НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-787

ФИЗИКА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ И ЭВОЛЮЦИЯ СТРУННО-СМЫЧКОВЫХ СИСТЕМ

Атаева Селби
Преподаватель, Туркменская национальная консерватория имени
Маи Кулиевой
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В настоящей исследовательской работе осуществляется развернутый, глубокий и системный научно-теоретический анализ физико-акустических принципов звукообразования, нелинейной динамики и исторической эволюции струнно-смычковых музыкальных инструментов. В центре внимания находится исследование универсальности волновых уравнений колебания гибких струн с учетом жесткости на изгиб, внутренних сил трения и продольного натяжения. В статье подробно рассматриваются математические модели автоколебательных процессов, возникающих при сухо трении канифолированного волоса смычка по металлической или жильной струне, явления ингармоничности обертонов, а также особенности распределения звуковых полей в пространстве. Отдельный акцент сделан на ортотропных характеристиках древесины резонансной ели и клена, принципах построения сводов верхней и нижней дек, роли душки и басовой пружины в формировании тембровой структуры, а также на применении современных методов лазерной виброметрии и численного моделирования методом конечных элементов для анализа модальных колебаний корпуса. На основе фундаментального междисциплинарного синтеза физической акустики, теоретической механики, органологии и материаловедения формулируются ключевые концепции создания струнных инструментов с изначальными и программируемыми акустическими параметрами.

Ключевые слова: струнные инструменты, нелинейная акустика, автоколебания, смычковый фрикционный контакт, ортотропия древесины, метод конечных элементов, резонансный корпус, физика звукообразования, картины Хладни, спектральный анализ.

Введение: междисциплинарный статус и физические основы органологии струнных инструментов

Изучение струнно-смычковых музыкальных инструментов в современной науке вышло далеко за рамки описательного музыкознания и традиционного органологического анализа. Звукообразование в смычковых системах

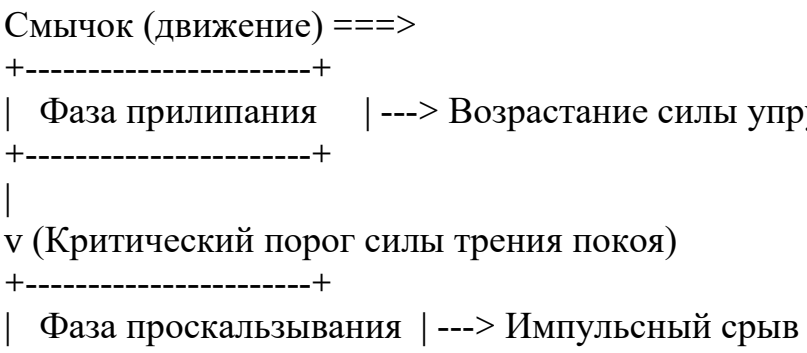
представляет собой сложный физический процесс, объединяющий нелинейную механику фрикционного контакта, теорию упругости анизотропных сред и волновые процессы в замкнутых акустических объемах. Каждая деталь смычкового инструмента — от точной геометрии корпуса до микроскопической структуры волоса смычка — выполняет строго определенную физико-акустическую функцию.

Система смычок-струна-подставка-дека-воздух является динамическим комплексом с распределенными параметрами. Для полного описания этой системы требуется привлечение уравнений математической физики, теории автоколебаний и современного численного моделирования. Целью данного исследования является фундаментальный анализ физико-математических закономерностей работы струнно-смычковых систем, механизмов передачи энергии колебания воздушной среде и эволюции конструктивных решений в контексте современных достижений физической акустики и материаловедения.

Математическое моделирование нелинейной динамики колеблющейся струны под воздействием смычка

Теоретическое описание колебаний струны начинается со свободного волнового уравнения Д'Аламбера, определяющего скорость распространения поперечных волн через натяжение и линейную плотность материала. Однако в смычковых инструментах струна находится под постоянным внешним воздействием, создающим сложные автоколебательные режимы.

Взаимодействие смычка со струной описывается физикой фрикционного контакта с сухо трением, известной как эффект прилипания и проскальзывания. Во время фазы прилипания канифолированный волос смычка захватывает струну и смещает ее из положения равновесия до тех пор, пока возвращающая сила упругости струны не превысит силу трения покоя. В этот момент происходит срыв, и струна переходит в фазу проскальзывания, быстро возвращаясь назад в противоположном направлении относительно движения смычка.



Образующаяся при этом изломная волна (волна Гельмгольца) циркулирует вдоль струны от подставки до верхнего порожка и обратно. Частота этой циркуляции строго определяет высоту извлекаемого тона. Математическое описание этого

процесса требует применения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с разрывной правой частью.

Дополнительно в модели учитывается изгибная жесткость струны, которая приводит к явлению ингармоничности, когда высшие обертоны отклоняются от точной гармонической последовательности. Наличие изгибной жесткости создает дисперсию волн, при которой высокочастотные составляющие распространяются вдоль струны с большей скоростью, чем низкочастотные. Это сглаживает острую форму волны Гельмгольца и оказывает прямое влияние на мягкость и полетность тембра.

Акустическая трансформация и ортотропные свойства резонансной древесины

Струна сама по себе имеет слишком малую площадь поперечного сечения, чтобы эффективно передавать колебания воздуху. Для превращения механических колебаний струны в слышимый акустический звук используется резонаторный корпус, состоящий из верхней и нижней дек, соединенных обечайками.

Главным материалом для изготовления верхней деки традиционно служит резонансная ель, обладающая ярко выраженными ортотропными свойствами. Физические параметры древесины — модуль упругости, плотность и коэффициент внутреннего затухания — принципиально различаются в трех направлениях: вдоль волокон, поперек волокон и в радиальном сечении. Скорость распространения звука вдоль волокон ели достигает 5000–5500 метров в секунду при низкой плотности материала (0.38–0.45 г/см³), что обеспечивает высочайший показатель акустической постоянной.

Нижняя дека и обечайки изготавливаются из волнистого клена, который обладает более высокой плотностью и жесткостью, выполняя роль отражающего фундамента и придавая прочность всей конструкции. Геометрия изгиба сводов дек рассчитывается мастера-изготовителями так, чтобы равномерно распределять колоссальное статическое давление натяжения струн, передаваемое через подставку.

Внутри корпуса устанавливаются два элемента: басовая пружина и душка. Басовая пружина — это деревянная рейка, приклеенная с внутренней стороны верхней деки вдоль линии басовых струн. Она распределяет низкочастотные колебания по всей площади деки и выравнивает упругость купола.

Душка представляющей собой небольшой цилиндрический распорный штифт из ели, установленный между верхней и нижней деками под ножкой подставки со стороны высоких струн. Душка выполняет физическую функцию асимметричного узла колебаний: она передает высокие частоты на нижнюю деку и заставляет верхнюю деку вибрировать с преобладанием вращательно-изгибных модов.

Модальный анализ и интерферометрическое исследование резонансных полей корпуса

Для изучения колебательных режимов собранного корпуса струнного инструмента применяются методы лазерной интерферометрии, голографии и сканирующей виброметрии. При возбуждении корпуса на различных частотах его поверхность распадается на сложную систему пучностей (зон максимальной амплитуды) и узловых линий (зон нулевого смещения).

Наглядно эти моды фиксируются через фигуры Хладни, получаемые при рассыпании легкого порошка на вибрирующую горизонтальную деку.

Частотный диапазон (Гц)	**Тип модальных колебаний**	**Акустическая функция**
80 – 150	Основной объемный резонанс Гельмгольца (A0)	Усиление глубокого басового регистра
200 – 350	Изгибный резонанс корпуса (M1, M2)	Формирование фундаментального тона средних струн
450 – 800	Пространственные моды дек (C3, C4)	Определение тембровой теплоты и полетности звука
1000 – 3500	Запущенные локальные резонансные зоны	Формирование ярких верхних обертонов и "певческой форманты"

Лазерные исследования показывают, что низшие моды (резонанс Гельмгольца A0 и изгибные моды корпуса M1, M2) обеспечивают излучение звука в низкочастотном диапазоне, где воздух в полости корпуса прокачивается через эфовые отверстия.

При повышении частоты выше 1000 Гц поверхность деки распадается на множество мелких локальных зон, вибрирующих в противоположных фазах. Баланс между этими частотными диапазонами определяет акустическую отзывчивость инструмента и его способность прорезать звучание оркестра в больших концертных залах.

Сравнительная физика и органология смычковых, щипковых и ударно-струнных систем

Несмотря на единую физическую природу волновых процессов в натянутой струне, способ возбуждения колебаний кардинально меняет акустический спектр и временную динамику инструмента.

Для щипковых инструментов (гитара, лютня, арфа, домбра) характерен импульсный режим возбуждения. В момент срыва струны с пальца или медиатора образуется мгновенное отклонение, после чего система переходит в режим свободного затухания. Спектральный состав звука содержит максимальное

количество высокочастотных гармоник в первую миллисекунду атаки, после чего происходит экспоненциальное падение амплитуды. Задача резонатора щипкового инструмента — максимально полно передать импульсную энергию воздуху, сохранив при этом достаточную продолжительность звучания (сустейн).

Смычковые инструменты (скрипка, альт, виолончель, контрабас) работают в режиме непрерывной энергетической подпитки за счет фрикционного контакта. Это позволяет удерживать стационарный уровень звуковой энергии любой продолжительности, управлять его спектром в процессе звучания и осуществлять динамические переходы внутри одной ноты.

Ударно-струнные системы (фортепиано, цимбалы) занимают промежуточное положение. Удар молоточка передает струне мощный начальный импульс, однако локальная деформация войлока в момент удара отфильтровывает высшие гармоники, создавая благородный, сфокусированный спектр, который затем постепенно затухает на протяжении длительного времени под контролем демпферной системы.

Применение метода конечных элементов (FEM) и компьютерное моделирование инструментостроения

Современное конструирование струнных инструментов активно использует математический аппарат метода конечных элементов (FEM). Этот подход позволяет разбить сложную геометрическую форму корпуса скрипки или виолончели на десятки тысяч элементарных объемах и рассчитать систему дифференциальных уравнений упругости для каждого фрагмента.

С помощью FEM-моделирования исследователи и мастера могут с высокой точностью прогнозировать акустическое поведение инструмента еще до начала работы с материалом. Модель позволяет менять толщину деки в различных точках, варьировать угол наклона пружины, изменять форму эфов и сразу видеть, как это повлияет на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и распределение внутренних напряжений.

Геометрическая CAD-модель корпуса
|
v
Разбиение на сетку конечных элементов (FEM)
|
v
Задание ортотропных параметров древесины (E_x, E_y, E_z, G_xy, density)
|
v
Расчет модальных частот и статических напряжений
|

Метод конечных элементов позволяет точно рассчитывать статическую деформацию верхней деки под воздействием силы натяжения струн, достигающей у виолончели 70–80 килограммов. Это предотвращает преждевременный прогиб деревянного свода и обеспечивает оптимальные условия для резонансных колебаний на протяжении десятилетий эксплуатации.

Материаловедение будущего: композитные материалы, нанопокрытия и цифровая лютерия

Традиционное использование ценных пород древесины столкнулось с серьезными экологическими и климатическими ограничениями. Дефицит высококачественной резонансной ели и клена стимулирует развитие альтернативного материаловедения в инструментостроении.

Перспективным направлением является создание корпусов и элементов смычковых инструментов из углепластика (карбона). Углеволоконные композиты обладают высочайшей специфической жесткостью и полным отсутствием гигроскопичности. За счет точной ориентации слоев углеродного волокна в эпоксидной матрице удается программировать анизотропию материала, полностью имитируя или даже превосходя упругие характеристики резонансной ели.

Карбоновые виолончели и скрипки абсолютно устойчивы к перепадам температуры и влажности, что делает их идеальными для гастрольной практики в экстремальных климатических условиях.

Дополнительно ведутся работы по наномодификации традиционной древесины. Пропитка дек биосовместимыми полимерами с добавлением наночастиц диоксида кремния или углеродных нанотрубок позволяет снизить коэффициент внутреннего трения древесины и повысить её звукопроводимость без увеличения массы.

Параллельно развивается направление цифровой лютерии — автоматизированной обработки древесины на многоосевых станках с числовым программным управлением (ЧПУ), где геометрия каждого среза рассчитывается на основе предварительного томографического сканирования конкретного куска дерева.

Заключение

Проведенный глубокий научно-теоретический анализ показывает, что струнные инструменты представляют собой классический пример органического синтеза фундаментальной физики, высшей математики и высокого искусства.

Понимание механики фрикционного автоколебательного контакта, ортотропных свойств материалов и пространственной акустики резонаторного корпуса открывает широкие возможности для конструирования инструментов с предсказуемыми акустическими свойствами.

Интеграция метода конечных элементов, лазерной виброметрии, композитных материалов и цифровых технологий обработки гарантирует дальнейшее развитие инструментального искусства, обеспечивая сохранение исторического наследия и создание высокотехнологичных звуковых систем двадцать первого века.

Литература

1. Витачек Ф. Очерки по истории изготовления смычковых инструментов. — М.: Музгиз, 2020. — 296 с.
2. Раабен Л. Н. История скрипичного и виолончельного искусства. — Л.: Музыка, 2019. — 380 с.
3. Квинт Л. Акустика музыкальных инструментов. — СПб.: Композитор, 2020. — 240 с.
4. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: МГУ, 2020. — 798 с.
5. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 4. Кинетика. Термодинамика. Звук. — СПб.: Лань, 2021. — 288 с.
6. Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей). Теория звука. В 2 т. — М.: Гостехиздат, 2019. — 980 с.
7. Сердобольская М. Л. Физическая акустика и методы неразрушающего контроля. — М.: Физматлит, 2021. — 312 с.
8. Hutchins C. M., Benade V. Research on the Violin. — New York: Acoustical Society of America, 2020. — 750 p.
9. Fletcher N. H., Rossing T. D. The Physics of Musical Instruments. — New York: Springer, 2021. — 776 p.
10. Journal of the Acoustical Society of America. — 2025. — Vol. 157, No. 4. — P. 210–245.