

Министерство культуры Российской Федерации
Нижегородская государственная консерватория (академия) им. М. И. Глинки

О. В. Садкова

МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА

Тетрадь I

*Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям
53.05.03 «Музыкальная звукорежиссура», 53.05.06 «Композиция», 53.05.05 «Музыковедение»*

Издание 3-е, переработанное и дополненное

Нижний Новгород
Издательство Нижегородской консерватории
2015

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Нижегородской государственной консерватории (академии) им. М. И. Глинки

Рецензенты:

Богатырев Ю. К., заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, академик РАИН, доктор технических наук, профессор кафедры «Техника радиосвязи и телевидения» института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева

Никулин С. М., заслуженный деятель высшей школы Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные технологии в проектировании и производстве» института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева

Садкова О. В.

С14 **Музыкальная акустика** : учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям 53.05.03 «Музыкальная звукорежиссура», 53.05.06 «Композиция», 53.05.05 «Музыковедение» / Садкова О. В. ; Нижегород. гос. консерватория (академия) им. М. И. Глинки. — 3-е изд., перер. и доп. — Тетр. 1. — Н. Новгород : Изд-во Нижегородской консерватории, 2015. — 84 с.

Курс лекций знакомит будущих звукорежиссеров, музыковедов и композиторов с основными физическими процессами, происходящими при исполнении и восприятии музыкальных произведений: со способами звукообразования в современных музыкальных, электромузыкальных и электронных инструментах; с физическими и музыкальными характеристиками инструментов и певческого голоса; характеристиками звуковых волн, их временными и спектральными представлениями; с закономерностями распространения, отражения, преломления волн в концертных залах и наблюдающимися здесь физическими эффектами; психофизиологическими особенностями восприятия звуковых колебаний человеком; основными радиоизмерительными приборами для акустических измерений, а также методами математического моделирования акустических процессов.

УДК 781.8
ББК 85.2



© Садкова О. В., 2015
© Нижегородская государственная
консерватория (академия)
им. М. И. Глинки, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Музыкальная акустика является частью акустики — учения о звуке. Среди различных разделов физики — механики, оптики, учения о теплоте и других — акустика ближе всего соприкасается с механикой, поскольку в основе всех звуковых явлений, которые изучает акустика, лежит одно из механических движений, а именно — колебательное движение.

Первоначально акустика опиралась только на механику. Лишь с появлением и развитием электротехники, радиотехники и электроники в акустике происходит революционный сдвиг. Примкнув к этим наукам и вооружившись новой методикой исследования, измерений и расчета, акустика быстро разрастается в большую самостоятельную область физики. В ней самой происходит отпочкование отдельных специализированных областей. Рождается физическая акустика, электроакустика, музыкальная акустика, архитектурная акустика, гидроакустика, атмосферная акустика, физиологическая акустика или психоакустика, биологическая акустика и др.

Физическая акустика занимается изучением и разнообразным использованием самих звуковых колебаний, включая колебания за порогом слышимости (инфразвуковые, ультразвуковые).

Электроакустика — получением, передачей, приемом и записью звуков при помощи электрических приборов.

Архитектурная акустика — распространением звука в помещениях, влиянием на этот процесс размеров и формы помещения, а также используемых материалов.

Гидроакустика — явлениями, происходящими в водной среде и связанными с излучением, распространением и приемом акустических волн.

Атмосферная акустика — звуковыми процессами в атмосфере, в частности распространением звуковых волн, условиями сверхдальнего распространения звука.

Физиологическая акустика — возможностями органов слуха, их устройством и действием, образованием звуков органами речи, восприятием их органами слуха.

Биологическая акустика — звуковым общением животных, проблемами шумов, вибраций и борьбой с ними.

Медицинская акустика используется для ультразвуковой трехмерной визуализации работы внутренних органов человека в реальном времени.

Музыка — древнее искусство. Как всякая область человеческой деятельности, она развивается, изменяется, усложняется. Музыка — сложный процесс, начинающийся движением звуковых волн от музыканта, воздействующий на нервные окончания органа слуха и полушария головного мозга и разрешающийся известным впечатлением, настроением или представлением слушателя.

Музыка — это целый мир, его изучению можно посвятить всю жизнь. Существует множество музыкальных инструментов, и каждый из них звучит по-своему: самый немusicalный человек легко отличит звук рояля от звука флейты или скрипки, потому что каждый инструмент имеет характерную для него окраску звука (тембр), диапазоны высоты и громкости. Даже одна единственная струна может звучать по-разному в зависимости от того, как она натянута, ударяют ли по ней молоточком, водят смычком или зачищивают медиатором, и даже от того, в каком месте струны это делается.

Что такое звук? Чем отличается музыкальный звук от шума? Чем отличаются с точки зрения физики громкие звуки от тихих, низкие от высоких? Что такое звуковое колебание, частота, длина волны, фаза? Каков диапазон частот слышимых звуков и как это проверить? Почему мы по-разному воспринимаем звуки одной высоты, когда они воспроизводятся разными инструментами? Почему одновременное звучание нескольких нот может быть в одном случае красивым, а в другом — режущим слух звуком сочетанием? Как происходит образование звуков в различных музыкальных инструментах — струнных, духовых, язычковых? Каковы особенности конструкции таких инструментов? Какие элементы конструкции играют особую роль в звукообразовании? Как колеблются струны, пластины, мембраны, воздушные столбы в трубах, создавая присущий данному инструменту тембр? Как воспринимаются звуковые колебания слуховой системой человека? Какие физические процессы происходят в зале при распространении звуковых колебаний? Что такое зал с хорошей акустикой?

На эти и другие вопросы может дать ответ учение о звуке — музыкальная акустика, изучающая акустические предпосылки музыкального искусства, объективные физические закономерности музыки в связи с ее восприятием и исполнением, исследующая музыкальные инструменты и певческий голос.

Современная музыкальная акустика, занимающаяся всем комплексом проблем, связанных с созданием звуков, используемых в музыке и пении, передачей их к слушателю и их слуховым восприятием, является основой базового естественнонаучного образования звукорежиссеров.

Используя современные компьютерные технологии, музыкальная акустика (совместно с психоакустикой) все больше углубляется в решение сложных проблем расшифровки слухового образа, создания физиче-

ских компьютерных моделей музыкальных инструментов, голоса, слуховой системы, музыкального компьютерного инструментария, проблем музыкальной психологии, теории музыки, инструментоведения.

Такой синтез музыкальных наук, музыкальной акустики и психоакустики совершенно необходим для развития и совершенствования музыкального искусства, подготовки новых поколений музыкантов, совершенствования вокального и музыкального исполнительства.

Сила такого синтеза — в единстве звуковых средств и научно-технических достижений, основанном на глубоких внутренних связях и многократно усиливающим общий эффект создаваемых звуковых образов.

Современный звукорежиссер — это посредник между языком техники и искусства. Он должен обладать серьезными научными познаниями в различных направлениях акустики и аудиотехники, глубоко понимать физическую природу звука, законы его создания, распространения и восприятия.

Звукорежиссер должен владеть компьютерными технологиями работы со звуком в театре, кино, на телевидении. Он должен обладать высокой музыкальной культурой, понимать и ценить музыку, чувствовать стиль и направления ее развития, понимать замысел композитора и манеру исполнения музыканта, постоянно поддерживать высокий уровень своих слушательских эталонов звучания, опираясь на опыт восприятия музыкальных произведений в условиях концертных залов с хорошей акустикой.

Профессия звукорежиссера очень оригинальна. Если говорить про знания, то их можно получать различными способами: опытным путем и самообразованием, обучением в вузе. Для профессии звукорежиссера оптимальным, хотя и крайне избыточным, было бы получение трех высших образований: технического, музыкального, и, наконец, специального, звукорежиссерского — как итога.

Техническое образование даст ясность мысли, способность к логическому мышлению, фундаментальную физико-математическую основу, музыкальное — воспитает определенные философско-эстетические взгляды, отточит вкус, повернет взгляд звукорежиссера в музыкальную сторону.

Хорошее звукорежиссерское образование содержит в программе обучения и техническую, и творческую стороны. Поэтому, если выбирать из всех трех образований что-то одно, то, пожалуй, именно последнее.

Прелесть любого полноценного образования (как технического, так и музыкального) в том, что оно по сути своей фундаментально, а значит, является отличной базой для дальнейшего развития и самообразования, что для звукорежиссера крайне важно. Дело в том, что эта профессия, как любое искусство не имеет готовых рецептов. Творческий процесс звукозаписи очень индивидуален. Все советы по звукозаписи — есть только деление своим личным опытом и ничем более. Читая любую статью по звуку, никогда не следует воспринимать все сказанное в ней как готовый рецепт. Это лишь направление мысли, позволяющее включиться вашей творческой фантазии...

Важно отметить быстрые изменения научно-технической стороны звукорежиссерской работы. Как аппаратное, так и программное обеспечение для обработки звука стремительно развиваются, расширяются их функциональные возможности. Математики и инженеры все глубже проникают в тайны музыкального творчества и предлагают все новые технические и математические способы решения проблем как чисто музыкальных, так и находящихся на стыке музыки и акустики, то есть в сфере деятельности звукорежиссера.

Звукорежиссеру приходится овладевать новыми техническими терминами, понимать сущность операций со звуковыми данными и алгоритмов обработки музыкального материала. А это для музыканта — нелегкая задача. Ведь к началу XXI века в музыкальных программах нашли применение многие результаты исследований в области математики, технической кибернетики и теории сигналов.

Находясь на стыке искусства и техники, используя выразительные приемы, технические и акустические средства, звукорежиссер выступает в роли соавтора или интерпретатора художественного произведения.

Для успешного воплощения творческого замысла звукорежиссер должен знать и учитывать в своей работе комплекс разнообразных факторов, среди которых наиболее важными являются:

- ♦ особенности звуковой структуры музыкальных произведений различных видов и жанров;
- ♦ динамические, спектральные и пространственно-временные характеристики первичного звукового поля, а также исходного множества первичных звуковых сигналов (речь, музыка, шумы) и искусственных звучаний, из которых формируется звуковая сфера музыкального произведения;
- ♦ комплекс ощущений, свойственных естественному слушанию;
- ♦ особенности восприятия музыкального произведения (эстетические и психофизические);
- ♦ акустические свойства ателье, студий, театров и концертных залов;
- ♦ современные технологии работы звукорежиссера при записи фонограмм в студии.

Сказанное определяет общие черты учебного курса музыкальной акустики.

Первый раздел посвящен истории и современному состоянию музыкальной акустики.

В последующих двух разделах рассматриваются фундаментальные понятия, лежащие в основе музыкальной акустики: гармоническое колебание, амплитуда, частота, фаза, начальная фаза, период колебания, приводятся поясняющие примеры и рисунки. Рассматриваются примеры возникновения сложных колебаний в результате их сложения, приводящего в ряде случаев к биениям (вибрато) и даже полному погашению коле-

баний (интерференции). Показывается, что любое периодическое звуковое колебание может быть представлено суммой гармонических колебаний с кратными частотами. Вводятся понятия основной (фундаментальной) частоты, гармоник и обертонов, спектра и тембра звука, осциллограммы и спектрограммы, гармонического анализа и синтеза сложного звукового колебания, музыкального звука, шума, стационарных и нестационарных колебаний, динамического спектрального анализа (текущего и мгновенного спектра). Для непериодического звукового колебания вводятся понятия спектральной плотности амплитуд или спектральной плотности мощности. Подробно исследуется роль вибрато и особенно тембра на восприятие музыкального звука. Приводятся характерные спектры основных музыкальных инструментов. Подчеркивается влияние динамики развития (возникновения и исчезновения) на спектр звука и его тембр. Приводится классификация тембров по Л. А. Кузнецову. Отмечается, что фундаментальная проблема — оценка тембра — есть творческий процесс, использующий ассоциации, навыки, воображение и т. п., поэтому надеяться на полную замену субъективных суждений объективными критериями не приходится.

В четвертом разделе подробно рассматриваются вопросы затухания колебаний. На примерах показывается, что в большинстве музыкальных инструментов имеют место свободные затухающие колебания, хотя существуют инструменты, работа которых основана на автоколебаниях (язычковые, духовые, орган, человеческий голос). Вводится понятие логарифмического декремента затухания, мягкой и жесткой атаки звука.

Небольшой пятый раздел посвящен явлению резонанса и его использованию при создании электрических фильтров (для усиления или ослабления различных гармонических составляющих спектра звукового сигнала), музыкальных инструментов и концертных залов. Явление поясняется примерами на конкретных музыкальных инструментах. Качество резонанса оценивается введенным понятием добротности, амплитудно-частотной (ФЧХ) и фазо-частотной характеристиками (ФЧХ).

На примерах колебаний струн и газовых столбов в шестом разделе рассматривается теория стоячих волн, объясняющая наличие гармоник в спектре любого музыкального звука.

В достаточно самостоятельном седьмом разделе с математических позиций рассматриваются музыкальные строи и проводится их сравнительная характеристика. Отмечается, что возможности двенадцатитоновой музыкальной шкалы все еще представляются неисчерпаемыми.

Вопросам звукового поля и его характеристик посвящен восьмой раздел. Вводятся понятия источника плоской, сферической, цилиндрической волн, фронта волны, звуковых лучей. Рассматривается понятие диффузного поля, в котором нельзя отыскать определенного направления распространения волн в силу многочисленных переотражений от окружающих поверхностей. Приводятся основные линейные и энергетические характеристики звукового поля. На примерах и рисунках поясняются важные вопросы зеркального и диффузного отражения, эха, дифракции, преломления и поглощения энергии звуковой волны. Изучена специфика звучания в закрытых помещениях, введено понятие реверберации, желательной зависимости ее от размеров помещения и степени заполнения его зрителями, оптимальной реверберации для различных видов музыкального исполнения и способа ее измерения, импульсной характеристики помещения. Рассмотрен основной набор параметров, используемых для оценки качества акустики помещения, показана роль реверберации, рассмотрены способы управления этим параметром. Указаны способы звукоизоляции таких помещений как студии звукозаписи, радио- и телевидения, акустических измерений.

Вопросы восприятия звука, имеющие исключительное значение для музыкальной акустики и психоакустики, рассматриваются в девятом разделе (*этот и последующие разделы входят во вторую тетрадь пособия*). Подробно рассматривается структура и известные принципы работы периферических и центральных отделов слуховой системы, область слышимости, определение высоты и громкости простого и сложного звука, нелинейные свойства слуха, слуховой анализ консонансов и диссонансов, бинауральный слух и пространственная локализация звукового образа, слуховая маскировка и слуховые пороги, технология аурализации.

Физические и музыкальные характеристики музыкальных инструментов и певческого голоса изучаются в десятом разделе. Любой инструмент условно представляется здесь в виде модели, содержащей возбудитель колебаний, генератор колебаний, преобразователь колебаний и излучатель звука. Проводится классификация музыкальных инструментов, подробно изучаются физика колебаний струн, пластин, стержней как основных колебательных элементов музыкальных инструментов. Исследуется работа ударного клавишно-рычажного механизма фортепиано, роль резонансовой деки, футора, педалей. Перечисляются и поясняются основные объективные показатели качества фортепиано. Рассмотрена конструкция и принципы работы типовых щипковых и смычковых инструментов, показано влияние роли корпуса таких инструментов. Рассмотрены принципы работы язычковых и духовых инструментов, подробно изучается механизм образования звука в органных трубах, устройство органа. В завершение раздела рассмотрена структура голосового аппарата человека и образование голоса в нем, роль мышц, участвующих в голосовом акте, а также периферического и центрального аппарата голосовой системы.

Современным электромузыкальным инструментам посвящен одиннадцатый раздел. Рассмотрены принципы формирования звуковых колебаний, работы цифро-аналоговых (ЦАП) и аналогово-цифровых (АЦП)

преобразователей и формирования цифрового кода. Одноголосые (терменвокс) и многоголосовые (синтезатор, музыкальный компьютер) электромузыкальные инструменты. Способы формирования тембра, переходных звуковых процессов, составляющих важный признак индивидуальности звукового образа и арсенал выразительных средств любого инструмента.

В двенадцатом разделе рассматриваются акустические особенности и основные параметры звучания инструментов, певческого голоса, ансамбля, хора, чрезвычайно важные в работе звукорежиссера — и при записи, и при прослушивании, и при сведении фонограммы. Показаны типовые схемы размещения инструментов, оркестров, хора, певцов при одно- и многомикрофонной записи с использованием различных микрофонов.

В заключении приводятся контрольные вопросы, список литературы. В приложения вынесен дополнительный материал по курсу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустика: справочник / под ред. М. А. Сапожкова. М.: Радио и связь, 1989. 336 с.
2. *Алдошина И. А., Праттс Р.* Музыкальная акустика. М.: Композитор, 2006. 719 с.
3. *Алдошина И.* Основы психоакустики // Звукорежиссер. 1999–2003.
4. *Анерт В., Штеффен Ф.* Техника звукоусиления. Теория и практика / пер. с англ. М.: ООО «ПКФ. Леруца». Жуковский: Эра, 2003. 416 с.
5. *Бакаева Н. Н.* Орган: научно-популярный очерк. М.: Музыка, 1977. 144 с.
6. *Белунцов В.* Музыкальные возможности компьютера: справочник. СПб.: Питер, 2000. 432 с.
7. *Волковьский Р. Ю.* Музыка и наука: популярный рассказ о музыкальной акустике. М.: Физматлит, 1993. 56 с.
8. *Володин А. А.* Электромusикальные инструменты. М.: Музыка, 1979. 182 с.
9. *Газарян С. С.* В мире музыкальных инструментов. М.: Просвещение, 1989. 192 с.
10. *Живайкин П.* Краткий обзор музыкальных программ для компьютеров РС // Компьютер-Пресс. 1998. № 5. С. 106–116; № 7. С. 136–143.
11. *Живайкин П.* Музыкальные обучающие программы // Компьютер-Пресс. 1998. № 9. С. 94–104.
12. *Кузнецов Л. А.* Акустика музыкальных инструментов: справочник. М.: Легпромиздат, 1989. 369 с.
13. *Мальтер Л. И.* Таблицы по инструментоведению: инструменты симфонического, духового, эстрадного и русского народного оркестров, электроинструменты, певческие голоса. М.: Советский композитор, 1972. 136 с.
14. *Ментюков А. П., Устинов А. А., Чельдиев С. А.* Музыка, электроника, интонирование. Новосибирск, 1993. 314 с.
15. Музыкальная акустика / под ред. проф. Н. А. Гарбузова. М.: Музгиз, 1954. 236 с.
16. *Панаиотов А. Н.* Ударные инструменты в современных оркестрах. М.: Советский композитор, 1983. 182 с.
17. *Петелин Р., Петелин Ю.* Музыкальный компьютер. Секреты мастерства. СПб.: БХВ-Петербург, Арлет, 2001. 608 с.
18. *Полозов С. П.* Обучающие компьютерные технологии и музыкальное образование. Саратов: Изд-во Саратовского государственного университета, 2002. 208 с.
19. *Порвенков В. Г.* Акустика и настройка музыкальных инструментов: методическое пособие по настройке. М.: Музыка, 1990. 192 с.
20. *Рейхардт В.* Акустика общественных зданий / пер. с нем. Л. И. Макриненко. М.: Стройиздат, 1984. 198 с.
21. *Синклер Я.* Введение в цифровую звукотехнику. М.: Энергоатомиздат, 1990. 80 с.
22. *Стретт В.* Теория звука. М.: Гостехиздат, 1955. 980 с.
23. *Тэйлор Ч. А.* Физика музыкальных звуков / пер. с англ. Галембо А. С. М.: Легкая индустрия, 1976. 184 с.
24. *Термен Л. С.* Физика и музыкальное искусство. М.: Знание, 1966. 32 с.
25. *Трахтман А.* Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. М.: Советское радио, 1972. 352 с.
26. *Харкевич А. А.* Спектры и анализ. М.: Гостехтеориздат, 1962. 232 с.
27. *Фадеев И. Г., Кузнецов И. А.* Ремонт гармоник, баянов и аккордеонов. М.: Легкая индустрия, 1971. 271 с.
28. *Яковлев А. Н.* Основы вейвлет-преобразования сигналов: учебное пособие. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2003. 80 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Введение | 3 |
| 1. История и современное состояние музыкальной акустики..... | 7 |
| 2. Простое гармоническое колебание..... | 13 |
| 3. Сложное звуковое колебание..... | 19 |
| 3.1 Вибрато и восприятие высоты..... | 29 |
| 3.2 Музыкальный тембр | 32 |
| 4. Затухание звуковых колебаний. Автоколебания | 38 |
| 5. Резонанс и его свойства | 43 |
| 6. Стоячие волны..... | 47 |
| 7. Музыкальные строи и их сравнительная характеристика | 50 |
| 7.1 Математические основы строя равномерной темперации | 54 |
| 8. Звуковое поле | 58 |
| 8.1 Характеристики звукового поля..... | 60 |
| 8.2 Отражение, преломление и поглощение звуковой волны..... | 62 |
| 8.3 Звукоизоляция помещений..... | 73 |
| <i>Список контрольных вопросов по разделам курса</i> | <i>79</i> |
| <i>Список литературы.....</i> | <i>83</i> |

Учебное издание

Садкова Ольга Викторовна

МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА Тетрадь I

Издание 3-е, переработанное и дополненное

Публикуется в авторской редакции

Ответственная за издание Т. Б. Суханова
Компьютерная верстка А. С. Платонова

Подписано в печать 31.08.2015. Формат 60*84/8.
Усл. печ. л. 9,77. Тираж 50 экз. Заказ № 62.

Оригинал-макет и печать:
ФГБОУ ВПО «Нижегородская государственная
консерватория (академия) им. М. И. Глинки»
603950, Нижний Новгород, ул. Пискунова, д. 40.
www.nnovcons.ru