УДК 674.07 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-226-233

Исследование акустических свойств древесины, обработанной защитно-декоративными материалами

А.А. Талых[a], О.В. Спирин[b], А.Д. Гаврилова[c], М.А. Елхова[d]

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Россия
[a] ata_77@mail.ru, [b] olspirin@petrsu.ru, [c] annaegorova.2003@mail.ru, [d] elxx@mail.ru.
[a] http//orcid.org/0000-0002-3750-2608, [b] http//orcid.org/0009-0005-8306-5436,
[c] http//orcid.org/0009-0006-9712-5791, [d] http//orcid.org/0009-0009-9326-2045.
Статья поступила 18.06.2026, принята 04.09.2026.

Представлены некоторые направления в области исследования акустических свойств древесины. Рассмотрены установки и устройства, способствующие оптимальному выбору древесины для изготовления струнных музыкальных инструментов. Для определения акустических свойств древесины заготовок для дек струнных музыкальных инструментов даётся подробное описание конструкции экспериментальной установки, разработанной и изготовленной авторами. Приводится принципиальная схема экспериментальной установки. Показаны возможности установки для исследования древесины и древесных материалов с целью отбора заготовок для дек струнных музыкальных инструментов. Определены экспериментальные значения скорости ультразвука, модуля упругости и акустической константы для ели, сосны и фанеры без покрытия и с нанесёнными защитно-декоративными материалами: полиуретановым, акриловым, нитроцеллюлозным и шеллачным лаками. Наименьшие значения акустических показателей наблюдались у фанеры: акустическая константа (2,33–2,86), модуль упругости (2380-2800 МПа); наибольшие – у древесины ели: акустическая константа (4,39–7,09), модуль упругости (2857–5666 МПа). Результаты сравнения акустических показателей представленных пород древесины, а также фанеры без покрытия и с покрытием показали некоторое снижение акустической константы и модуля упругости для всех материалов после нанесения лака. На подложках из ели и сосны отмечается наименьшее влияние лакокрасочных материалов на акустическую константу и модуль упругости при покрытии акриловым лаком. Для образцов из ели снижение акустической константы составило 11 %, из сосны – 16 %. Уменьшение модуля упругости (жёсткости) составило 20 % – для ели и 21 % – для сосны. На подложках из фанеры все представленные лакокрасочные материалы оказывают незначительное уменьшение акустической константы и модуля упругости (в среднем на 12 %).

Ключевые слова: резонансная древесина; акустические свойства древесины; защитно-декоративные материалы; скорость распространения звука; акустическая константа; модуль упругости.

Investigation of the acoustic properties of wood treated with protective-decorative coatings

A.A. Talykh[a], O.V. Spirin[b], A.D. Gavrilova[c], M.A. Elkhova[d]

Petrozavodsk State University; 33, LeninAve., Petrozavodsk, Russia
[a] ata_77@mail.ru, [b] olspirin@petrsu.ru, [c] annaegorova.2003@mail.ru, [d] elxx@mail.ru.
[a] http//orcid.org/0000-0002-3750-2608, [b] http//orcid.org/0009-0005-8306-5436,
[c] http//orcid.org/0009-0006-9712-5791, [d] http//orcid.org/0009-0009-9326-2045.
Received 18.06.2026, accepted 04.09.2026.

Some research directions in the field of studying the acoustic properties of wood are presented. Installations and devices that facilitate the optimal selection of wood for the manufacture of stringed musical instruments are considered. To determine the acoustic properties of wood blanks for the soundboards of stringed musical instruments, a detailed description is given of the design of an experimental installation developed and manufactured by the authors. A schematic diagram of the experimental installation is presented. The capabilities of the installation for studying wood and wood-based materials with the aim of selecting blanks for the soundboards of stringed musical instruments are shown. The experimental values of the ultrasound velocity, elastic modulus and acoustic constant are determined for spruce, pine and plywood without coating and with applied protective and decorative materials: polyurethane, acrylic, nitrocellulose and shellac varnishes. The lowest values of acoustic indicators are observed for plywood: acoustic constant (2,33–2,86), elastic modulus (2380–2800 MPa). The highest values are for spruce wood: acoustic constant (4,39–7,09), elastic modulus (2857–5666 MPa). The results of comparison of the acoustic parameters of the presented wood species, as well as uncoated and coated plywood, show a slight decrease in the acoustic constant and elastic modulus for all materials after varnish application. On spruce and pine substrates, the least influence of paint-and-varnish materials on the acoustic constant and modulus of elasticity is noted when coated with acrylic varnish. For spruce samples, the decrease in the acoustic constant is 11%, for pine — 16%. The decrease in the modulus of elasticity (stiffness) is 20% for spruce and 21% for pine. On plywood substrates, all the presented paint-and-varnish materials cause an insignificant decrease in the acoustic constant and modulus of elasticity (on average by 12%).

Keywords: resonant wood; acoustic properties of wood; protective and decorative materials; sound propagation speed; acoustic constant; modulus of elasticity.

Введение. Древесина – натуральный природный конструкционный материал, широко использующийся в различных отраслях промышленности и в быту. Обладая такими свойствами, как экологичность, лёгкость обработки различными способами, упругость, достаточно высокая прочность и др. древесина нашла своё применение и как материал для изготовления музыкальных инструментов. При проектировании музыкальных инструментов особое внимание уделяется акустическим свойствам древесины, так как они определяют тембр, громкость, сустейн и общую звуковую палитру инструмента [1].

Вопросы, связанные с исследованием акустических свойств древесины представлены в научных работах В.И. Федюкова, Е.Ю. Салдаевой, И.И. Пищик и др. [2–12].

Современные научные исследования в области акустических свойств древесины посвящены вопросам изучения древесины из старых деревянных конструкций [4, 7], перспективам отбора, целевого использования и выращивания резонансной древесины в лесах России [2, 10], разработки методик ранней неразрушающей диагностики резонансных свойств древесины на корню (по кернам) [6] и др.

Однако остаётся неразрешённой проблема проектирования и изготовления стационарных установок для исследования акустических свойств и тестирования скрытых дефектов заготовок из древесины для деталей (корпусов, дек) струнных музыкальных инструментов.

Акустические свойства древесины проявляются под действием механических волновых колебаний. Древесина обладает высокими упругими свойствами, которые зависят от наличия в ней клеточных стенок, а также высоким затуханием, что определяется полостями клеток. Древесину, обладающую хорошими акустическими свойствами и применяемую при производстве музыкальных инструментов, принято называть резонансной [8].

Резонансные свойства древесины, даже одной и той же породы, варьируются в зависимости от геологических и атмосферных условий в разных регионах земного шара. Более того, они могут значительно различаться даже в пределах одной и той же местности [13].

Следует учесть, что в возвышенных или горных районах деревья подвергаются воздействию ветра, что стимулирует высокий динамический модуль у древесины, так как она становится более жёсткой и отзывчивой в акустическом плане. Почвенный фактор не менее важен: бедные почвы замедляют рост, способствуя созданию идеальной мелкослойной структуры, а избыточное увлажнение, напротив, часто приводит к развитию дефектов [2].

Таким образом, резонансная древесина – это результат уникальных климатических и почвенных условий. Поэтому данный материал встречается лишь в определённых регионах и высоко ценится мастерами, изготовляющими музыкальные инструменты. Это указывает на актуальность изучения резонансных свойств различных пород древесины и древесных материалов для производства музыкальных инструментов.

С целью увеличения гидрофобности на поверхностях музыкальных инструментов используются различные виды защитно-декоративных покрытий: лаками, маслами и пропитками. Немаловажным фактором становится определение влияния вида и толщины таких покрытий на изменение акустических показателей древесины.

Целью исследования является экспериментальная проверка акустических свойств древесины, обработанной защитно-декоративными материалами, использующимися при изготовлении струнных музыкальных инструментов.

В соответствии с поставленной целью в исследовании решались следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ имеющихся установок и устройств для исследования акустических свойств древесины.
2. Разработать авторскую конструкцию для экспериментального исследования акустических свойств древесины дек струнных музыкальных инструментов.
3. Подготовить образцы из древесины ели, сосны, а также фанеры.
4. Выполнить измерения скорости распространения звука в образцах из древесины и фанеры без покрытия.
5. Обработать образцы лакокрасочными материалами: полиуретановым, акриловым, нитроцеллюлозным и шеллачным лаками.
6. Выполнить измерения скорости распространения звука в образцах из древесины и фанеры с покрытиями.
7. Определить акустическую константу и модуль упругости представленных образцов древесины и фанеры.
8. Сформулировать общие выводы и дать рекомендации по использованию авторской экспериментальной установки для исследования акустических свойств древесины.

Материалы и методы исследования. Для определения акустических свойств древесины конкретных образцов используют различные установки. Они представляют собой совокупность специализированного оборудования, которое измеряет и анализирует механические колебания в образцах древесины. Это способствует выбору древесины с оптимальными акустическими показателями.

Приведём некоторые примеры установок и устройств, предназначенных для инструментального измерения и контроля базовых акустических параметров и свойств исследуемых материалов.

На рис. 1 представлено устройство для определения акустических свойств древесины резонансным методом. Суть метода заключается в возбуждении продольных колебаний в образце древесины и определении резонансной частоты в нём.

Принцип работы данной установки заключается в создании электрических сигналов в широком диапазоне (от 1 до 10 кГц). Сигналы передаются от генератора 1 на электромеханический преобразователь 2 и преобразуются в механические колебания.

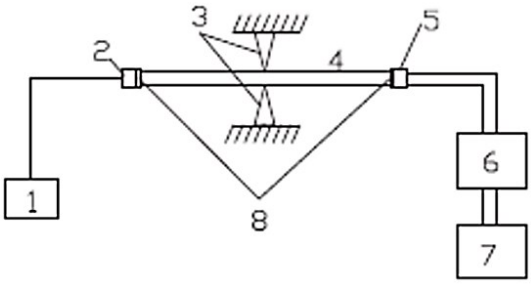


Рис. 1. Схема устройства для определения акустических свойств древесины резонансным методом: 1 – генератор звуковой частоты; 2 – преобразователь; 3 – зажимное устройство; 4 – образец; 5 – приёмник; 6 – милливольтметр; 7 – измеритель частоты; 8 – ферромагнитные пластинки

Передача колебаний осуществляется на торцы 8 образца 4, закреплённого в узловой точке 3, за счёт ферромагнитных пластинок. Колебания улавливаются приёмником 5, преобразующим их в электрические сигналы. Амплитуда данных сигналов измеряется милливольтметром 6, а частота – измерителем частоты 7. Далее находят резонансную частоту, при которой амплитуда колебаний образца становится максимальной.

На основе полученных данных о резонансной частоте, размерах и массе образца вычисляются производные акустические характеристики: динамический модуль упругости, скорость распространения звука и акустическая константа [2].

Экспериментальная установка для определения резонансной частоты в древесине (рис. 2) используется в методе с электромагнитным возбуждением. Его сущность заключается в возбуждении вынужденных колебаний в образце древесины и точном определении частоты, при которой амплитуда этих колебаний достигает максимума.

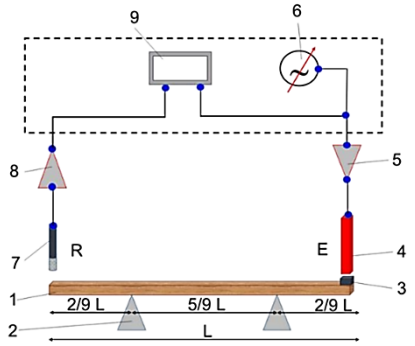


Рис. 2. Экспериментальная установка для определения резонансной частоты: 1 – деревянный образец; 2 – опоры;3 – излучающий электромагнитный преобразователь;4 – катушка; 5 – усилитель; 6 – генератор синусоидального сигнала; 7 – микрофон; 8 – предварительный усилитель для микрофона; 9 – осциллограф для визуализации сигналов

Принцип работы установки заключается в создании электрических колебаний заданной частоты при помощи генератора синусоидального сигнала 6, которые после прохождения через усилитель 5 подаются на электромагнитный преобразователь 3. При взаимодействии с образцом 1 из древесины преобразователь посылает на него вибрации. Колебания вибрирующего образца регистрирует приёмное устройство – микрофон 7 и преобразует звуковые волны в электрический сигнал.

Полученный сигнал усиливается и визуализируется на осциллографе 9, что позволяет экспериментатору точно определить резонансную частоту по максимуму амплитуды.

Для подведения итогов в данном исследовании потребуется формула 1:

$$c = 2 * f_0 * L, \quad (1)$$

где c – скорость распространения звука, м/с; L – длина образца, м; f_0 – резонансная частота, Гц [14].

Другой вариант установки для измерения скорости звука в древесине основан на ультразвуковом импульсном методе (рис. 3).

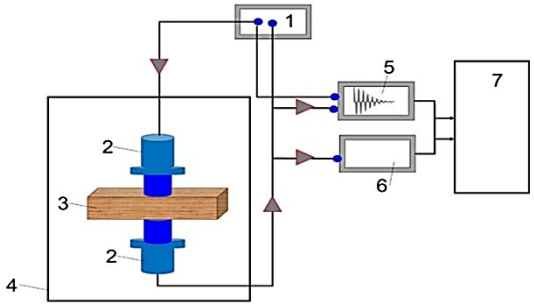


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения скорости ультразвука в древесине: 1 – генератор, 2 – передатчик,3 – образец, 4 – соединители, 5 – осциллограф, 6 – блок согласования, 7 – персональный компьютер

Суть метода состоит в определении времени прохождения ультразвукового импульса от передатчика до приёмника через образец древесины. После чего, зная длину образца, рассчитывается скорость звука в нём.

На основе полученных значений скоростей и известной плотности материала определяется модуль упругости по формуле 2 [15–18]:

$$E = \rho * V^2, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3; V – скорость ультразвука, м/с.

К преимуществу данного метода можно отнести возможность изучения анизотропии акустических параметров путём измерения скоростей звука по трём направлениям: продольном, радиальном и тангенциальном внутри древесины, меняя соответствующее расположение образца между передатчиком и приёмником.

Ввиду вышеотмеченного преимущества, для измерения акустических параметров заготовок дек струнных музыкальных инструментов нами была разработана установка по измерению скорости звука, основанная именно на ультразвуковом импульсном методе (рис. 4 и 5).

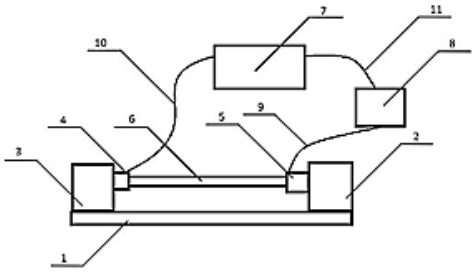


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки для определения скорости ультразвука в древесине: 1 – основание; 2 – правая стойка; 3 – левая стойка; 4 – приёмник; 5 –излучатель; 6 – образец; 7 – осциллограф; 8 – плата Arduino-nano, совмещающая в себе ультразвуковой генератор, усилитель и контроллер; 9, 10, 11 – соединительные провода

Установка (рис. 4) состоит из основания 1 (плита МДФ), двух стоек 2 и 3, в которых закреплены излучатели Ланжевена 4 и 5. Одна из стоек, расположенная справа (рис. 5), является неподвижной. Левая стойка может устанавливаться на основании в трёх положениях для исследования заготовок различной длины (от 400 до 600 мм).

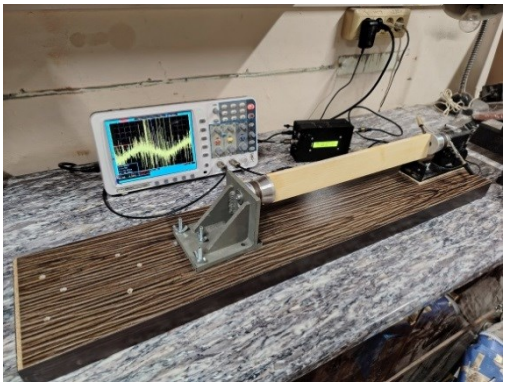


Рис.5. Общий вид экспериментальной установки для определения акустических показателей древесины

Представленная конструкция установки отличается от аналогов следующими принципиальными отличиями:

– генератор электрических сигналов регулируемой частоты в диапазоне от 39 до 42 кГц с точностью подстройки 1 Гц, частотой модуляции 3 Гц и выходной мощностью до 15 Вт имеет меньшие габариты в сравнении с аналогами (типа AVS-A);

– генератор выполнен на современной элементной базе, удобной для пользователя. Возможность регулировки частоты генератора позволяет провести настройку под любой излучатель Ланжевена;

– генератор характеризуется ремонтопригодностью (приспособленностью к проведению ремонта) и совместимостью (при поломке быстро меняются недорогие и легкодоступные на рынке продаж совместимые комплектующие в виде отдельных модулей);

– разработанная установка отличается от аналогов мобильностью ввиду удобного монтажа-демонтажа её отдельных элементов (крепление деталей с использованием гаек-барашек);

– в каждой из двух опор механическим путём (с помощью шпилечного соединения) закреплены излучатели Ланжевена. В корпусе излучателей выполнено отверстие и нарезана внутренняя резьба под один конец шпильки. Второй конец шпильки фиксируется в опоре с помощью гайки. Такой способ крепления обеспечивает жёсткость соединения опоры и излучателя. Опора в сборе с излучателем крепится к основанию (опорной поверхности) установки.

Принцип работы установки основан на прямом пьезоэлектрическом преобразовании импульсно-модулированного сигнала прецизионного синтезатора частоты посредством излучателя Ланжевена, прижатого к одному из торцов заготовки, и обратном пьезоэлектрическом преобразовании таким же излучателем на другом торце. Резонансная частота каждого излучателя 40 кГц. Управление синтезатором частоты осуществляется платой Arduino-nano, позволяя произвести точную настройку резонансной частоты излучателя, импульсную модуляцию и их отображение на lcd- дисплее. Необходимость импульсной модуляции объясняется тем, что геометрические размеры образцов достаточно велики, вследствие чего время задержки значительно превышает период несущей частоты сигнала.

Синтезатор частоты (рис. 6) собран на основе микросхемы ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) AD9850, задающего кварцевого тактового генератора на 125 МГц и фильтра низких частот на 70 МГц для сглаживания шумов дискретизации ЦАП. Схема способна обеспечить стабильный синусоидальный сигнал в диапазоне частот от 0 до 40 МГц,

Выходной усилитель собран на базе модуля с микросхемой TDA7297, способной увеличить мощность синтезатора частоты до 15 Вт.



Рис. 6. Блок синтезатора частоты с выходным усилителем

На осциллографе определяется время задержки между передним фронтом «цуга», идущего на излучатель, и передним фронтом «цуга» с приёмника. Стоит отметить, что передний фронт сигнала с приёмника значительно размазан. Это связано с ограничением, накладываемой добротностью излучателя. Время задержки определялось с помощью осциллографа АКИП-4122/2 (рис. 7).

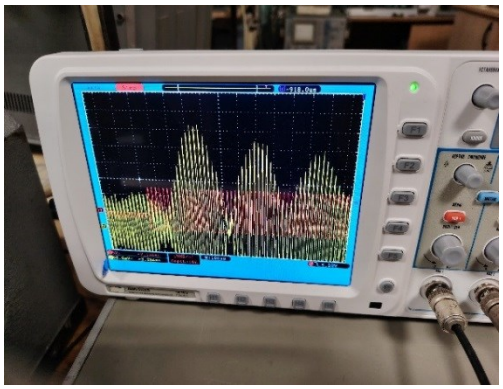


Рис. 7. Время задержки между моментами излучения и приёма сигнала на осциллографе

Для проведения исследования с помощью разработанной установки были изготовлены образцы из древесины ели, сосны, а также древесного материала – фанеры ФК (рис. 8).



Рис. 8. Образцы из ели, сосны, фанеры для исследования

Древесина для заготовок была высушена естественным путём до влажности 10 %. Определение влажности производилось влагомером Condtrol Hydro-Tec 3-14-020. Заготовки радиального распила с примерно одинаковой шириной годичных слоёв были отобраны с разных партий поставок пиломатериалов (досок).

Затем из заготовок на круглопильном станке изготавливались образцы с размерами 8×50×400 мм. Параметры образцов приближены к размерам заготовок для дек пятиструнного музыкального инструмента «Кантеле». Образцы тщательно отшлифованы, без видимых дефектов.

На первом этапе исследования была измерена скорость ультразвука в образцах без покрытия по известным значениям длины образцов и определяемому на осциллографе времени задержки сигнала. На втором этапе исследовались образцы с покрытиями различными лакокрасочными материалами: полиуретановым, акриловым, нитроцеллюлозным и шеллачным лаками.

Защитно-декоративное покрытие формировалось в 3 слоя с межслойным шлифованием мелкой абразивной шкуркой (Р240-Р320), с целью удаления поднявшегося ворса. По каждому виду подложки и покрытия было изготовлено по 10 образцов (выборка n = 10). За искомый показатель принималось среднее арифметическое значение.

Выбор данных видов лакокрасочных материалов и трёхслойного покрытия обусловлен общей технологией и рекомендациями по отделке музыкальных инструментов [1, 19].

Ключевым параметром для данного исследования выступает акустическая константа, определяемая по формуле 3:

$$K = \frac{c}{\rho}, \quad (3)$$

где c – скорость звука, м/с; ρ – плотность материала, кг/м^3 [20].

Модуль упругости определялся по формуле 2, представленной выше.

Скорость распространения ультразвука вычисляли по формуле 4:

$$V = \frac{L}{t}, \quad (4)$$

где L – длина образца, м; t – задержка времени, с.

Интерпретация полученных результатов проведена с помощью двухфакторного дисперсионного анализа для акустической константы и модуля упругости древесины в зависимости от вида лака и типа подложки. Для расчёта использовалось программное обеспечение Microsoft Excel (вкладка «Анализ данных»).

Результаты и обсуждения. Экспериментальные измерения позволили получить значения скоростей ультразвука в древесине образцов. По имеющимся значениям скоростей определены акустическая константа (табл. 1–4) и модуль упругости (табл. 5–8).

Таблица 1. Значение акустической константы образцов, обработанных акриловым лаком

Материал образцов / покрытие	Без покрытия	Трёхслойное
Ель	7,09	5,60
Сосна	6,21	5,21
Фанера ФК	2,86	2,33

Таблица 2. Значение акустической константы образцов, обработанных нитроцеллюлозным лаком

Материал образцов / покрытие	Без покрытия	Трёхслойное
Ель	6,54	5,43
Сосна	5,60	4,11
Фанера ФК	2,86	2,46

Таблица 3. Значение акустической константы образцов, обработанных полиуретановым лаком

Материал образцов / покрытие	Без покрытия	Трёхслойное
Ель	6,80	4,90
Сосна	6,08	5,10
Фанера ФК	2,86	2,82

Таблица 4. Значение акустической константы образцов, обработанных шеллачным лаком

Материал образцов / покрытие	Без покрытия	Трёхслойное
Ель	6,54	4,39
Сосна	6,08	4,36
Фанера ФК	2,86	2,52

Таблица 5. Значение модуля упругости образцов, обработанных акриловым лаком (МПА)

Материал образцов / покрытие	Без покрытия	Трёхслойное
Ель	5221	4163
Сосна	3755	3000
Фанера ФК	2800	2578

Таблица 6. Значение модуля упругости образцов, обработанных нитроцеллюлозным лаком (МПа)

Материал образцов / покрытие	Без покрытия	Трёхслойное
Ель	4777	2857
Сосна	4163	2666
Фанера ФК	2800	2446

Таблица 7. Значение модуля упругости образцов, обработанных полиуретановым лаком (МПа)

Материал образцов / покрытие	Без покрытия	Трёхслойное
Ель	5666	3187
Сосна	4000	3062
Фанера ФК	2800	2840

Таблица 8. Значение модуля упругости образцов, обработанных шеллачным лаком (МПа)

Материал образцов / покрытие	Без покрытия	Трёхслойное
Ель	5666	3562
Сосна	4163	2518
Фанера ФК	2800	2380

Результаты проведённого двухфакторного дисперсионного анализа для акустической константы и модуля упругости приведены в табл. 9 и 10.

Таким образом, исходя из полученных в табл. 9 и 10 результатов, можно сделать вывод, что на значения акустической константы и модуля упругости оказывает значительное влияние тип подложки на уровне значимости 5 %, и не выявлено влияния от лакового покрытия образца на уровне значимости 5 %.

Результаты исследований, представленных в табл. 1–8, позволяют констатировать, что наименьшие значения акустических показателей (акустической константы и модуля упругости) наблюдаются у фанеры, наибольшие показатели – у ели. Прослеживается тенденция некоторого снижения акустических показателей (акустической константы и модуля упругости) для всех типов подложек после нанесения лакокрасочных материалов.

На подложках из ели и сосны отмечается наименьшее влияние лакокрасочных материалов на акустическую константу и модуль упругости при покрытии акриловым лаком. Для образцов из ели снижение акустической константы составило 11 %, из сосны – 16 %. Уменьшение модуля упругости (жёсткости) составило 20 % – для ели и 21 % – для сосны.

Также выявлено, что на подложках из фанеры все представленные лакокрасочные материалы оказывают незначительное уменьшение акустической константы и модуля упругости (в среднем на 12 %). Это связано с тем, что фанера состоит из слоёв шпона, проклеенных карбамидными смолами (ФК). Эти смолы создают плотный барьер, через который лак не может проникнуть глубже первого слоя шпона. Кроме этого, лицевые слои фанеры отшлифованы и спрессованы до высокой плотности, что ограничивает впитывающую способность пор древесины.

Таблица 9. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для акустической константы в зависимости от вида лака и типа подложки

Источник вариации	*SS*	*df*	*MS*	*F*	P-Значение	F критическое
Лак	0,21	2	0,11	2,70	0,27	19,00
Тип подложки	9,31	1	9,31	238,45	0,00	18,51
Погрешность	0,08	2	0,04	-	-	-
Итого	9,60	5	-	-	-	-

Таблица 10. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модуля упругости в зависимости от вида лака и типа подложки

Источник вариации	*SS*	*df*	*MS*	*F*	P-Значение	F критическое
Лак	187140,92	3	62380,31	1,12	0,41	4,76
Тип подложки	5864014,54	2	2932007,27	52,46	0,00	5,14
Погрешность	335311,46	6	55885,24	-	-	-
Итого	6386466,92	11	-	-	-	-

Заключение. Таким образом, проведённое исследование позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

1. Отмечается некоторая зависимость акустических показателей древесины от наличия лакокрасочных материалов в сторону уменьшения значений акустической константы и модуля упругости (жёсткости).

2. На показатели акустической константы и модуля упругости оказывает значительное влияние тип подложки (на уровне значимости 5 %).

3. Акустические показатели фанеры значительно уступают показателям натуральной древесины. Вместе с тем, запасы качественной резонансной древесины ели в мире значительно сокращаются, а её стоимость неуклонно растёт. Поэтому актуальным становится вопрос поиска доступных и эффективных материалов (заменителей древесины) для изготовления музыкальных инструментов.

4. Все рассмотренные лакокрасочные материалы оказывают меньшее изменение (уменьшение) акустической константы и модуля упругости на подложках из фанеры (в отличие от натуральной древесины).

5. Из рассмотренных лакокрасочных материалов наименьшее влияние на акустические показатели древесины оказывает акриловый лак.

Литература

1. Бендас Л.Л., Кузнецов И.А. Производство и ремонт щипковых музыкальных инструментов. М., 1983. 288 с.
2. Федюков В.И. Состояние и перспективы отбора, целевого использования и выращивания резонансной древесины в лесах России // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 5. С. 142–156.
3. Федюков В.И., Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М. Стандартизация резонансной древесины: необходимо совершенствование // Стандарты и качество. 2014. № 4. С. 54–57.
4. Федюков В.И., Чернов В.Ю., Чернова М.С., Цой О.В. Резонансные акустические и колориметрические характеристики древесины из ретросооружений // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 6. С. 164–177.
5. Когогин, А.В., Салдаева Е.Ю. Акустические свойства древесины клёна как материала для изготовления музыкальных инструментов // Стратегии развития региона на основе модернизации приоритетных отраслей его экономики: мат-лы II Междунар. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола, 2018. С. 146–148.
6. Салдаева Е.Ю. Разработка метода ранней неразрушающей диагностики резонансных свойств древесины ели на корню: специальность 05.21.05 «Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Салдаева Екатерина Юрьевна. Воронеж, 2015. 22 с.
7. Пищик И.И. К вопросу использования длительно выдержанной древесины в музыкальных инструментах // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2012. № 3. С. 115-119.
8. Бърданов Н. Влияние некоторых факторов на акустические свойства древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2018. № 2. С. 12–18.
9. Коренков В.В., Гусев А.А., Васюкова И.А., Головин Ю.И. Акустические свойства древесины, выявляемые методом наноиндентирования с наложением малой дополнительной осциллирующей нагрузки // Известия вузов. Физика. 2022. Т.65, № 12(781). С. 146–148.
10. Колесникова А.А., Апремов А.А., Галяутдинов А.Р. Акустические свойства древесины овражных деревьев ели // Деревообрабатывающая промышленность. 2010. № 2. С. 29–31.
11. Cristini V., Tippner Ja., Tomšovský M. Acoustic tomography outputs in comparison to the properties of degraded wood in beech trees // Holz als Rohund Werkstoff. 2022. Vol. 80, № 6. P. 1377–1387.
12. Kim M. Ji., Jang S.Yu., Shim K.Bo. Improvement of acoustic properties of alder and soft maple modified with wood rot fungi // BioResources. 2025. Vol. 20, № 2. P. 3653–3662.
13. Bridge M. Can Dendrochronology Be Used to Indicate the Source of Oak within Britain? // Vernacular Architecture. 2001. Vol. 32. P. 1–12.
14. Hearmon R.F.S. Vibration testing of wood // Forest Product Journal. 1966. Vol. 16. P. 29–40.
15. Cretu N. Wave transmission approach based on modal analysis for embedded mechanical systems // Journal of Sound and Vibration. 2013. Vol. 332. P. 4940–4947.
16. Pop M.I., Cretu N. Intrinsic transfer matrix method and split quaternion formalism for multilayer media // Wave Motion. 2016. Vol. 65, P. 105–111.
17. Dinulica F., Stanciu MD., Savin A. Correlation between anatomical grading and acousticelastic properties of resonance spruce wood used for musical instruments // Forests. 2021. Vol. 12, P. 1122.
18. Grimberg R., Savin A., Steigmann R., Stanciu MD., Grum J. Determination of Elastic Properties of CFRP Using Lamb Waves Resonant Spectroscopy, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, Hamburg, Germany, 22–24 Nov 2010. P. 1–8.
19. Талых А.А. Из опыта проектирования и изготовления народных музыкальных инструментов-кантеле в вузе // Проблемы современного педагогического образования. 2017. № 54-3. С.198–205.
20. Алексеев И.А., Полубояринов О.И. Лесное товароведение с основами древесиноведения. Учебное пособие. Йошкар-Ола, 2006. 457 с.

References

1. Bendas L.L., Kuznetsov I.A. Production and repair of plucked musical instruments. Moscow, 1983. 288 p.
2. Fedyukov V.I. Status and prospects of selection, targeted use and cultivation of resonant wood in the forests of Russia // News of higher educational institutions. Forestry magazine. 2016. No. 5. P. 142–156.
3. Fedyukov V.I., Saldaeva E.Yu., Tsvetkova E.M. Standardization of resonant wood: improvement is necessary // Standards and quality. 2014. No. 4. P. 54–57.
4. Fedyukov V.I., Chernov V.Yu., Chernova M.S., Tsoi O.V. Resonant acoustic and colorimetric characteristics of wood from retro structures // News of higher educational institutions. Forestry magazine. 2022. No. 6. P. 164–177.
5. Kogogin, A.V., Saldaeva E.Yu. Acoustic properties of maple wood as a material for the manufacture of musical instruments // Strategies for the development of a region based on the modernization of priority sectors of its economy: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. Yoshkar-Ola, 2018. P. 146-148.
6. Saldaeva E. Yu. Development of a method for early nondestructive diagnostics of resonance properties of standing spruce wood: specialty 05.21.05 "Wood science, technology and equipment for wood processing": abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Saldaeva Ekaterina Yuryevna. Voronezh, 2015. 22 p.
7. Pishchik, I.I. On the issue of using long-aged wood in musical instruments // Bulletin of the Moscow State Forest University - Forest Bulletin. 2012. No. 3. P. 115–119.
8. Bärdanov N. Influence of some factors on the acoustic properties of wood // Woodworking industry. 2018. No. 2. P. 12–18.
9. Korenkov V.V., Gusev A.A., Vasyukova I.A., Golovin Yu.I. Acoustic properties of wood revealed by the nanoindentation method with the imposition of a small additional oscillating load // Bulletin of universities. Physics. 2022. Vol. 65, No. 12 (781). P. 146–148.
10. Kolesnikova A.A., Apremov A.A., Galyautdinov A.R. Acoustic properties of wood of ravine spruce trees // Woodworking industry. 2010. No. 2. P. 29–31.
11. Cristini V., Tippner Ja., Tomšovský M. Acoustic tomography outputs in comparison to the properties of degraded wood in beech trees // Holz als Rohund Werkstoff. 2022. Vol. 80, No. 6. P.1377–1387.

12. Kim M. Ji., Jang S.Yu., Shim K.Bo. Improvement of acoustic properties of alder and soft maple modified with wood rot fungi // BioResources. 2025. Vol. 20, No. 2. P. 3653–3662.
13. Bridge M. Can Dendrochronology Be Used to Indicate the Source of Oak within Britain? // Vernacular Architecture. 2001. Vol. 32. P. 1–12.
14. Hearmon R.F.S. Vibration testing of wood // Forest Product Journal. 1966. Vol. 16. P. 29–40.
15. Cretu N. Wave transmission approach based on modal analysis for embedded mechanical systems // Journal of Sound and Vibration. 2013. Vol. 332. P. 4940–4947.
16. Pop M.I., Cretu N. Intrinsic transfer matrix method and split quaternion formalism for multilayer media // Wave Motion. 2016. Vol. 65, P 105–111.
17. Dinulica F., Stanciu MD., Savin A. Correlation between anatomical grading and acousticelastic properties of resonance spruce wood used for musical instruments // Forests. 2021. Vol. 12, P. 1122.
18. Grimberg R., Savin A., Steigmann R., Stanciu MD., Grum J. Determination of Elastic Properties of CFRP Using Lamb Waves Resonant Spectroscopy, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, Hamburg, Germany, 22-24 Nov 2010. P. 1–8.
19. Talykh A.A. From the experience of designing and manufacturing folk musical instruments - kantele at the university // Problems of modern pedagogical education. 2017. No. 54-3. P. 198–205.
20. Alekseev I.A., Poluboyarinov O.I. Forest commodity science with the basics of wood science. Study guide. Yoshkar-Ola, 2006. 457 p.