

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия 197376 Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5
E-mail: *avyuginova@etu.ru; **avteplyakova@etu.ru; ***espopkova@etu.ru

Поступила в редакцию 09.10.2022; после доработки 16.12.2022

Принята к публикации 16.12.2022

Оценка акустических свойств объектов с использованием полученных результатов в качестве информативного параметра при определении физико-механических характеристик материала, а также в области неразрушающего контроля объектов, широко применяется в современной науке и технике. Рассмотрена возможность использования данного подхода применительно к деревообрабатывающей промышленности с целью оценки характеристик пиломатериалов, модифицированных ультразвуковым методом. Результаты предыдущих исследований показали эффективность данной технологии для повышения поверхностной плотности и твердости древесины, в связи с чем одной из актуальных задач является поиск критериев, позволяющих оценивать достигаемые параметры модификации, а также оптимизировать настройки соответствующего технологического оборудования. Приведены результаты исследования акустических свойств модифицированной ультразвуковым методом древесины осины (*Populus tremula*), а также показана их применимость в качестве критерия оценки степени модификации заготовок пиломатериалов.

Ключевые слова: ультразвуковая технология, древесина, модификация, поверхностная плотность, акустические свойства, неразрушающий контроль.

DOI: 10.31857/S0130308223010049, EDN: BVETHU

ВВЕДЕНИЕ

Древесина является широко распространенным натуральным материалом, который находит разнообразное применение в самых различных сферах деятельности, в том числе пиломатериалы различного типа широко применяются в строительной отрасли. Преимущества древесины хорошо известны — это экологичность, прочность, простота обработки, внешний вид и относительно низкая цена.

Древесина характеризуется рядом физических и механических свойств, среди которых для строительных материалов внутренней и внешней отделки одним из важнейших является твердость. Твердость поверхности древесины напрямую связана с ударопрочностью, устойчивостью к истиранию и царапинам — чем выше твердость поверхности и плотность древесины, тем меньше она подвержена износу и разрушению.

Классические методы обработки древесины, направленные на повышение ее эксплуатационных характеристик, такие как термомеханическая, химико-механическая, термохимическая, химическая модификации, требуют применения сложных технологических процессов, включающих целый ряд этапов, они являются энергозатратными, а также, как правило, предполагают использование токсичных химических составов [1—3], что приводит в конечном итоге к значительному повышению стоимости продукции. Тем не менее модификация позволяет значительно улучшить такие характеристики древесины как плотность, твердость, прочность, а также снизить гигроскопичность, расширяя, таким образом, возможные сферы применения древесины как конструкционного и отделочного материала. Это обуславливает актуальность задачи поиска новых методов и технологий модификации древесины, которые были бы лишены вышеперечисленных недостатков, а также определения акустических свойств древесины и их качественной и функциональной взаимосвязи с физико-механическими характеристиками как критерия оценки эффективности процесса модификации.

Одним из направлений модификации строительных и отделочных пиломатериалов является модификация поверхности (или лицевого слоя) древесины, которая находится в непосредственном контакте с окружающей средой и подвергается непосредственному воздействию [4]. Такие способы призваны обеспечить улучшение качества строительных пиломатериалов и приемлемую стоимость в отличие от методов глубокой модификации. Для снижения себестоимости модификации поверхности древесины важным является возможность реализации технологии на оборудовании проходного, непрерывного типа и снижение энергозатрат. Некоторые из традиционных вариантов технологий [5, 6], которые предлагались для этих целей, обеспечивают возможность

реализации непрерывного режима обработки, но во всех случаях необходим нагрев и поддержание температуры заготовки, что требует значительных энергозатрат и снова значительно повышает стоимость конечного продукта. Авторами работ [7—10] был предложен способ модификации поверхностного слоя древесины на оборудовании проходного типа с использованием мощных ультразвуковых колебаний, без использования температуры или химических составов. Технология позволяет уплотнить поверхностный слой древесины на глубину 1-2 мм при минимальном увеличении себестоимости.

Технологии и оборудование для воздействия на древесину мощными ультразвуковыми колебаниями с целью изменения ее формы и свойств были описаны в ряде патентов ранее [11—13], однако во всех случаях ультразвук не воздействовал непосредственно на поверхность древесины, что не позволяло обеспечить обработку с большой амплитудой и интенсивностью ультразвуковых колебаний.

Что касается возможностей применения ультразвука в деревообрабатывающей промышленности, то в настоящий момент можно выделить следующие направления применения ультразвука: ультразвуковая сушка древесины, как правило, в комбинации с нагревом [14]; ультразвуковая резка [15, 16]; использование энергии ультразвуковых колебаний для изменения структуры древесины (пластификация, дефибрирование [17, 18]) и извлечения ее компонентов [19] — при этом обработка происходит в результате возникновения кавитационных эффектов в жидкости, в которую помещается образец; ультразвуковое обеззараживание древесины [14]; неразрушающий контроль древесины [20—24], а также определение ее свойств [25—32].

В данной работе впервые была поставлена задача исследования акустических свойств древесины осины (*Populus tremula*), модифицированной ультразвуковым методом, оценки влияния уплотнения поверхностей пиломатериалов на акустические свойства и, в связи с этим, оценка возможности их использования в качестве критерия степени модификации. Подобным образом оценке могут быть подвергнуты также пиломатериалы, поверхность которых была уплотнена с использованием других методов — принципиальным является исследование влияния уплотненных поверхностных слоев.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Идея ультразвукового метода обработки состоит в том, чтобы реализовать принцип ультразвукового волочения (экструзии) древесного материала через ультразвуковой модуль и тем самым добиться уплотнения поверхности древесины. Зазор между ультразвуковыми волноводами меньше толщины пиломатериала, при этом ультразвуковое воздействие высокой интенсивности позволяет перемещать пиломатериалы через зазор. Разница между толщиной пиломатериалов и зазором регулируется, она обозначена как Δ — чем больше эта разница, тем выше степень обработки. Мощные ультразвуковые колебания, которые непосредственно воздействуют на поверхность древесины при непосредственном контакте с ультразвуковыми волноводами, уменьшают трение в зоне контакта и модифицируют поверхность древесины, таким образом происходит одновременное повышение плотности и твердости поверхности пиломатериала. Заготовка подается через зазор с помощью гидравлической системы подачи. Система подачи состоит из привода и толкателя, который перемещается вдоль рамы станка и транспортирует заготовку в ультразвуковой модуль. В результате после обработки пиломатериалы имеют меньшую толщину, повышенную плотность и твердость поверхностного слоя.

Для исследований было подготовлено три образца пиломатериала из осины (*Populus tremula*): влажность — 12 %, длина — 1 м, ширина — 90 мм, толщина — 24,7 мм. Исследуемые образцы, расположенные перед ультразвуковым модулем оборудования, приведены на рис. 1. Предварительно по длине всех трех образцов были проведены измерения средней скорости распространения (времени распространения) ультразвука по толщине, описание используемого оборудования и методики измерений приведены ниже.

После этого каждый из трех образцов был обработан с использованием ультразвукового оборудования, причем модифицируемые участки каждого образца были обработаны с различными значениями Δ : 1,7, 2,7 и 3,7 мм, в результате на каждом образце были сформированы три области, каждая следующая из которых модифицирована в большей степени, чем предыдущая. Эскиз обработанного образца приведен на рис. 2. Такой способ подготовки образцов был выбран для исключения влияния погрешностей, связанных с возможной индивидуальной внутренней структурой каждого образца, и для повышения достоверности экспериментов, при этом измерения после модификации проводились в тех же точках, что и до модификации.



Рис. 1. Исследуемые образцы пиломатериалов перед модулем ультразвуковой обработки.

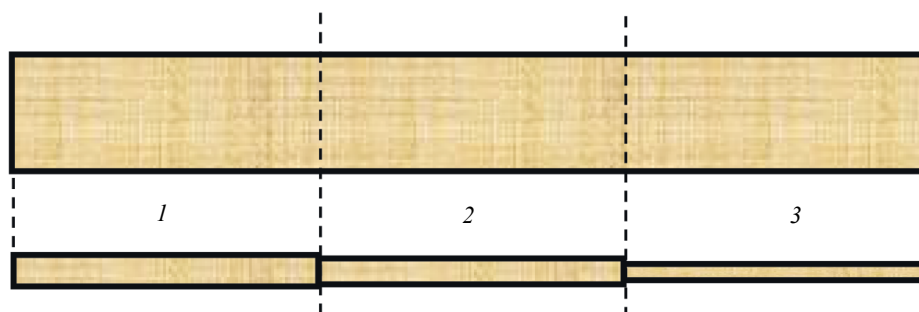


Рис. 2. Схема обработки исследуемых образцов, модифицированных ультразвуковым методом:
 $1 - \Delta = 1,7$ мм; $2 - \Delta = 2,7$ мм; $3 - \Delta = 3,7$ мм.

Микрофотографии внутренней структуры среза пиломатериалов из древесины осины (*Populus tremula*), прошедших ультразвуковую модификацию, приведены на рис. 3. Результатом обработки является смятие сосудов древесины, смещение поверхностных слоев, в следующем от поверхности годичном слое — такие деформации приводят к уменьшению пористости поверхностных слоев древесины и увеличению ее плотности. Таким образом, на обеих поверхностях пиломатериала (сверху и снизу) формируются уплотненные слои, влияние которых на акустические свойства образцов предстоит оценить.

Далее для каждого участка образца проводили многократные измерения времени прохождения акустического импульса по толщине заготовки, при этом были выбраны отдельные пьезопреобразователи продольной волны с рабочей частотой 600 кГц, реализован сухой акустический контакт. Измерительная установка на основе универсального дефектоскопа ISONIC-2006 приведена на рис. 4. Время прохождения акустического импульса фиксировалось по переднему фронту первого прошедшего сигнала.

На рис. 5 приведены осциллограммы принимаемых сигналов для различных участков одного из образцов по мере увеличения степени обработки Δ . На осциллограммах прослеживается тенденция к увеличению времени прихода первого прошедшего акустического импульса с повышением степени обработки, несмотря на уменьшение толщины с повышением степени обработки, что говорит об уменьшении средней скорости прохождения акустического импульса сквозь образцы с повышением степени модификации.

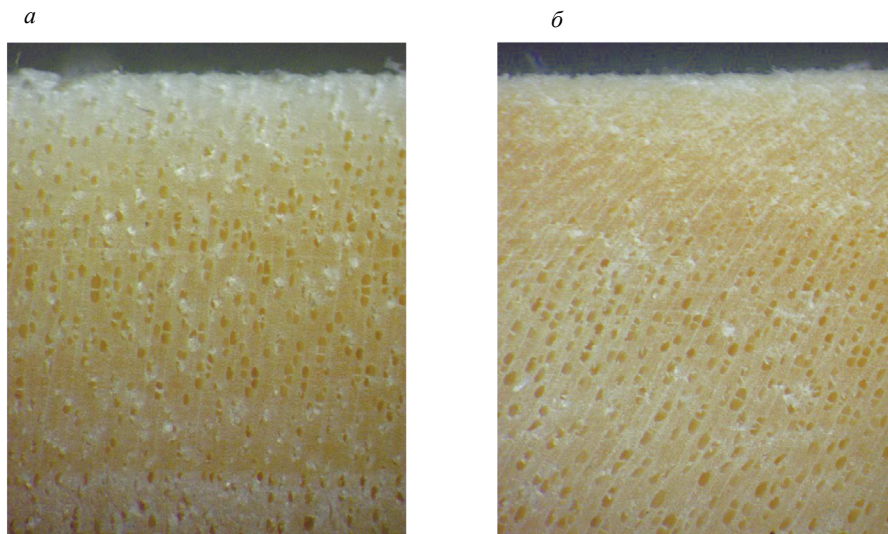


Рис. 3. Микрофотография внутренней структуры среза древесины осины (*Populus tremula*):
 а — контрольный; б — после ультразвуковой модификации.

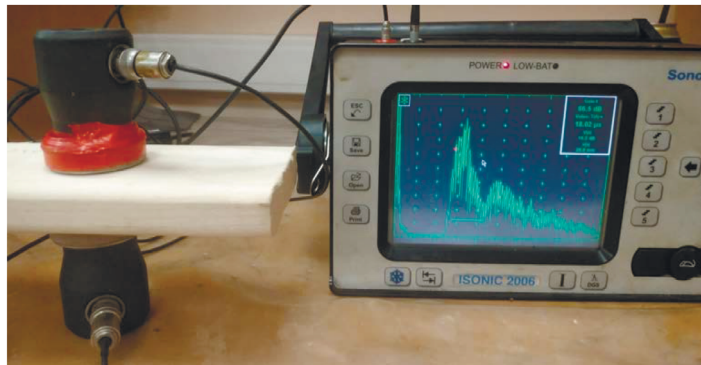


Рис. 4. Измерительная установка.

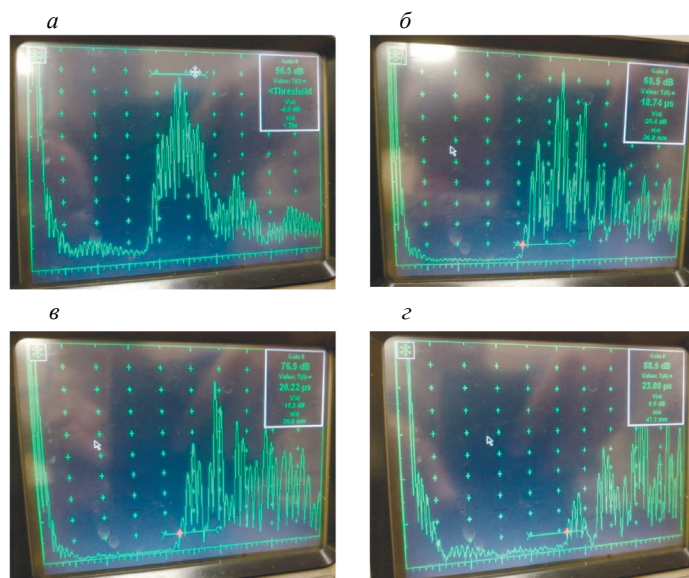


Рис. 5. Осциллограммы принимаемых сигналов:
 а — образец до модификации; б — модифицированный участок при $\Delta = 1,7$ мм; в — модифицированный участок при $\Delta = 2,7$ мм;
 г — модифицированный участок при $\Delta = 3,7$ мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерения времени прохождения t продольной акустической волны по толщине трех образцов модифицированного ультразвуковым методом пиломатериала из осины (*Populus tremula*) для участков с различной степенью обработки Δ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Номер образца	Номер участка	Степень обработки Δ , мм	Время t , с
1	До обработки	До обработки	$16,4 \pm 0,2$
	1	1,7	$17,8 \pm 0,1$
	2	2,7	$19,1 \pm 0,5$
	3	3,7	$20,4 \pm 0,4$
2	До обработки	До обработки	$21,2 \pm 0,8$
	1	1,7	$23,7 \pm 0,7$
	2	2,7	$24,4 \pm 1,0$
	3	3,7	$25,6 \pm 0,9$
3	До обработки	До обработки	$17,5 \pm 0,4$
	1	1,7	$19,1 \pm 0,8$
	2	2,7	$20,4 \pm 0,2$
	3	3,7	$20,3 \pm 0,3$

На рис. 6 приведен построенный по полученным экспериментальным данным график зависимости средней скорости продольной волны от степени обработки Δ пиломатериалов из осины (*Populus tremula*).

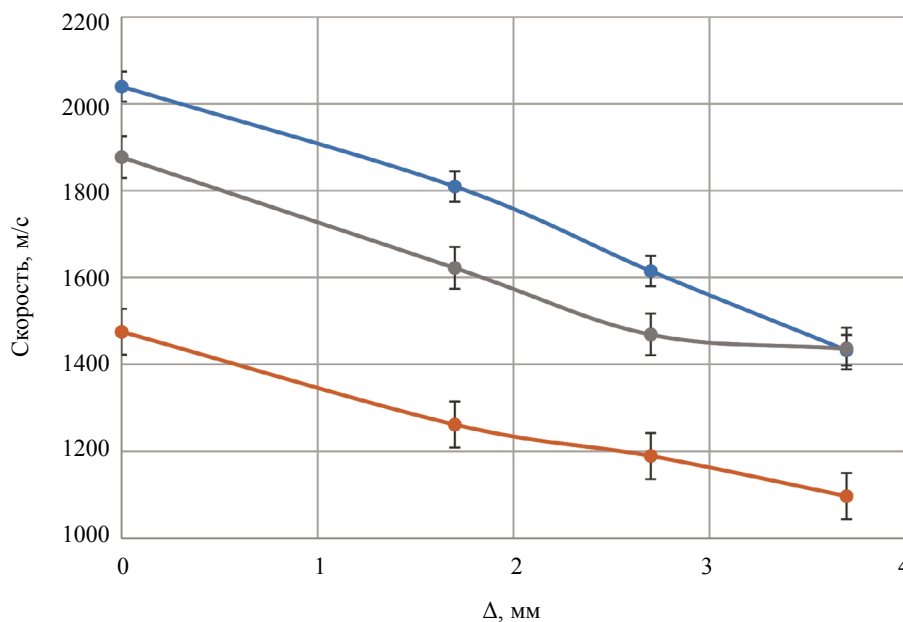


Рис. 6. Зависимость средней скорости продольной волны от степени модификации образцов ультразвуковым методом.

Как видно, средняя скорость распространения продольной акустической волны во всех трех образцах уменьшается по мере увеличения степени обработки, т.е. по мере увеличения плотности и изменения свойств поверхностных слоев. Характер данной зависимости, по-видимому, можно объяснить двумя обстоятельствами. Первое: в результате ультразвуковой модификации образцов упругие постоянные древесины в среднем изменяются незначительно, а средняя плотность возрастает, и поскольку общее выражение для определения скорости звука в среде имеет вид:

$$c = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}},$$

где C_{ij} — упругие постоянные; ρ — плотность, то с возрастанием плотности (в данном случае, средней плотности, так как уплотнению подвергаются поверхностные слои древесины) средняя скорость распространения уменьшается. Второе: результатом модификации является искривление и смещение поверхностных слоев, а изменение направления внутренней структуры, которая формируется в направлении, перпендикулярном прозвучиванию, также может приводить к снижению скорости распространения ультразвуковой волны.

Полученная зависимость ярко выражена: снижение средней скорости для трех образцов составляет в среднем 26 %, при этом зависимости имеют почти линейный характер, зависимости аналогичны для всех образцов независимо от начального значения средней скорости до ультразвуковой обработки. Таким образом, данные измерений средней скорости распространения продольной ультразвуковой волны могут быть использованы для оценки степени модификации древесины, степени уплотнения ее поверхностных слоев, а также являться информативным параметром для оценки достигаемой плотности поверхности и применяться для настройки параметров оборудования при ультразвуковой модификации. Подобным образом оценке могут быть подвергнуты также пиломатериалы, поверхность которых была уплотнена с использованием других методов.

ВЫВОДЫ

В данной работе впервые были исследованы акустические свойства образцов пиломатериалов, подвергшихся модификации ультразвуковым методом. Были проведены измерения времени распространения продольной акустической волны в поперечном направлении образцов из осины (*Populus tremula*), поверхность которых была модифицирована с использованием ультразвукового оборудования проходного типа с различными параметрами обработки, соответствующими различной достигаемой плотности поверхностных слоев.

В результате проведенных исследований установлена обратная зависимость средней скорости продольной акустической волны в образцах из осины (*Populus tremula*) от степени обработки, т.е. от результирующей плотности поверхности. Среднее значение снижения средней скорости составило 26 %, зависимости имеют почти линейный характер и аналогичны для всех образцов независимо от начального значения средней скорости до ультразвуковой обработки.

Таким образом, полученные закономерности изменения средней скорости продольной ультразвуковой волны могут быть использованы в качестве критерия оценки степени уплотнения поверхности заготовок пиломатериалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sandberg D., Kutnar A., Karlsson O., Jones D. Wood Modification Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation /1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.
2. Dominkovics Z., Dányádi L., Pukánszky B. Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007. V. 38. P. 1893—1901. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.04.001
3. Petrič M. Surface Modification of Wood // Reviews of Adhesion and Adhesives. 2013. V.2. P. 216—247. DOI: 10.7569/RAA.2013.097308
4. Tarkow H., Seborg R. Surface densification of wood // Forest Products Journal. 1968. V. 18. No. 9. P. 104—107.
5. Sadatnezhad S.H., Khazaeian A., Sandberg D., Tabarsa T. Continuous surface densification of wood: a new concept for large-scale industrial processing // Bioresources. 2017. V. 12. No. 2. P. 3122—3132.
6. Neyses B. Surface Densification of Solid Wood: Paving the Way Towards Industrial Implementation / PhD dissertation. Lulea University of Technology. 2019.
7. Иванов В.А., Новик А.А., Новик А.А. (мл.), Новик (Вьюгинова) А.А. Устройство для ультразвуковой обработки древесины / Патент РФ 2419537. 2011.

8. Вьюгинова А., Вьюгинов С. Устройство для ультразвуковой обработки пиломатериалов / Патент РФ 130909. 2013.
9. Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н., Новик А.А. Устройство для ультразвуковой модификации пиломатериалов / Патент РФ 213732. 2022.
10. Vjuginova A.A., Novik A.A., Vjuginov S.N., Ivanov V.A. Ultrasonic modification for improvement of wood-Surface properties // Wood Material Science & Engineering. 2021. DOI: 10.1080/17480272.2021.2006778.
11. Sun-Tae An. Method and apparatus for increasing the hardness and intensity of wood / Patent WO2000013865A3. 2000.
12. Ерофеев А., Конохов А., Легуша Ф., Попов Н., Пугачев С., Семенова Н., Сун-Тэ Ан. Способ уплотнения и формообразования изделий из цельной древесины и устройство для его осуществления / Патент РФ 2122944. 1998.
13. Ерофеев А., Конохов А., Легуша Ф., Попов Н., Пугачев С., Семенова Н., Сун-Тэ Ан. Способ уплотнения и формообразования цилиндрических изделий из цельной древесины и устройство для его осуществления / Патент РФ 2134195. 1998.
14. Bucur V. Acoustics of wood. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 396 p. DOI: 10.1007/3-540-30594-7
15. Kato K., Tsuzuki K., Asano I. Studies on vibration cutting of wood, part 1 // J. Jap. Wood Res. Soc. 1971. V. 17. P. 57—65.
16. Koc A. B., Liu B. Ultrasonic Cutting of Switchgrass and Miscanthus Stems // Applied Engineering in Agriculture. 2018. V. 34. P. 343—353. DOI: 10.13031/aea.11942
17. Zhengbin H., Zhenyu W., Zijian Z., Songlin Y., Jun M., Xiaoxu W. Influence of ultrasound pretreatment on wood physicochemical structure // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. V. 34. P. 136—141. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2016.05.035
18. Qian J., Li Y., Gao J., He Z., Yi S. The effect of ultrasonic intensity on physicochemical properties of Chinese fir // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. V. 64. 104985. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2020.104985
19. Bhagya Raj G.V.S., Dash K. K. Ultrasound-assisted extraction of phytochemicals from dragon fruit peel: Optimization, kinetics and thermodynamic studies // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. V. 68. P. 105180. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2020.105180
20. Bucur V. Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees // Ultrasonics. 2005. V. 43. P. 237—239. DOI: 10.1016/j.ultras.2004.06.008
21. Li L., Wang X., Wang L., Allison R. B. Acoustic tomography in relation to 2D ultrasonic velocity and hardness mappings // Wood Science and Technology. 2021. V. 46. P. 551—561. <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0426-y>
22. Dahmen S., Ketata H., Ghozlen M. H. B., Hosten B. Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave // Ultrasonics. 2010. V. 50. P. 502—507. DOI: 10.1016/j.ultras.2009.10.014
23. Longo R., Delaunay T., Laux D., El Mouridi M., Arnould O., Le Clézio E. Wood elastic characterization from a single sample by resonant ultrasound spectroscopy // Ultrasonics. 2012. V. 52. P. 971—974. DOI: 10.1016/j.ultras.2012.08.006
24. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Teppoev A.V., Semishkur S.O., Bakhshieva M.A., Anan'eva N.I. Physical nondestructive methods for the testing and evaluation of the structure of wood-based materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. P. 693—700. DOI: 10.1134/S1061830914110023
25. Dündar T., Wang X., Avci N., As E. Potential of ultrasonic pulse velocity for evaluating the dimensional stability of oak and chestnut wood // Ultrasonics. 2016. V. 66. P. 86—90. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.11.007
26. Fathi H., Kazemirad S., Nasir V. Lamb wave propagation method for nondestructive characterization of the elastic properties of wood // Applied Acoustics. 2021. V. 171. P. 107565. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107565
27. Ozyhar T., Hering S., Sanabria S. J., Niemi P. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves // Wood Science and Technology. 2013. V. 47. P. 329—341. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2>
28. Vázquez C., Gonçalves R., Bertoldo C., Baño V., Vega A., Crespo J., Guaita M. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods // Wood Science and Technology. 2015. V. 49. P. 607—622. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0719-7>
29. Salmi A. Ultrasonic quantitative strength assessment of artificially aged and archaeological wood samples // The Journal of the Acoustical Society of America. 2008. V. 123. P. 3607—3607. DOI: 10.1121/1.2934789
30. Yaitskova N., van de Kuilen J. W. Time-of-flight modeling of transversal ultrasonic scan of wood // The Journal of the Acoustical Society of America. 2014. V. 135. P. 3409—3415. DOI: 10.1121/1.4873519
31. Koczan G., Karwat Z., Kozakiewicz P. An attempt to unify the Brinell, Janka and Monnin hardness of wood on the basis of Meyer law // Journal of Wood Science. 2021. V. 67. P. 7. DOI: 10.1186/s10086-020-01938-4
32. Kang C.-W., Jang E.-S., Lee N.-H., Jang S.-S., Lee M. Air permeability and sound absorption coefficient changes from ultrasonic treatment in a cross section of *Malas* (*Homalium foetidum*) // Journal of Wood Science. 2021. V. 67. No. 10. DOI: 10.1186/s10086-020-01940-w