

Научная статья

УДК 691.113,620.179.161,681.586.48,539.413

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-143-152

Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) ультразвуковыми преобразователями разной частоты

А.С. Королев[✉], канд. техн. наук; ResearcherID: [JKI-0714-2023](https://orcid.org/0009-0000-1370-1285),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

Е.С. Шарапов, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

А.О. Быков, инженер; ResearcherID: [KFR-1574-2024](https://orcid.org/0009-0006-3429-5902),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3429-5902>

О.С. Егошин, аспирант; ResearcherID: [HLQ-6804-2023](https://orcid.org/0009-0002-8076-8345),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8076-8345>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,
г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; korolevas@volgatech.net[✉], sharapoves@volgatech.net,
anton_bykov02@mail.ru, egoshin.o.s@mail.ru

Поступила в редакцию 23.08.24 / Одобрена после рецензирования 17.11.24 / Принята к печати 20.11.24

Аннотация. Акустический неразрушающий контроль получил широкое распространение при оценке технического качества и внутреннего состояния древесины в деревянных конструкциях и у растущих деревьев. При этом порода древесины, ее влажность и направление волокон, наличие пороков, а также частота ультразвуковых преобразователей могут оказывать значимое влияние на измерение скорости ультразвукового сигнала в древесине. Развитие приборной базы, а также несогласованность результатов предыдущих исследований послужили основанием для проведения отдельной серии опытов по изучению воздействия частоты ультразвуковых преобразователей на точность косвенного определения плотности, деформативности и прочности древесины при статическом изгибе. Исследования проведены на 176 образцах древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с использованием ультразвуковых приборов Пульсар 2.2 (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) и Pundit PL-200 (Proceq SA, Швейцария) с применением ультразвуковых преобразователей номинальной частотой 24, 54, 60 и 150 кГц. Подтверждено, что частота ультразвуковых преобразователей значимо влияет на скорость сигнала и динамический модуль упругости, а также что плотность древесины не связана со скоростью ультразвукового сигнала. Установлено, что точность прогнозирования модуля упругости и предела прочности древесины при статическом изгибе, оцененная по коэффициенту детерминации ($R^2 = 0,88-0,91$) линейных моделей взаимосвязи данных параметров с динамическим модулем упругости, не зависит от частоты ультразвукового преобразователя. При этом качество моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины по скорости ультразвука значимо ниже по сравнению с параметром динамического модуля упругости. Полученные регрессионные модели могут быть использованы для неразрушающей оценки механических свойств древесины у растущих деревьев сосны и в элементах деревянных конструкций акустическим методом прохождения, а дальнейшие исследования будут направлены на изучение вариабельности акустических параметров древесины сосны у растущих деревьев.

Ключевые слова: динамический модуль упругости, неразрушающий контроль, плотность древесины, прочность древесины, скорость ультразвукового сигнала, ультразвук, ультразвуковой преобразователь

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта РНФ № 23-16-00220, <https://rscf.ru/project/23-16-00220/> с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» ПГТУ, г. Йошкар-Ола.

Для цитирования: Королев А.С., Шарапов Е.С., Быков А.О., Егошин О.С. Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) ультразвуковыми преобразователями разной частоты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 143–152. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-143-152>

Original article

Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood Using Ultrasonic Transducers of Different Frequencies

Aleksandr S. Korolev[✉], Candidate of Engineering; ResearcherID: [JKI-0714-2023](https://orcid.org/0009-0000-1370-1285),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

Evgenii S. Sharapov, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

Anton O. Bykov, Engineer; ResearcherID: [KFR-1574-2024](https://orcid.org/0009-0006-3429-5902),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3429-5902>

Oleg S. Egoshin, Postgraduate Student; ResearcherID: [HLQ-6804-2023](https://orcid.org/0009-0002-8076-8345),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8076-8345>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; korolevas@volgatech.net[✉], sharapoves@volgatech.net, anton_bykov02@mail.ru, egoshin.o.s@mail.ru

Received on August 23, 2024 / Approved after reviewing on November 17, 2024 / Accepted on November 20, 2024

Abstract. Acoustic non-destructive testing has become widely used in assessing the technical quality and internal condition of wood in wooden structures and growing trees. Meanwhile, the type of wood, its moisture content and grain direction, the presence of defects, as well as the frequency of ultrasonic transducers can have a significant impact on measuring the ultrasonic velocity in wood. The development of the instrumentation base, as well as the inconsistency of the results of previous studies, have served as the basis for conducting a separate series of experiments to study the effect of the frequency of ultrasonic transducers on the accuracy of indirect determination of the density, deformability and strength of wood under static bending. The research has been carried out on 176 samples of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood using ultrasonic devices Pulsar 2.2 (LLC SPE “Interpribor”, Chelyabinsk, Russia) and Pundit PL-200 (Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland) using ultrasonic transducers with nominal frequencies of 24, 54, 60 and 150 kHz. It has been confirmed that the frequency of ultrasonic transducers significantly affects the signal velocity and the dynamic modulus of elasticity, and that the density of wood is not related to the ultrasonic signal velocity. It has been established that the accuracy of predicting the modulus of elasticity and the ultimate strength of wood under static bending, estimated by the coefficient of determination ($R^2 = 0.88–0.91$) of linear models of the relationship between these parameters and the dynamic modulus of elasticity, does not depend on the frequency of the ultrasonic trans-

ducer. At the same time, the quality of models for predicting the physico-chemical properties of wood by the ultrasound velocity is significantly lower compared to the dynamic modulus of elasticity parameter. The obtained regression models can be used for non-destructive evaluation of the mechanical properties of wood in growing pine trees and in the elements of wooden structures by the acoustic transmission method, and further research will be aimed at studying the variability of acoustic parameters of pine wood in growing trees.

Keywords: dynamic modulus of elasticity, non-destructive testing, wood density, wood strength, ultrasonic signal velocity, ultrasound, ultrasonic transducer

Acknowledgements: The work was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00220, <https://rscf.ru/en/project/23-16-00220/>, using the equipment of the Core Facility Centre “Ecology, Biotechnologies and Processes of Obtaining Environmentally Friendly Energy Carriers”, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola.

For citation: Korolev A.S., Sharapov E.S., Bykov A.O., Egoshin O.S. Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood Using Ultrasonic Transducers of Different Frequencies. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 143–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-143-152>

Введение

Методы неразрушающего контроля широко используются для определения свойств и внутреннего состояния конструкционных материалов. Перспективным с точки зрения простоты измерений и оценки результатов, широкого распространения приборной базы является акустический метод, основанный на анализе скорости прохождения ультразвукового сигнала через исследуемый объект [1, 9]. Метод может быть использован для косвенного определения деформативности и прочности материалов, глубины раскрытия трещин и обнаружения других внутренних дефектов при оценке качества и технического (санитарного) состояния объектов в таких сферах хозяйственной деятельности как обследование растущих деревьев [14, 20, 25, 26] и строительных конструкций из древесины [6, 7, 18].

Установлена высокая степень корреляции между параметрами скорости ультразвука и динамического модуля упругости древесины с ее механическими свойствами [7–9, 22, 24]. На результаты измерений при этом оказывали значимое влияние порода и влажность древесины [21, 23, 28], направление волокон и пороки древесины [9], а также форма, тип и частота ультразвуковых преобразователей [1, 6, 7, 11, 13, 21].

Использование ультразвуковых преобразователей с частотами 45 и 90 кГц характеризовалось умеренной взаимосвязью ($R = 0,24–0,56$) параметров скорости ультразвукового сигнала с механическими свойствами древесины [19], что было выражено только для образцов из древесины сосны.

Результаты практического применения различных акустических приборов и преобразователей с варьируемыми частотами (45, 75, 90 и 150 кГц) для оценки дефектов в деревянных брусках исторического здания представлены в работе M. Kloiber et al. [12]. Авторами отмечается статистически значимое отличие средних скоростей сигналов, измеренных разными приборами, а наибольшая скорость получена для прибора Fakopp 2D с частотой преобразователей 90 кГц (Fakopp Enterprise Bt., Шопрон, Венгрия). Для определения плотности и поиска скрытых дефектов в древесине и древесных материалах

использовались пьезоэлектрические преобразователи и с более высокими частотами – до 2,5 МГц [4, 5].

Вопрос влияния частоты ультразвуковых преобразователей на скорость сигнала и точность косвенного определения физико-механических свойств древесины не раскрыт исследователями полностью, в т. ч. следует принять во внимание появление на рынке новых отечественных ультразвуковых приборов компании ООО НПП «Интерприбор» (Челябинск, Россия). Целью данной работы являлась оценка воздействия частоты ультразвуковых преобразователей на точность косвенного определения плотности, модуля упругости и предела прочности древесины при статическом изгибе с дальнейшим проецированием результатов на неразрушающий контроль свойств древесины у растущих деревьев, в пиломатериалах и элементах деревянных конструкций.

Объекты и методы исследования

Лабораторные исследования проведены на 176 прямослойных бездефектных образцах древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в форме прямоугольной призмы с поперечным сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 300 мм, изготовленных из заболони и ядра 2 сердцевинных досок и кондиционированных в климатической камере КТХВ-74-70/100 (АО «Смоленское СКТБ СПУ», Смоленск, Россия) при 20 °С/65 % RH до нормализованной влажности. Плотность древесины определяли по ГОСТ 16483.1–84, влажность – по ГОСТ 16483.7–71 сушильно-весовым способом по отдельной партии из 25 образцов. Скорость ультразвукового сигнала рассчитывали по времени его прохождения через образец вдоль волокон. Измерения проводили посредством сухого акустического контакта с расположением ультразвуковых преобразователей согласно схеме, представленной на рис. 1. Установление времени прохождения ультразвукового сигнала осуществлялось в автоматическом режиме по переднему фронту сигнала с использованием приборов Пульсар 2.2 (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) с номинальной частотой преобразователей 60 кГц и Pundit PL-200 (Proseq SA, Шверценбах, Швейцария) с номинальными частотами преобразователей 24, 54 и 150 кГц.

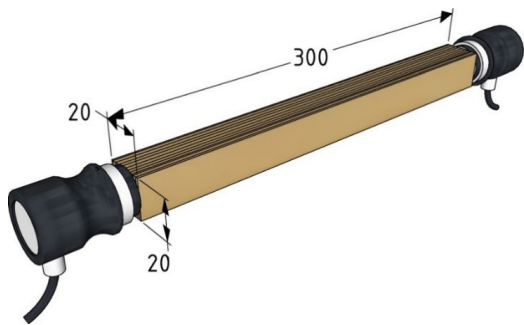


Рис. 1. Схема измерения времени прохождения ультразвукового сигнала вдоль волокон образца древесины

Fig. 1. The diagram of measuring the time of ultrasonic signal passage along the grains of a wood sample

Прогнозирование физико-механических свойств древесины осуществлялось также по динамическому модулю упругости (МПа), который определялся без учета коэффициентов поперечной деформации древесины [15, 27] по формуле [9, 17]

$$E_{\text{дин}} = \rho_{12} V^2,$$

где ρ_{12} – плотность при нормализованной влажности ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$); V – скорость ультразвукового сигнала ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$).

Деформативность и предел прочности древесины при статическом изгибе определяли в соответствии с ГОСТ 16483.3–84 и ГОСТ 16483.9–73 на универсальной испытательной машине УТС-111.2-100-62 (ООО «Тестсистемы», Иваново, Россия) до момента снижения нагрузки более чем на 30 % от максимальной при разрушении образца. Статический модуль упругости измеряли на прямолинейном участке диаграммы усилие-прогиб в пределах 200–700 Н.

Статистическая обработка результатов измерений и расчетов проводилась с использованием программного обеспечения Microsoft Excel (Microsoft Corp., Редмонд, Вашингтон, США), SigmaPlot 14.0 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, Калифорния, США) и Statgraphics 19 (Statpoint Technologies Inc., Плейнс, Вирджиния, США). Используемые обозначения оцененных параметров и единиц их измерения следующие: $\sigma_{\text{стат}}$ – предел прочности при статическом изгибе, МПа; $E_{\text{стат}}$ – модуль упругости при статическом изгибе, МПа; V^{60} , V^{24} , V^{54} , V^{150} – скорость ультразвукового сигнала, прибор Пульсар 2.2, 60 кГц, прибор Pundit PL-200, 24, 54, 150 кГц соответственно, м·с⁻¹; $E_{\text{дин}}^{60}$, $E_{\text{дин}}^{24}$, $E_{\text{дин}}^{54}$, $E_{\text{дин}}^{150}$ – динамический модуль упругости, сигнал частотой 60, 24, 54 и 150 кГц соответственно, МПа.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования показали, что все оцениваемые параметры имеют пределы вариабельности и особенности распределения в существующей выборке образцов древесины (табл. 1), средняя влажность которых после кондиционирования составляла 10,4 % ($S_x = 0,75$, $CV = 7,2$ %). Наиболее значительно варьировали модуль упругости и предел прочности древесины при статическом изгибе, а также динамический модуль упругости. Плотность древесины, а особенно скорость прохождения в ней ультразвукового сигнала, определяющие динамический модуль упругости, варьировали гораздо слабее.

Таблица 1

Вариабельность оцениваемых параметров в исследованной выборке образцов
The variability of the evaluated parameters in the studied sample set

Параметр	$M \pm m$	$X_{\min}$	$X_{\max}$	S_x	CV	$A_{\text{ст}}$	$E_{\text{ст}}$	Однородность средних
$\sigma_{\text{стат}}$	$79,4 \pm 0,8$	50,3	102	10,0	12,7	–0,78	0,01	–
$E_{\text{стат}}$	10354 ± 106	6827	13363	1412	13,6	–0,87	0,88	–
$E_{\text{дин}}^{60}$	12812 ± 127	8670	16438	1695	13,2	–0,42	–2,00	C
$E_{\text{дин}}^{24}$	12921 ± 146	8764	16957	1932	14,9	0,64	–2,19	C
$E_{\text{дин}}^{54}$	12894 ± 119	8898	16500	1582	12,2	–0,58	–1,89	CD
$E_{\text{дин}}^{150}$	13384 ± 135	8979	17481	1794	13,4	–0,20	–1,79	D
ρ_{12}	$467,4 \pm 3,0$	394	548	40,0	8,5	1,19	–3,04	–
V^{60}	$5226 \pm 16,8$	4486	5615	223,8	4,3	–4,08	0,77	A
V^{24}	$5244 \pm 18,9$	4545	5714	251,4	4,8	–2,21	–1,06	A
V^{54}	$5247 \pm 17,9$	4508	5695	238,5	4,6	–3,51	0,62	A
V^{150}	$5342 \pm 18,1$	4560	5753	240,8	4,5	–3,58	0,35	B

Примечание: $M \pm m$ – среднее значение параметра и его ошибка; $X_{\min}$, $X_{\max}$ – минимальное и максимальное значения параметра; S_x – стандартное отклонение параметра; CV – коэффициент вариации, %; $A_{\text{ст}}$ – стандартизованная асимметрия; $E_{\text{ст}}$ – стандартизированный эксцесс.

Множественное сравнение средних (по критерию Тьюки) [2] показателей выборок скорости и динамического модуля упругости, полученных с применением ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты, выявило значимые различия. Так, скорость прохождения ультразвукового сигнала вдоль волокон древесины, полученная посредством преобразователей с номинальной частотой 60, 24, 54 кГц значимо отличалась от скорости, полученной с использованием преобразователя с частотой 150 кГц, что согласуется с результатами исследований [1, 13]. Схожий результат относится и к динамическому модулю упругости, средние значения которого с использованием преобразователей 150 кГц значимо отличались от показателей, полученных при частотах 24, 60 кГц. Данный итог обусловлен увеличением скорости ультразвуковых колебаний при росте ее частоты [13].

Для оценки точности ультразвуковых преобразователей в табл. 2 приведены коэффициенты детерминации линейных моделей взаимосвязи скорости и динамического модуля упругости вдоль волокон древесины, измеренные при помощи ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты, с плотностью, пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе.

Таблица 2

Коэффициенты детерминации линейных моделей взаимосвязи плотности, предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе со скоростью ультразвукового сигнала и динамическим модулем упругости
The coefficients of determination of linear models of the relationship between density, ultimate strength and modulus of elasticity under static bending with the ultrasonic signal velocity and the dynamic modulus of elasticity

	V^{60}	V^{24}	V^{54}	V^{150}	$E_{\text{дин}}^{60}$	$E_{\text{дин}}^{24}$	$E_{\text{дин}}^{54}$	$E_{\text{дин}}^{150}$
ρ	0,05	0,14	0	0,03	0,61	0,64	0,45	0,57
$\sigma_{\text{стат}}$	0,38	0,48	0,20	0,36	0,74	0,73	0,69	0,73
$E_{\text{стат}}$	0,59	0,68	0,36	0,55	0,91	0,88	0,88	0,90

Выявлено отсутствие взаимосвязи плотности древесины сосны со скоростью ультразвукового сигнала. Это согласовывается с ранее полученными данными на образцах древесины и растущих деревьях [20, 21]. Заметная корреляционная связь ($R^2 = 0,55\text{--}0,68$) выявлена между скоростью ультразвукового сигнала, полученной с помощью преобразователей с частотами 24, 60 и 150 кГц, и модулем упругости при статическом изгибе, умеренная связь ($R^2 = 0,36\text{--}0,48$) – с пределом прочности древесины при статическом изгибе. При использовании преобразователя номинальной частотой 54 кГц установлена наименьшая степень взаимосвязи скорости ультразвукового сигнала с пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе.

Точность оценок предела прочности ($R^2 = 0,69\text{--}0,74$) и модуля упругости ($R^2 = 0,88\text{--}0,91$) при статическом изгибе по связи с динамическим модулем упругости, как оказалось, не зависит от номинальной частоты ультразвукового преобразователя и при этом имеет высокую взаимосвязь с данными параметрами. Достоверность разности коэффициентов детерминации определялась как достоверность разности средних по критерию Стьюдента по крайним значениям из 4 выборок.

Результаты регрессионного анализа сопряженности значений динамического модуля упругости вдоль волокон, полученных с применением ультразвуковых преобразователей с номинальными частотами 24, 54, 60 и 150 кГц, с пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе представлены на рис. 2 и в табл. 3.

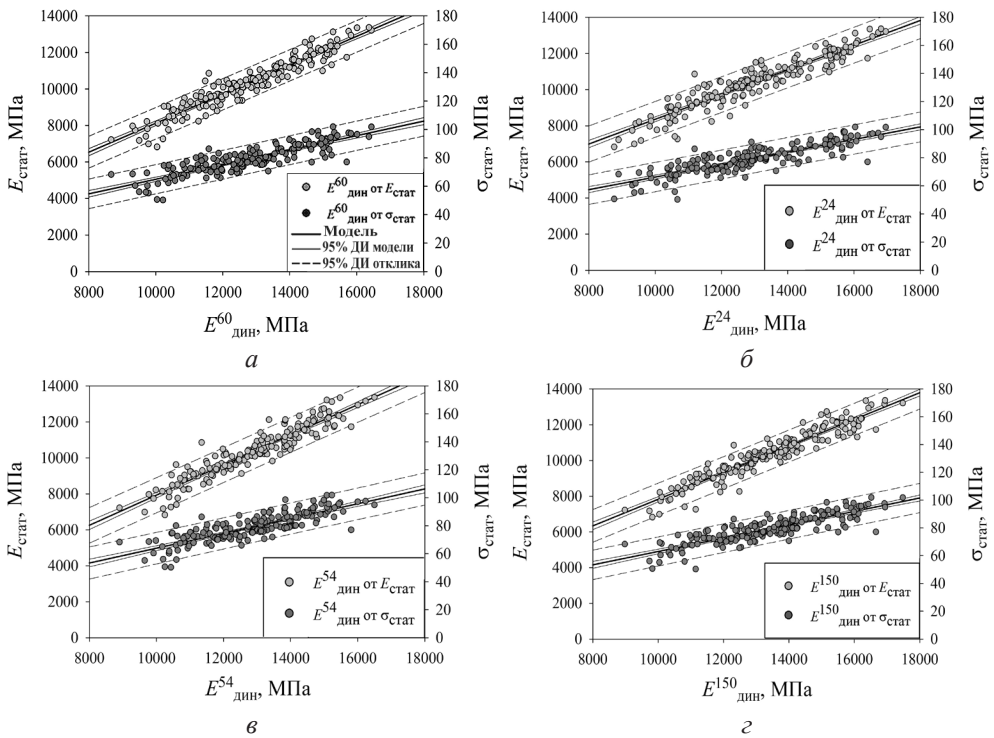


Рис. 2. Регрессионные модели взаимосвязи предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе с динамическим модулем упругости, полученным при применении ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты (ДИ – доверительный интервал)

Fig. 2. The regression models of the relationship between the ultimate strength and modulus of elasticity under static bending with the dynamic modulus of elasticity obtained using ultrasonic transducers of various nominal frequencies: (ДИ – the confidence interval)

Таблица 3

Регрессионные модели связи предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе с динамическим модулем упругости, полученным при применении ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты

The regression models of the relationship between the ultimate strength and modulus of elasticity under static bending with the dynamic modulus of elasticity obtained using ultrasonic transducers of various nominal frequencies

Регрессионная модель	Обозначение на рис. 2	R ²	SEE
$E_{\text{стат}} = 0,793E_{\text{дин}}^{60} + 193,53^*$	а	0,91	432,60
$\sigma_{\text{стат}} = 0,005E_{\text{дин}}^{60} + 13,71$		0,74	5,16
$E_{\text{стат}} = 0,684E_{\text{дин}}^{24} + 1513,55$	б	0,88	498,20
$\sigma_{\text{стат}} = 0,00447E_{\text{дин}}^{60} + 21,59$		0,73	5,24

Окончание табл. 3

Регрессионная модель	Обозначение на рис. 2	R ²	SEE
$E_{\text{стат}} = 0,838E_{\text{дин}}^{54} - 450,38^*$	6	0,88	488,90
$\sigma_{\text{стат}} = 0,005E_{\text{дин}}^{54} + 11,05$		0,69	5,65
$E_{\text{стат}} = 0,746E_{\text{дин}}^{150} - 370,97^*$	2	0,90	452,90
$\sigma_{\text{стат}} = 0,00482E_{\text{дин}}^{150} + 14,86$		0,73	5,23

Примечание: R² – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации. *Незначимые коэффициенты модели.

Полученные регрессионные модели с высокой точностью прогнозируют модуль упругости, предел прочности и предел прочности древесины сосны при статическом изгибе и могут быть использованы для оценки ее технического качества у растущих деревьев, в пиломатериалах и элементах деревянных конструкций. Плотность древесины при этом устанавливается косвенными неразрушающими методами контроля на образцах незначительного объема по кернам [3] или образцам стружки [7], а также измерением сопротивления сверлению [10, 16, 19] с учетом влияния влажности на скорость прохождения сверла в древесину и плотности древесины.

Заключение

Установлено, что частота ультразвуковых преобразователей устройств Пульсар 2.2 и Pundit PL-200 не оказывает значимого влияния на точность косвенного определения модуля упругости и предела прочности древесины сосны при статическом изгибе по динамическому модулю упругости. Вместе с тем максимальный коэффициент детерминации для линейных моделей взаимосвязи деформативности (R² = 0,91) и предела прочности при статическом изгибе (R² = 0,74) с динамическим модулем упругости установлен для ультразвукового прибора Пульсар 2.2 с частотой преобразователей 60 кГц. Прогнозирование механических свойств древесины по скорости ультразвука значимо уступает по качеству моделям, основанным на параметре динамического модуля упругости, при этом подтверждено отсутствие сопряженности скорости ультразвука с плотностью древесины. Полученные регрессионные модели могут быть применены для неразрушающей оценки механических свойств древесины у растущих деревьев и в элементах деревянных конструкций при использовании акустического метода прохождения и определении динамического модуля упругости. Плотность древесины при этом следует установить, например, при использовании кернов из растущего дерева, лесоматериала, пиломатериала или изделия. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение вариабельности акустических параметров древесины сосны у растущих деревьев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бобылева Ю.Н., Давыдов С.Л., Зарецкий-Феоктистов Г.Г. К вопросу об определении упругих параметров древесины ультразвуковым методом // Изв. вузов. Лесн. журн. 1978. № 3. С. 156–159.
Bobyleva Yu.N., Davydov S.L., Zaretskij-Feoktistov G.G. On the Issue of Determining the Elastic Parameters of Wood Using the Ultrasonic Method. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1978, no. 3, pp. 156–159. (In Russ.).

2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

Kobzar A.I. *Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Scientists*. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. 816 p. (In Russ.).

3. Колесникова А.А. Исследование свойств древесины по кернам: Научное издание. Йошкар-Ола: Марийск. гос. техн. ун-т, 2002. 178 с.

Kolesnikova A.A. *The Study of Wood Properties Based on Core Samples: Scientific Publication*. Yoshkar-Ola, Mari State Technical University Publ., 2002. 178 p. (In Russ.).

4. Лакатощ Б.К. Дефектоскопия древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 182 с.

Lakatos B.K. *Wood Flaw Detection*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966. 182 p. (In Russ.).

5. Федяев А.А., Чубинский А.Н. Неразрушающие методы контроля свойств продукции из древесины. СПб.: ГАЛАНИКА, 2022. 118 с.

Fedyayev A.A., Chubinskij A.N. *Non-Destructive Methods of Testing the Properties of Wood Products*. St. Petersburg, GALANIKA Publ., 2022. 118 p. (In Russ.).

6. Arriaga F., Llana D.F., Esteban M., Íñiguez-González G. Influence of Length and Sensor Positioning on Acoustic Time-of-Flight (ToF) Measurement in Structural Timber. *Holzforschung*, 2017, vol. 71, iss. 9, pp. 713–723. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>

7. Arriaga F., Osuna-Sequera C., Bobadilla I., Esteban M. Prediction of the Mechanical Properties of Timber Members in Existing Structures Using the Dynamic Modulus of Elasticity and Visual Grading Parameters. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 322, art. no. 126512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126512>

8. Baar J., Tippner J., Rademacher P. Prediction of Mechanical Properties – Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity – of Five Tropical Species by Nondestructive Methods. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 239–252. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>

9. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2006. 394 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

10. Downes G.M., Lausberg M., Potts B.M., Pilbeam D.L., Bird M., Bradshaw B. Application of the IML Resistograph to the Infield Assessment of Basic Density in Plantation Eucalypts. *Australian Forestry*, 2018, vol. 81, iss. 3, pp. 177–185. <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1500676>

11. Kang H., Booker R.E. Variation of Stress Wave Velocity with MC and Temperature. *Wood Science and Technology*, 2002, vol. 36, pp. 41–54. <https://doi.org/10.1007/s00226-001-0129-x>

12. Kloiber M., Reinprecht L., Hrivnák J., Tippner J. Comparative Evaluation of Acoustic Techniques for Detection of Damages in Historical Wood. *Journal of Cultural Heritage*, 2016, vol. 20, pp. 622–631. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.02.009>

13. Kohlhauser C., Hellmich C., Vitale-Brovarene C., Boccaccini A.R., Rota A., Eberhardsteiner J. Ultrasonic Characterisation of Porous Biomaterials Across Different Frequencies. *Strain*, 2009, vol. 45, iss. 1, pp. 34–44. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00417.x>

14. Llana D.F., Short I., Harte A.M. Use of Non-Destructive Test Methods on Irish Hardwood Standing Trees and Small-Diameter Round Timber for Prediction of Mechanical Properties. *Annals of Forest Science*, 2020, vol. 77, art. no. 62. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00957-x>

15. Mora C.R., Schimleck L.R., Isik F., Mahon J.M., Clark A., Daniels R.F. Relationships between Acoustic Variables and Different Measures of Stiffness in Standing *Pinus taeda* Trees. *Canadian Journal of Research*, 2009, vol. 39, no. 8, pp. 1421–1429. <https://doi.org/10.1139/X09-062>

16. Nowak T.P., Jasieńko J., Hamrol-Bielecka K. In situ Assessment of Structural Timber Using the Resistance Drilling Method – Evaluation of Usefulness. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 102, part 1, pp. 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.004>

17. Proto A.R., Macrì G., Bernardini V., Russo D., Zimbalatti G. Acoustic Evaluation of Wood Quality with a Non-Destructive Method in Standing Trees: a First Survey in Italy. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2017, vol. 10, iss. 4, pp. 700–706. <https://doi.org/10.3832/ifor2065-010>

18. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: a Review. *General Technical Report FPL, GTR-70*. US Department of Agriculture, Forest Service, 1994. 39 p. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-70>

19. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Prediction of Modulus of Elasticity in Static Bending and Density of Wood at Different Moisture Contents and Feed Rates by Drilling Resistance Measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, vol. 77, pp. 833–842. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2>

20. Sharapov E., Demakov Yu., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forests*, 2024, vol. 15, no. 2, art. no. 233. <https://doi.org/10.3390/f15020233>

21. Tippner J., Hrivnák J., Kloiber M. Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood Using Acoustic Methods. *BioResources*, 2016, vol. 11, iss. 1, pp. 503–518. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.503-518>

22. 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, vol. 49, pp. 607–622. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0719-7>

23. Wang S.-Y., Chuang S.-T. Experimental Data Correction of the Dynamic Elastic Moduli, Velocity and Density of Solid Wood as a Function of Moisture Content above the Fiber Saturation Point. *Holzforschung*, 2000, vol. 54, iss. 3, pp. 309–314. <https://doi.org/10.1515/HF.2000.052>

24. Wang S.-Y., Lin C.-J., Chiu C.-M. The Adjusted Dynamic Modulus of Elasticity Above the Fiber Saturation Point in Taiwan Plantation Wood by Ultrasonic-Wave Measurement. *Holzforschung*, 2003, vol. 57, iss. 5, pp. 547–552. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.081>

25. Wang X. Acoustic Measurements on Trees and Logs: a Review and Analysis. *Wood Science and Technology*, 2013, vol. 47, pp. 965–975. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0552-9>

26. Wang X., Ross R.J., McClellan M., Barbour J., Erickson J.R., Forsman J.W., McGinnis G.D. Strength and Stiffness Assessment of Standing Trees Using a Nondestructive Stress Wave Technique. *Research Paper FPL, RP-585*. US Department of Agriculture, Forest Service, 2000. 9 p.

27. Wang X., Ross R.J., Carter P. Acoustic Evaluation of Wood Quality in Standing Trees. Part I. Acoustic Wave Behavior. *Wood and Fiber Science*, 2007, vol. 39, no. 1, pp. 28–38.

28. Yang H., Yu L., Wang L. Effect of Moisture Content on the Ultrasonic Acoustic Properties of Wood. *Journal of Forestry Research*, 2015, vol. 26, pp. 753–757. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0079-z>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Вклад авторов: Методология: Королев А.С. и Шарапов Е.С., измерения: Королев А.С., Быков А.О. и Егосин О.С., обработка, графическое представление данных: Королев А.С. и Шарапов Е.С., подготовка рукописи: Королев А.С. и Шарапов Е.С., научное руководство: Шарапов Е.С.

Authors' Contribution: Conceptualization and methodology Korolev A.S. and Sharapov E.S., laboratory tests Korolev A.S., Bykov A.O. and Egoshin O.S., processing of results and graphical presentation Korolev A.S. and Sharapov E.S., writing-review and editing Korolev and A.S., Sharapov E.S., supervision Sharapov E.S.