

# МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА



МУЗГИЗ · 1954

В. А. БАГАДУРОВ, Н. А. ГАРБУЗОВ, П. Н. ЗИМИН,  
С. Г. КОРСУНСКИЙ и А. А. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ

# МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА

*Общая редакция Н. А. ГАРБУЗОВА*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ МУЗЫКАЛЬНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
Москва 1954



## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Прошло двенадцать лет с того времени, как вышло в свет первое издание учебника по музыкальной акустике, составленное бригадой Московской консерватории. За это время в области музыкальной акустики появились новые работы, изменились некоторые представления о музыкальных явлениях.

В настоящем, втором издании многие главы переработаны, многие — существенно изменены, учтены замечания критики, многое исключено, как не относящееся непосредственно к курсу музыкальной акустики. В учебнике большое внимание уделено уточнению терминологии. Кроме того, так как курс физической акустики проходится в средней школе недостаточно полно, то во втором издании добавлена глава о колебательном движении. В остальном план учебника остался тот же самый, какой он был в первом издании.

В написании и редактировании учебника принимали участие: В. А. Багадуров и С. Г. Корсунский (глава о голосовом аппарате человека), Н. А. Гарбузов (первый и третий разделы, акустика закрытых помещений и общая редакция учебника), П. Н. Зимин (главы о духовых и ударных инструментах, эталон высоты), А. А. Рождественский (глава о смычковых инструментах).

В заключение приношу глубокую благодарность Ю. Н. Рагсу за помощь, оказанную мне при оформлении и редактировании настоящей работы.

Москва. 1952 г.

Профессор *Н. А. Гарбузов*



## ВВЕДЕНИЕ

Музыкальная акустика<sup>1</sup> изучает природу музыкальных звуков и созвучий, законы их восприятия, музыкальные системы и строи, а также процессы, происходящие в голосовом аппарате человека при пении и в музыкальных инструментах при игре на них.

Своей основой она имеет физическую акустику и психофизиологию слуха.

В свою очередь музыкальная акустика служит основой для понимания ряда явлений, рассматриваемых в элементарной теории музыки (понятие о частоте и высоте, о силе и громкости, о составе звука и тембре и т. п.), в гармонии (консонанс и диссонанс, устойчивость и неустойчивость, построение созвучий, образование ладов и т. д.), в инструментоведении (звуковые качества музыкальных инструментов, акустика певческих голосов, музыкальный строй и настройка музыкальных инструментов), в оркестровке (сочетания тембров музыкальных инструментов и громкость их звуков, искажение созвучий тонами совпадения и разностными комбинационными тонами, маскировка звуков звуками и т. д.).

Таким образом, музыкальная акустика как наука непосредственно связана с музыкальным творчеством и исполнительским искусством.

---

<sup>1</sup> Акустика — от греч. акуо — слушаю.

# КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ. ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

## Глава первая

### ПОНЯТИЕ О КОЛЕБАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

Наши звуковые ощущения (звуки, шумы) вызываются воздействием различных колебательных движений на орган слуха.

На примере маятника рассмотрим простейшие колебательные движения.

Шарик, укрепленный на нити в точке А (рис. 1), будет висеть неподвижно, если на него действует только сила земного притяжения.

Но стоит лишь отвести шарик из положения равновесия (точка В) в точку С и затем отпустить его, как равновесие нарушится и маятник начнет совершать колебательные движения. С возрастающей скоростью шарик устремится по дуге СВ, по инерции пройдет точку В и, замедляя движение, дойдет до точки Д. Остановившись на мгновение, шарик начнет обратное движение под влиянием той же силы притяжения, пройдет по инерции точку В и достигнет точки С. Совершилось полное колебательное движение<sup>1</sup>.

В дальнейшем это движение будет продолжаться до тех пор, пока сила трения и сопротивление воздуха постепенно не остановят маятник. Такое колебательное движение называется затухающим.

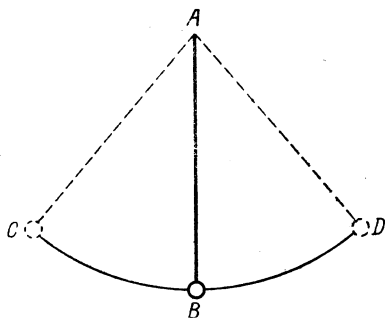


Рис. 1

<sup>1</sup> Французские ученые считают полным колебательным движением только движение в одну сторону (в нашем примере от точки С до точки Д).

В маятнике часов, в которых сила трения и сопротивление воздуха преодолевается пружиной или гирей, имеет место другой вид колебательного движения, который называется незатухающим или автоколебательным.

Наибольшее отклонение маятника от положения равновесия, измеряемое дугой  $BC$  (или  $BD$ ), называется амплитудой. В случае незатухающих колебаний амплитуда  $CB$  равна амплитуде  $BD$ , т. е. остается постоянной, а при затухающем колебательном движении амплитуда постепенно уменьшается и в конце превращается в нуль.

Сумма двух амплитуд называется размахом колебания, а время, необходимое для совершения полного колебательного движения, называется периодом.

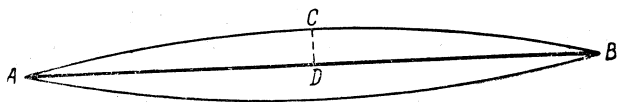


Рис. 2

В незатухающем и затухающем колебательном движении период остается постоянным (в затухающем колебательном движении постоянство периода объясняется уменьшением скорости колебательного движения). Такие колебательные движения называются периодическими или гармоническими.

Количество полных колебаний, совершаемое маятником в единицу времени (обычно в минуту), называется частотой.

Маятник колеблется под влиянием силы земного притяжения. Колебания звучащих тел происходят под влиянием или их собственной упругости (воздушный столб, металлическая пластина, деревянный брусок), или под влиянием упругости, полученной путем натяжения тела (струна, мембрана).

Например, если натянутую струну отвести из положения равновесия (рис. 2) и отпустить, то она начнет совершать колебательные движения, которые могут быть затухающими (фортепиано, арфа, — когда струна возбуждается ударом, или щипком) и незатухающими (скрипка, виолончель, — когда струна возбуждается смычком).

Амплитуда струны  $CD$  (рис. 2) — мала, а поэтому и размах по сравнению с амплитудой и размахом маятника незначителен. Период колебания струны измеряется долями секунды.

Частота колебаний звучащих упругих тел несравненно больше, чем частота колебаний маятника. Слышимая частота изменяется от 16 колебаний в секунду (к/с) до 20 000 к/с (приблизительно), в то время как частота колебаний маятника измеряется несколькими колебаниями в минуту.

Мы разбирали колебания маятника, чтобы познакомиться с элементами колебательного движения. Конечно, колебания

маятника не имеют никакого музыкального значения. Лишь при значительном увеличении частоты (при колебаниях упругих тел) эти отдельные колебания сливаются в нашем сознании, и мы воспринимаем их как новое качество—звук.

При колебании упругих тел в воздушной среде в ней возникают волны, которые представляют собой периодические сгущения и разрежения воздуха. Этого типа волны носят название продольных, так как направление движения частиц воздуха совпадает с направлением распространения всего процесса.

Если звуковые волны возникают в открытом месте, то такие волны называются бегущими, если же они возникают в закрытом помещении, где имеют место прямые и отраженные волны, то в результате интерференции (взаимодействия) прямых и отраженных волн иногда могут возникнуть так называемые стоячие волны.

В зависимости от фазы, т. е. взаимного расположения интерферирующих волн, может возникнуть или усиление звука или его ослабление, либо, при различной длине волн (при различной частоте колебаний), периодическое чередование усиленных и ослабленных звука (так называемые биения). Если звуковая волна встречает на своем пути препятствие, то она как бы обтекает его. Такое явление называется дифракцией. От формы предмета, гладкости его поверхности зависит степень дифракции. Дифракция позволяет слышать звуки, возникающие за препятствием, например, за круглой полированной колонной.

Как уже сказано было выше, мы воспринимаем как звуки различной высоты колебания упругих тел с частотой от 16 к/с до 20 000 к/с. Однако в музыкальном искусстве применяются звуки от 16 к/с (орган) до 4 300 к/с (флейта пикколо или флажолеты скрипки). Более высокие звуки не применяются потому, что они очень похожи по тембру и, кроме того, их трудно различить по высоте. Но из этого количества звуков в музыке применяются не все, а только те из них, которые объединяются между собой в определенные музыкальные системы, т. е. находятся в определенных ясно различимых звуковысотных отношениях.

Обычно музыкальными звуками называют те звуки, которые производятся певческими голосами или на музыкальных инструментах. Эти звуки обладают вполне определенными качествами: определенной высотой, определенной громкостью и тембром (в зависимости от исторических и общественных условий, существующих у данного народа или нации). Кроме того, в музыке употребляются и некоторые шумы (сложные звуки с неопределенной высотой, но с определенным тембром и громкостью).

---

## Глава вторая

### ВЫСОТА ЗВУКА

§ 1. Высотой звука называется отражение в нашем сознании частоты колебания упругого тела. Мы воспринимаем как звук одного и того же названия не определенную частоту, а ряд близких частот. Например, как  $a^1$  мы воспринимаем колебательные движения не только с частотой 440 к/с, но и с частотами 435, 436, 437, 438, 439, 441, 442, 443, 444, 445 к/с (приблизительно). Таким образом, в нашем сознании частота перерабатывается в высоту.

Человек способен слышать весьма малые изменения высоты звука. Слуховой аппарат человека отмечает изменение высоты не одинаково в разных областях частот. Наиболее остро мы замечаем изменение высоты тонов в области от 500 до 3 000 к/с. Для того, чтобы заметить эту разницу, требуется изменение в 5 центов ( $1/40$  тона).

В низком регистре этот интервал увеличивается до  $1/10$  тона (например, в субконтроктаве). В высоком регистре, после 3 000 к/с, интервал различения звуков по высоте также немного увеличивается. При одновременном слушании двух звуков можно заметить очень небольшую разницу между ними, благодаря биениям, которые отчетливо слышны, если слушать оба звука одним ухом. При слушании двух звуков, поочередно подводимых к разным ушам, разница, наоборот, увеличивается.

§ 2. Если мы будем слушать короткие по времени звуки, постепенно уменьшая их длительность, то заметим, что значительное уменьшение длительности вызывает потерю ощущения высоты этих звуков.

Необходимо некоторое минимальное количество колебаний в секунду для того, чтобы человек мог судить о высоте звука. Исследования показали, что минимальная длительность звука, необходимая для определения его высоты, зависит от его частоты.

Для $G_1$ (контроктавы)	требуется	0,080 сек.
• $g$ (малой октавы)	•	0,035 •
• $h^2$ (второй октавы)	•	0,015 •
• $h^3$ (третьей октавы)	•	0,013 •
• $h^5$ (пятой октавы)	•	0,018 •
• $es^6$ (шестой октавы)	•	0,030 •

Из приведенной таблицы видно, что наиболее короткие звуки возможны в области частот от 700 до 3 200 к/с, т. е. от  $f^2$  до  $g^4$ .

В низком регистре, в области субконтроктавы и контроктавы, длительность звука должна быть довольно большой.

§ 3. Способность человека определять заданные музыкальные интервалы и воспроизводить их голосом, а также способность определять абсолютную высоту заданных звуков и воспроизводить их голосом являются свойствами музыкального слуха.

В первом случае, когда отношение между высотами звуков оценивается человеком как музыкальный интервал, как некоторое определенное качество, слух называется относительным.

Так как при некоторых изменениях между частотами звуков музыкальный интервал между ними сохраняет свою качественную определенность, то каждый интервал может иметь несколько количественных выражений.

Наличие относительного слуха совершенно необходимо для музыканта. Развитие его предусмотрено учебными планами музыкальных школ, училищ и консерваторий.

Во втором случае, т. е. при наличии способности определять абсолютную высоту заданных звуков (ступеней) или воспроизводить их голосом, слух называется абсолютным.

Обычно человек, обладающий абсолютным слухом, имеет также и относительный, но бывают случаи, когда при абсолютном слухе человек воспринимает музыкальные интервалы не как некоторое определенное качество, а лишь как сумму не связанных между собою звуков.

Абсолютный слух бывает двух типов — истинный и ложный. Для первого типа необходимо наличие у человека особых физиологических задатков. Второй тип абсолютного слуха требует постоянных и длительных упражнений.

Так, если истинный слух проявляется уже с самого раннего детства, то ложный слух можно выработать только в более зрелом возрасте. Критерием хорошего, истинного абсолютного слуха является способность быстро определять высоту заданного звука. Человек, обладающий ложным абсолютным слухом, обычно путем упражнений запоминает какой-либо один звук, например,  $a^1$ , остальные звуки он определяет, сравнивая их по высоте с этим звуком. Кроме того, встречаются лица, у которых абсолютный слух существует лишь по отношению к

тому инструменту, на котором они играют<sup>1</sup>. Но во всех случаях абсолютный слух способен определять и воспроизводить не частоту звука, а его высоту, т. е. его принадлежность к той или иной ступени.

Некоторые лица, не обладающие абсолютным слухом, могут определять высоту звуков, пользуясь какими-нибудь добавочными способами. Например, некоторые певцы определяют высоту звука, пользуясь ощущением напряжения голосовых связок.

Путем упражнений можно безусловно развить относительный слух. Что же касается превращения ложного абсолютного слуха в близкий к истинному, то это пока еще не доказано опытами.

Для музыканта большое значение имеет наличие внутреннего слуха — способность воображать высоту звуков и (в частности) созвучий. Внутренний слух позволяет исполнителю составить представление о музыкальном произведении до его прослушивания, а композитору дает возможность создавать произведение без помощи инструмента.

§ 4. Для точного определения частоты колебаний звучащего тела применяются разнообразные приборы и методы.

Простейшим и наиболее старым методом является слуховое сравнение данного звука с другим, близким к нему по высоте звуком, частота колебаний которого точно известна, и последующий счет биений, возникающих между этими двумя звуками. Так например, если исследуемый звук дает с сравнительным звуком частоты 440 к/с полтора биения в секунду, а с другим сравнительным звуком частоты 444 к/с — два с половиной биения в секунду, то частота его колебаний будет равна 441,5 к/с, и так далее.

Однако слуховой способ сравнения труден, так как требует специальной тренировки слуха исследователя. А если испытуемый звук дается человеком (например, голосом, на скрипке и т. п., на духовом инструменте), то он обычно инстинктивно подстраивается ко второму, слышимому им звуку измерительного прибора. Поэтому результаты сравнения получаются неточными.

Более точное определение частоты колебаний звучащих тел дает стробоскопический метод сравнения. При этом исследуемый звук превращается в световые импульсы (вспышки лампы с тлеющим разрядом), освещающие систему вращающихся дисков с чередующимися черными и белыми секторами, соотношения скоростей которых пропорциональны соотношениям между числами колебаний какой-либо музыкальной системы. При совпадении числа колебаний исследуемого звука с числом проходящих секторов на каком-либо из измеритель-

<sup>1</sup> В данном случае решающее значение имеет тембр звука.

ных дисков, изображение на последнем покажется остановившимся. Это есть момент унисона двух колебательных процессов.

В существующих наиболее распространенных стробоскопических частотомерах применены комплекты из 12 измерительных дисков, скорости которых настроены по равномерно-темперированной музыкальной шкале. Особое приспособление позволяет плавно изменять скорость вращения всех дисков одновременно в пределах  $\pm 3\%$ , что соответствует изменению высоты звуков в пределах  $\pm$  половины полутона. Указатель на шкале прибора дает возможность, в момент достижения унисона с исследуемым звуком, сразу прочесть высоту последнего относительно ближайшего нормального темперированного звука, с точностью до 0,01 полутона (т. е. до одного цента).

Прибор очень чувствителен, не требует от оператора специальной тренировки слуха, и не издает никаких звуков, к которым мог бы подстраиваться исполнитель.

Получаемые на нем в музыкальных (логарифмических) единицах высоты звуков могут быть, при надобности, переведены в соответствующие частоты колебаний (герцы), при помощи специальных таблиц.

---



## ГРОМКОСТЬ ЗВУКА

§ 1. Силой или интенсивностью звука называется количество звуковой энергии, проходящей через единицу поверхности в единицу времени, а громкостью звука называется отражение в нашем сознании силы звука.

Громкость, которая является нашим ощущением, изменяется непропорционально силе звука. Увеличивая силу какого-либо звука в 2, 3, 4 раза, мы замечаем, что наше звуковое ощущение (громкость звука) не растет в указанных отношениях. Если, например, увеличить силу звука в миллион раз, то его громкость не возрастет также в миллион раз.

В 1846 г. физиолог Вебер установил количественную связь между ощущением и раздражением, вызывающим это ощущение. В дальнейшем (1860 г.) Фехнер подверг закон Вебера математической обработке, в результате которой был сформулирован общий психо-физический закон Вебера—Фехнера, согласно которому ощущение изменяется пропорционально логарифму раздражения. Согласно этому закону, при увеличении силы звука в 100, 1 000 и т. д. раз ощущение увеличивается соответственно в 2, 3 и т. д. раза.

Новые исследования зависимости громкости от силы звука показали большие расхождения с законом Вебера—Фехнера. Но для сравнения звуков по их силе оказалось очень удобно пользоваться этим законом.

Человеческое ухо способно воспринимать звуки, сила которых может изменяться в миллиарды раз. От порога слышимости до болевого порога<sup>1</sup> звук увеличивается по силе (в средней области частот) в 100 000 000 000 000 раз. Естественно, что при оперировании такими величинами удобнее пользоваться их логарифмами.

<sup>1</sup> Порогом слышимости называется граница, ниже которой мы вообще перестаем слышать звук. Увеличивать силу звука можно только до известной границы—болевого порога, после которого наступает неприятное шекотание в ухе, а затем боль.

Логарифмической единицей измерения при этом служит «фон», или «бел» (в честь изобретателя телефона Г. Белла).

Удобнее пользоваться «децибелом» — единицей измерения в десять раз меньшей бела. Децибел обозначается знаками db или дб. Таким образом децибелом является единица измерения, выражающая едва заметный прирост громкости звука над уровнем шума в помещении или порогом слышимости. (Существует специальный прибор — шумомер для определения уровня громкости в дб.)

Уровень громкости количественно может выражаться в дб. В этом случае за исходную величину принимается сила звука при пианиссимо.

Например (приблизительно):

пианиссимо оркестра = 55 дб  
фортиссимо оркестра (вблизи) = 100 дб  
шум пропеллера (вблизи) = 120 дб

Децибел является удобной величиной для определения динамического диапазона музыкальных инструментов и певческих голосов. В этом случае за исходную величину принимается сила звука при пианиссимо. Так, динамический диапазон рояля = 44 дб, виолончели = 38 дб.

§ 2. Если мы будем слушать звуки различных частот, но одинаковой силы, то эти звуки окажутся для нас различной громкости.

Для того, чтобы выяснить уровень громкости звуков различной частоты, были проведены эксперименты. Испытуемым давались два звука: один в 1 000 к/с, другой — произвольной частоты, и предлагалось отрегулировать силу звука в 1 000 к/с так, чтобы эти два звука были равной громкости. В результате большого числа такого рода экспериментов составилось представление о равногромкости различных звуков со звуком в 1 000 к/с.

Итак, два звука равной громкости, но разной частоты в общем случае имеют разную силу. Это явление объясняется различной чувствительностью нашего уха к звукам различной частоты. Человеческое ухо наиболее чувствительно к частотам от 500 до 3 000 к/с.

В музыкальной практике градации громкости обозначаются: *ppp*, *pp*, *p*, *mp*, *mf*, *f*, *ff*, *fff*.

Изменение громкости на одну ступень этой шкалы соответствует, по данным литературы, увеличению уровня громкости приблизительно на десять—двенадцать дб. Следовательно, градация громкости от *ppp* до *fff* обнимает от 70—85 дб. Измерение диапазона мощности (силы) симфонического оркестра как раз дало эти числа.

Однако новейшие исследования показали, что приведенные выше данные относительно градации громкостей недостаточно

полны, так как в них не приняты во внимание громкость отдельных инструментов (*ff* на скрипке не может быть приравнено к *ff* тромбона), уровень шума в помещении (при большем шуме в помещении *pp* иное, чем при меньшем) и восприятие динамических оттенков различными лицами, а одним лицом — в различное время (у одного испытуемого при опытах *ff* соответствует 87 дб, а у другого — 112 дб<sup>1</sup>; у одного и того же испытуемого *p* соответствует в различное время 63 дб и 76 дб).

Все это говорит об относительности динамических оттенков, применяемых в музыкальной практике, и о зонной природе динамического слуха.

§ 3. Под действием звуков различной силы изменяется чувствительность уха. Например, звуки средней силы после слушания очень сильного звука будут казаться тихими. Те же звуки в тишине будут казаться громкими. Таким образом, чувствительность уха в относительной тишине повышается, а при наличии звуков большой силы — понижается. Такое приспособление к звукам различной силы называется адаптацией слуха.

Изменение чувствительности уха происходит также вследствие продолжительного слушания звука. Если слушать звук большой силы в течение продолжительного времени (минуты и более), то громкость его будет постепенно падать вследствие понижения чувствительности уха. Если внезапно снизить силу звука, то падение его громкости будет весьма значительно. При восприятии кратких повторяющихся звуковых импульсов ухо успевает восстановить в перерывах свою чувствительность, поэтому громкость такого прерывистого звука не падает в течение долгого времени. Малая степень адаптации наблюдается также при восприятии звука с биениями<sup>2</sup>.

§ 4. Бинауральным эффектом называется способность человека определять направление, в котором находится от него источник звука. Эта способность объясняется наличием двух ушей. Глухие на одно ухо с трудом определяют направление источника звука. В горизонтальной плоскости на открытом воздухе человек определяет направление при резких ударных звуках с точностью до 3°. В закрытых помещениях определить направление более трудно вследствие наличия отраженных звуков, идущих в различных направлениях. В вертикальной плоскости бинауральный эффект проявляется очень слабо, ввиду того, что уши расположены в горизонтальной плоскости.

Существует предположение, объясняющее бинауральный эффект разницей во времени прихода звукового импульса к

<sup>1</sup> При равных условиях.

<sup>2</sup> См. стр. 7.

правому и левому уху. Другое, более вероятное, предположение объясняет бинауральный эффект разницей в громкости звука, которое воспринимается правым и левым ухом. Последнее объяснение бинаурального эффекта не применимо в области низких частот, ввиду того, что разница в силе звука, приходящего к правому и левому уху, с понижением звука, вследствие дифракции у головы, значительно уменьшается; например, при частоте 300 к/с это составляет 1 дб.

Точность в определении направления падает в области 2 000 к/с, а затем снова поднимается. Это хорошо объясняется наличием именно двух указанных факторов бинаурального восприятия. Точность падает как раз в области частот, в которой совершается переход от одного типа восприятия к другому.

При восприятии простых звуков (с синусоидальными колебаниями) точность определения направления уменьшается. При слушании кратких ударных импульсов точность максимальна. Это объясняется тем, что при сложных звуках действуют оба фактора, определяющие бинауральный эффект.

Суждение о расстоянии, на которое удален источник звука, составляется, главным образом, по изменению громкости и тембра заранее знакомого звука.

При слушании музыки в исполнении большого коллектива, например, симфонического оркестра, ясно ощущается направление и расстояние, на котором находятся отдельные инструменты или группы инструментов оркестра. Та же музыка, переданная по радио, теряет в нашем восприятии свою «объемность», так как звуки исходят практически из одной точки — из репродуктора радиоприемника. Некоторое представление о расстоянии, на котором находится исполнитель от микрофона, можно составить на основании изменения отношения прямых звуковых лучей, поступающих от исполнителя непосредственно в микрофон, к лучам, отраженным поверхностями помещения. Так, при удалении исполнителя от микрофона, процент прямых лучей в общей звуковой энергии, поступающей в микрофон, уменьшается, и слушатель ясно это ощущает как удаление источника звука.

---

Музыкальные звуки имеют сложный состав. Они состоят из слышимого основного тона и обертонов. Обертонами называются призвуки, возникающие выше основного тона в результате деления источника звука (струны, столба воздуха и т. д.) на части и взаимодействия его с резонаторами. Обертоны, частоты которых находятся в кратных отношениях с частотой основного тона (1, 2, 3, 4, 5, 6 и т. д., принимая частоту основного тона за единицу), называются гармоническими, или «гармониками». Обертоны, частоты которых находятся в более сложных отношениях с частотой основного тона (например: 1; 6,26; 17,35 и т. д.), называются негармоническими.

16

Тембр звука зависит в основном от количества обертонов, их номеров и их относительной громкости.

При сильных звуках в самом органе слуха—ухе возникают так называемые «субъективные» обертоны. Поэтому восприятие синусоидального колебания возможно лишь при малых громкостях. Сильные синусоидальные колебания воспринимаются как сложные колебания, имеющие некоторый тембр, обусловленный «субъективными» обертонами.

Тембр звука изменяется также с расстоянием от источника звука, так как высокие обертоны поглощаются воздухом сильнее, чем основной тон и низкие обертоны. Описанное явление вызывает своеобразие изменения тембра отдаленных звуков, позволяющее распознавать эти звуки как идущие издалека.

§ 3. Положим на крышку резонансного ящика звучащего камертона небольшой металлический шарик. Колебания камертона будут передаваться крышке ящика, и шарик начнет подпрыгивать на крышке, производя стуки. Если подпрыгнувший шарик остается в воздухе в течение одного периода колебаний, то частота стуков будет равна частоте колебаний камертона; стуки дадут в этом случае ощущение звука одинаковой высоты со звуком камертона.

Если шарик остается в воздухе в течение двух периодов колебаний камертона, то его стуки будут следовать друг за другом через одно колебание, и частота стуков будет в два раза меньше. Звук, производимый шариком, будет в таком случае на октаву ниже звука камертона.

Тяжелые шарики могут оставаться в воздухе в течение трех, четырех, пяти и более колебаний камертона. Частота стуков при этом будет в три, четыре, пять и т. д. раз меньше и высота звуков соответственно ниже. Эти звуки носят название «унтертонов». Образование унтертонов возможно только при наличии вторичного источника звука, резонирующего через одно, два, три или больше колебаний основного источника звука.

Ряд звуков, с частотами, относящимися, как числа ряда 1,  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $1/5$ ... и т. д., называется унтертонным звукорядом. Унтертонный звукоряд является как бы зеркальным отражением натурального звукоряда. Его тоны идут по тем же интервалам, как и тоны в натуральном звукоряде, но вниз, а не вверх от основного тона.

Например, унтертонный звукоряд от звука  $c^3$  будет иметь следующий вид:



В музыкальной практике унтертоны не имеют никакого значения. Они наблюдаются только в виде дребезжания какого-либо предмета под влиянием доходящих до него звуковых колебаний. Поэтому попытка Римана объяснить минорное трезвучие унтертонным звукорядом не выдерживает критики, точно так же как не выдерживает критики объяснение мажорного трезвучия обертонным звукорядом<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> См. главу «Музыкальные системы».

## Глава пятая

### ВОСПРИЯТИЕ СОЗВУЧИЙ

§ 1. В музыке отношение высот двух звуков выражают музыкальным интервалом (секунда, терция, кварта, квинта и т. д.).

В акустике отношение высот двух звуков выражают отношением их частот.

Чем больше отношение частоты верхнего звука к частоте нижнего, тем больше разница между ними по высоте. Это отношение частот двух звуков, образующих музыкальный интервал, называется его «интервальным коэффициентом». Из натурального звукоряда видно, что интервальный коэффициент октавы равен  $2/1$ , интервальный коэффициент квинты равен  $3/2$ , интервальный коэффициент кварты равен  $4/3$  и т. п.

В следующей таблице даны интервальные коэффициенты, выведенные из соотношения между частичными тонами натурального звукоряда:

Прима	$1/1$	Малая секста	$8/5$
Малая секунда	$16/15$	Большая секста	$5/3$
Большая секунда	$9/8$	Малая септима	$9/5$
	или $10/9$		или $16/9$
Малая терция	$6/5$	Большая септима	$15/8$
Большая терция	$5/4$	Октава	$2/1$
Кварта	$4/3$	Тритон	$7/5$
Квинта	$3/2$		или $10/7$

С музыкальными интервалами обращаются, как с величинами, могущими складываться и вычитаться, например:

квинта + кварта = октава (при сложении квинты  $c-g$  с квартой  $g-c^1$  мы получаем октаву  $c-c^1$ )

квинта—м. терция=большая терция.

При обращении с интервальными коэффициентами сложение интервалов заменяется умножением их интервальных коэффициентов, вычитание—делением, например:

$$\begin{aligned} \text{квинта} + \text{кварта} &= \text{октава} \\ 3/2 \times 4/3 &= 2/1 \end{aligned}$$



квинта — малая терция = большая терция  
 $3/2 : 6/5 = 5/4$

кварта + малая терция = малая секста  
 $4/3 \times 6/5 = 8/5$

большая секста — большая терция = кварта  
 $5/3 : 5/4 = 4/3$

Для повышения или понижения высоты звука на какой-либо интервал нужно его частоту умножить или разделить на соответствующий интервальный коэффициент, например: умножение частоты тона  $a^1$ —440 к/с на интервальный коэффициент квинты  $3/2$  дает частоту 660 к/с и повышает тон на квинту ( $e^2$ )

$$a^1 + \text{квинта} = e^2 \\ 440 \times 3/2 = 660 \text{ к/с};$$

деление частоты тона  $a^1$ —440 к/с на интервальный коэффициент малой сексты  $8/5$  дает частоту 275 к/с и понижает тон на малую сексту

$$a^1 - \text{мал. секста} = cis^1 \\ 440 : 8/5 = 275 \text{ к/с}$$

В натуральном звукоряде порядковый номер обертона, стоящего на октаву вверх от какого-либо другого обертона, в два раза больше порядкового номера последнего, поэтому при обращении интервала, получаемого путем перенесения нижнего тона на октаву вверх, знаменатель интервального коэффициента удваивается и делается числителем отношения.

Например, обращение квинты  $3/2$  дает кварту  $4/3$ :

$$\frac{3}{2} (\cdot 2) \times \frac{4}{3}$$

обращение большой терции  $5/4$  дает малую сексту  $8/5$ :

$$\frac{5}{4} (\cdot 2) \times \frac{8}{5}$$

При обращении интервала, получаемого путем перенесения верхнего тона на октаву вниз, числитель уменьшается вдвое и делается знаменателем.

Например, обращение малой терции  $6/5$  дает большую сексту  $5/3$ :

$$\frac{6}{5} (: 2) \times \frac{5}{3}$$

Обращение большой секунды 10/9 дает малую септиму 9/5:

$$\frac{10}{9} (: 2) \times \frac{9}{5}$$

§ 2. Все звуки, применяемые в музыке, связаны между собой. Одни из них связаны более сильно (непосредственно родственные звуки), другие — менее сильно (опосредствованно родственные звуки). Степень родственности двух звуков определяется слышимыми общими частичными тонами.

Например, звуки *c* и *g* являются непосредственно родственными, так как они имеют слышимый общий частичный тон  $g^1$  (3-й частичный тон от *c* и 2-й частичный тон от *g*). Также непосредственно родственными являются звуки *c* и *e*, так как у них имеется слышимый частичный тон  $e^2$  (5-й частичный тон от *c* и 4-й частичный тон от *e*). В большой секунде *c*—*d* звуки находятся в слабом непосредственном родстве, потому что их общий частичный тон  $d^3$  вследствие отдаленности не слышен (9-й частичный тон от *c* и 8-й от *d*). Но звуки *c*—*d* могут быть сделаны более родственными путем прибавления третьего звука, у которого имеются общие отчетливо слышимые частичные тоны со звуками *c* и *d*. Например, таким звуком может быть звук *g*, который находится в непосредственном родстве и со звуком *c* и со звуком *d*. Такое родство между звуками *c* и *d* называется опосредствованным.

Из сказанного следует, что все консонирующие интервалы (прима, октава, квинта, кварта, б. и м. терция, б. и м. секста) образованы звуками непосредственно родственными, а диссононирующие (тритон, б. и м. септима, б. и м. секунда)—опосредственно родственными.

§ 3. При восприятии двух одновременных звуков различной громкости более громкий звук, при известном соотношении громкостей, может совершенно «заглушить», «замаскировать» другой более слабый звук. Если прекратить звучание громкого звука, то второй звук, который до этого не был слышен, станет отчетливо слышимым (через некоторое время). Исследования этого эффекта показали, что наиболее маскируются звуки, лежащие выше маскирующего звука; что чем больше сила маскирующего звука, тем больше область маскировки и тем дальше она распространяется на маскируемые звуки.

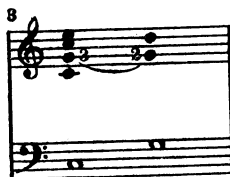
При маскирующем звуке в 200 к/с и в 80 дб мы не услышим, например, звука в 800 к/с и 70 дб.

Чем ближе по частоте маскируемый звук находится к маскирующему, тем больше эффект маскирования. В непосредственной близости по частоте маскирующее действие уменьшается вследствие наличия биений, которые помогают обна-

ружить присутствие маскируемого тона. Наиболее сильно маскируются звуки, соответствующие обертонам маскируемого звука.

В произведениях, написанных для симфонического оркестра, встречаются места, в которых маскирующее действие оказывают также обертоны, возникающие при игре на инструментах в низком регистре (например, в валторнах) на мелодию, исполняемую в высоком регистре (например, гобоем). Некоторые звуки мелодии при этом для слушателя пропадают. В музыкальной практике постоянно встречается эффект маскирования, особенно при игре симфонического оркестра. Дирижеры, выравнивая звучность оркестра, хорошо представляют и ощущают меру маскирования.

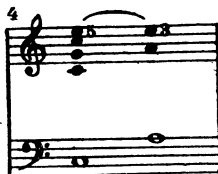
§ 4. При одновременном звучании двух звуков, например, *c* и *g*, образующих интервал квинты —  $3/2$ , 3-й обертон от *c* и 2-й обертон от *g* совпадают по высоте:



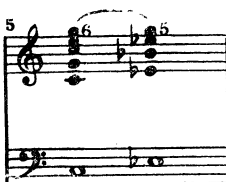
Тон  $g^1$  называется тоном совпадения звуков *c* и *g*.

У звуков *c* и *a*, образующих интервал большой сексты —  $5/3$ , совпадают 5-й обертон от *c* и 3-й обертон от *a*.

Тон  $e^2$  называется тоном совпадения звуков *c* и *a*.



Звуки *c* и *es*, образующие интервал малой терции —  $6/5$ , имеют тон совпадения  $g^2$  — 6-й обертон от *c* и 5-й от *es*:

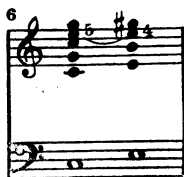


Тон совпадения любых звуков, образующих какой-либо интервал, можно определять построением от них натуральных звукорядов.

При этом тон совпадения образуется обертоном верхнего звука, номер которого равен знаменателю интервального коэффициента, и обертоном нижнего звука, номер которого равен числителю того же интервального коэффициента. Например, частоты звуков, образующих интервал большой терции, находятся в отношении  $5/4$  (в натуральном звукоряде). Таким образом, тон совпадения этого интервала образуется от слияния 5-го обертона от нижнего звука и 4-го — от верхнего звука.

Два звука могут иметь один, два и более слышимых тонов совпадения.

Например, звуки *c* и *e* имеют один слышимый тон совпадения:



(совпадают: 5-й обертон от *c* и 4-й — от *e*).

Звуки *c* и *g* имеют два тона совпадения:



Слышимость тонов совпадения различна и зависит от интервала и регистра образующих звуков. Чем проще интервальный коэффициент, тем более низкие обертоны совпадают, и тем лучше слышимость тона совпадения. Однако, если тон совпадения является октавным удвоением одного из образующих его звуков, то он слышен плохо. Так, во втором примере тон совпадения  $g^1$  звуков *c* и *g* представляет собой октавное удвоение звука *g* и маскируется последним. Поэтому тоны совпадения хорошей слышимости имеют: малая терция, большая секста и тритон; лучше всего тоны совпадения слышны, когда образующие их звуки находятся в малой или большой октаве.

Тон совпадения может быть образован тремя, четырьмя и более звуками. Например, звуки *Fis*, *c* и *a* имеют общий тон тройного совпадения  $e^2$ , который является 7-м обертоном от *Fis*, 5-м от *c* и 3-м от *a*.

Звуки *D*, *Fis*, *c* и *a* имеют общий тон четверного совпадения  $e^2$ .

В музыке тоны совпадения могут искажать характер гармонии. Так, большая секста в низком регистре всегда имеет несколько минорный характер, доминантсептаккорд может образовать тон совпадения, придающий аккорду характер нон-аккорда и т. п.



§ 5. Совпадение двух звуков по частоте воспринимается нами как один звук (физический унисон). Если постепенно изменять частоту одного из звуков, то мы будем воспринимать один звук, сопровождаемый биениями — периодическими усилениями и ослаблениями звука (физиологический унисон). Высота этого звука представляет собой среднюю высоту между высотами обоих составляющих звуков. Прекращение звучания более высокого звука создает впечатление понижения высоты слышимого звука. Прекращение звука более низкого создает впечатление повышения звука.

При увеличении разницы между звуками, более, чем на  $1/6$  целого тона (в среднем регистре), их слияния в один звук не происходит и наступает расщепление унисона на два отдельных звука. Биения при этом не исчезают, а сохраняются до некоторого предела.

При наличии нескольких звуков, интервал между крайними звуками с заполненной серединой может достигать до  $1/4$  (унисон скрипок) и даже  $1/2$  целого тона (унисон одноименных голосов хора). Как показали исследования, музыканты симфонического оркестра, исполняющие одну и ту же партию, например, первых скрипок, не играют точно в унисон, однако слушатели воспринимают один слитный звук с высотой, занимающей среднее положение между высотами всех составляющих звуков.

Частота суммарного, сопровождаемого биениями, колебания зависит от соотношения амплитуд слагаемых колебаний. Если их амплитуды равны между собой, то частота его остается постоянной, не изменяющейся, имея среднее значение между частотами слагаемых колебаний.

Если амплитуды слагаемых колебаний не равны, то частота суммарного колебания периодически незначительно изменяется, совместно с периодическим изменением его амплитуды. При максимуме амплитуды частота лежит между частотами слагаемых звуков. Но при последующем затем минимуме амплитуды частота слитного звука отклоняется в сторону частоты звука с большей амплитудой и даже заходит за эту частоту. Если из двух слагающихся звуков звук с большей амплитудой является более высоким, то частота слитного звука, при минимуме его амплитуды, больше частот обоих звуков. Если же звук с большей амплитудой является более низким, то частота слитного звука, при минимуме его амплитуды, меньше частот обоих звуков.

Однако обнаружить это отклонение частоты на слух, при минимуме амплитуды, очень трудно, и ощущение высоты слитного звука почти всегда дает некоторое срединное ее положение между высотами обоих звуков.

Частота биений, т. е. их количество в одну секунду, равна разности между частотами составляющих звуков.

Например, одновременное звучание двух камертонов в 435 к/с и 440 к/с дает  $440 - 435 = 5$  биений в одну секунду.

Всякое прерывистое раздражение нервов (мерцающий свет, прерывистый звук) ощущается сильнее, чем постоянное раздражение той же силы, при которой чувствительность нервов быстро притупляется. С увеличением частоты отдельных раздражений (или перерывов между раздражениями) нерв уже не успевает полностью возвращать себе нормальную чувствительность, отдельные раздражения сливаются между собой и прежнего действия не производят.

Поэтому с увеличением частоты биений они становятся все менее и менее заметными и, наконец, совсем исчезают.

Наиболее отчетливо биения слышны при количестве их, равном 4—5 в одну секунду. При количестве биений не более 12—15 в одну секунду их можно еще подсчитать. При большем количестве их можно только слышать, подсчитать же невозможно. Если количество биений становится более 30 в одну секунду, то они начинают сливаться, их непосредственная слышимость исчезает, и остается неприятное ощущение «хриплости» или «шероховатости» звучания. При дальнейшем увеличении количества биений исчезает и шероховатость. Наиболее неприятное, раздражающее впечатление биения создают на границе перехода их в хриплость и шероховатость, т. е. при количестве биений, равном 30—60 в одну секунду.

Граница исчезновения шероховатости, иначе говоря, предел восприятия биений слухом, зависит от регистра звуков. С повышением звуков этот предел увеличивается. В высоком регистре (конец третьей октавы) биения, в виде хриплости

звука, еще заметны при количестве их, равном 132 в одну секунду.

В еще более высоком регистре (середина четвертой и начало пятой октавы) биения могут быть заметны при количестве их, достигающем до 400 в одну секунду. В низком регистре биения перестают быть слышными при значительно меньшем числе.

В низком регистре разница по частоте между двумя образующими интервал, меньше разницы по частоте между звуками, того же наименования, но в более высоком регистре. Например, звуки низкого регистра  $A_1$ —55 к/с и  $C$ —66 к/с, образующие интервал малой терции ( $\frac{66}{55} = \frac{6}{5}$ ), производят  $66 - 55 = 11$  биений в 1 сек., которые можно подсчитать на слух. Звуки того же наименования, но более высокого регистра,  $a^2$ —880 к/с. и  $c^3$ —1 056 к/с, образующие тот же интервал малой терции ( $\frac{1056}{880} = \frac{5}{6}$ ), производят  $1\,056 - 880 = 176$  биений в сек.,—количество, при котором в данном регистре они уже не слышны. Поэтому максимальная величина музыкального интервала, при котором еще слышны биения, в низком регистре больше, чем в высоком.

В четвертой октаве биения слышны при интервале большой секунды. В середине пятой октавы биения слышны лишь при интервале малой секунды. В большой октаве биения ясно заметны при интервале квинты, образованном звуками  $C$ —64 и  $G$ —96 к/с.

К биениям между основными тонами звуков присоединяются биения между их обертонами.

Биения, сопровождающие звучание тонов совпадения, усиливают их слышимость и делают их более заметными.

Биения могут возникнуть также между основным тоном одного звука и соответствующим обертоном другого звука.

При нескольких звуках смешения биений между основными тонами и их обертонами образует некоторый беспорядочный комплекс, в котором нет возможности что-либо различить.

Биения могут возникнуть и при наличии лишь одного источника звука, между его обертонами. Например, ржавчина на стальной струне рояля уменьшает ее толщину у одного из концов. При делении струны пополам в процессе колебания ее половины (колебание которых дает второй обертоном) колеблются с неодинаковой частотой вследствие различной их толщины, отчего и возникают биения.

Такие биения негармонических обертонов особенно хорошо заметны в колоколах.

Явлением биений пользовались на практике для выяснения обертонового состава звука, при так называемом «анализе ме-

тодом звукого зонда». Звуковым зондом служил тон, постепенно изменяемый по высоте.

Такой тон обычно получали от «генератора звуковых частот». При совместном звучании исследуемого звука и звука-зонда, по биениям последнего узнают о наличии на данной частоте обертона исследуемого звука.

Биениями пользуются также при настройке музыкальных инструментов, например, рояля, фисгармонии. Присутствие биений указывает на неточность настройки в унисон или октаву.

В органе биения иногда используют для придания звуку особой выразительности. Такой звук носит название «vox humana» (человеческий голос), так как он является подражанием естественной вибрации человеческого голоса.

§ 6. При одновременном звучании двух достаточно сильных и близких по высоте звуков, часто появляется третий, ясно слышимый тон.

Этот тон называется разностным комбинационным тоном.

Частота разностного тона равна разности частот образующих его звуков.

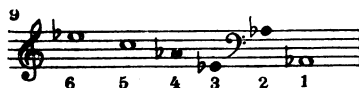
Так, например, два звука, имеющие частоту 600 к/с и 500 к/с, дают разностный тон с частотой 100 к/с.

Положение разностного комбинационного тона по отношению к образующим его звукам определяется их интервальным коэффициентом.

Чтобы определить отношение частот разностного комбинационного тона к частотам образующих его звуков, нужно из числителя интервального коэффициента звуков вычесть его знаменатель. Полученное число (вместе с числами интервального коэффициента) показывает отношение частот всех трех звуков.

1. Определим разностный тон звуков  $es^2$  и  $c^2$ , образующих интервал малой терции, с интервальным коэффициентом  $6/5$ . Вычитая из числителя интервального коэффициента (6) знаменатель (5), находим число  $6-5=1$ , показывающее отношение частоты разностного тона к частотам образующих его звуков.

Построим затем натуральный звукоряд, считая звуки  $es^2$  и  $c^2$  его шестым и пятым частичными тонами:



Тогда первый частичный тон натурального звукоряда  $As$  (1) соответствует разностному тону звуков  $es^2$  (6) и  $c^2$  (5).

2. Определим разностный тон звуков  $f^2$  и  $a^1$ , образующих интервал малой сексты, с интервальным коэффициентом  $8/5$ :  $8-5=3$ .



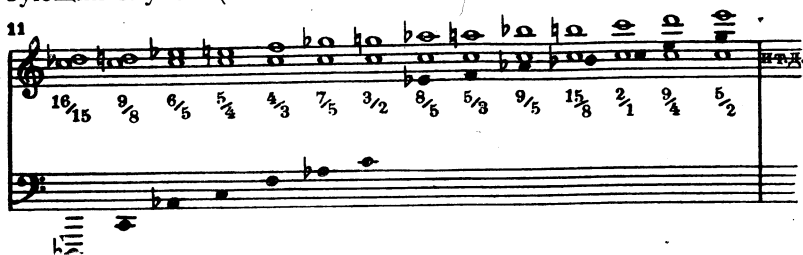
Построим натуральный звукоряд, считая  $f^2$  и  $a^1$  восьмым и пятым его тонами:



Тогда третий частичный тон натурального звукоряда  $c^1$  (3) соответствует разностному тону звуков  $f^2$  (8) и  $a^1$  (5).

Аналогичным образом определяется положение разностных тонов других интервалов с простыми интервальными коэффициентами.

Ниже приведена приблизительная высота (в темперированном строе) разностного комбинационного тона (обозначен черными нотами) в зависимости от величины интервала образующих звуков (обозначены белыми нотами).



Как видно из таблицы, при интервале, меньшем октавы, разностный тон ниже обоих звуков. При интервале октавы он совпадает с нижним звуком. При интервале, большем октавы, разностный тон находится между образующими его звуками. Выше верхнего звука разностный тон быть не может, так как уменьшаемое всегда больше разности.

Разностные комбинационные тоны образуются как основными тонами, так и обертонами и могут в свою очередь образовывать свои разностные комбинационные тоны.

Каждые два тона натурального звукоряда соседних номеров дают разностный тон 1, совпадающий с основным тоном звукоряда и усиливающий его, например:  $2-1=1$ ,  $3-2=1$ ,  $4-3=1$ ,  $7-6=1$ ,  $15-14=1$  и т. д.

Тоны звукоряда несоседних номеров совпадают с другими тонами и усиливают их, например:  $5-3=2$ ,  $7-4=3$ ,  $11-3=8$ , и т. п.

Но усиление отдельных тонов натурального звукоряда еще более усиливает разностный тон 1, образуемый соседними тонами. Этот тон, совпадая с первым частичным тоном, звучит значительно громче остальных частичных тонов, и весь натуральный звукоряд воспринимается, как один звук с высотой основного тона.

Этим объясняется восприятие гармонических обертонов сложного звука, как его тембра, а не как ряда ясно слышимых тонов.

Слышимость комбинационного тона зависит от силы образующих его звуков, от регистра, в котором возникает комбинационный тон, и от положения последнего по отношению к образующим звукам.

Сила комбинационного тона пропорциональна произведению сил образующих звуков. Вследствие этого его громкость растет и убывает значительно быстрее громкости образующих звуков. Поэтому комбинационный тон становится хорошо слышным лишь при достаточно громких образующих звуках.

При одной и той же силе комбинационного тона он лучше слышен, когда образующие звуки имеют приблизительно одинаковую громкость.

Комбинационный тон слышится лучше, когда он находится в области наибольшей чувствительности уха (примерно в области от 500 до 3 000 к/с, т. е. при высоких образующих звуках).

Кроме того, комбинационный тон может быть плохо слышен из-за его маскировки образующими звуками. Эта маскировка тем меньше, чем больше отстоит комбинационный тон от образующих его звуков. Поэтому комбинационный тон отчетливо слышен лишь при интервалах, меньших октавы, так как при этом он всегда находится ниже образующих звуков. При интервале октавы комбинационный тон совпадает с нижним образующим звуком и маскируется последним (см. нотный пример на стр. 28). При интервалах, больших октавы, разностный комбинационный тон, находясь между образующими звуками, также сильно маскируется и слышен плохо.

Все сказанное относительно слышимости комбинационных тонов можно проследить на различных источниках звука.

Комбинационный тон слышен при звучании камертонов, деревянных органных труб и духовых музыкальных инструментов—труб, кларнетов и флейт. Хуже слышен комбинационный тон при звучании струнных смычковых инструментов—скрипок и альтов. На рояле комбинационный тон услышать трудно, так как его громкость быстро убывает.

В музыке возникновение комбинационных тонов может вызвать искажение гармонии. Например, в минорном трезвучии  $e^2—g^2—h^2$  звуки  $e^2$  и  $g^2$  могут образовать гармонически чуждый комбинационный тон  $c$ , который, отстоя от них далеко вниз, хорошо слышен.

Для борьбы с комбинационными тонами источники звуков следует располагать по возможности далее друг от друга, а также строить созвучие таким образом, чтобы комбинационные тоны не противоречили общей гармонии.

Комбинационные тоны были открыты еще в середине XVIII века немецким органистом Зорге в Гамбурге и, независимо от него,—итальянским скрипачом Тартини в Падуе. Однако различные теории объяснения этого явления появились значительно позже.

Сначала считали, что комбинационные тоны возникают лишь в слуховом аппарате человека — ухе.

Так, Юнг, основываясь на том, что частота разностного тона, как и частота биений, равна разности частот образующих звуков, полагал, что когда число биений в 1 секунду станет достаточно большим, то их толчок будут восприниматься ухом как комбинационный тон.

Гельмгольц, теоретически правильно объяснив появление комбинационных тонов, считал, что они возникают в ухе вследствие несимметричности строения барабанной перепонки, которая при своих колебаниях прогибается в одну сторону больше, чем в другую.

Кроме того, он допускал возможность, что слуховые косточки среднего уха при биениях могут производить периодические стуки, воспринимаемые как комбинационные тоны.

Однако позднейшие исследования показали, что лица, у которых операцией были удалены барабанная перепонка и слуховые косточки (кроме стремени), все же могли слышать комбинационные тоны.

Современная теория основывается на теории Гельмгольца, математически доказавшего, что разностные комбинационные тоны возникают вследствие так называемой «нелинейности колебаний» системы. Эта нелинейность состоит в том, что величины смещения колебательной системы при вынужденных колебаниях не пропорциональны вынуждающей силе. А так как практически колебания каждой системы при больших амплитудах становятся нелинейными, то комбинационные тоны могут возникать в каждой колебательной системе, даже в воздухе, при звуковых волнах слишком большой амплитуды, а не только в ухе человека.

Поэтому, принято различать субъективные комбинационные тоны, возникающие в ухе, и объективные комбинационные тоны, возникающие вне уха в колебательных системах (например, в громкоговорителе).

Наиболее заметными, обычно, являются субъективные комбинационные тоны.

---

## Глава шестая

### УСТРОЙСТВО УХА. РЕЗОНАНСНАЯ ТЕОРИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

§ 1. Человеческое ухо (рис. 3) представляет собой орган, преобразующий звуковые колебания в нервные импульсы.

В анатомическом отношении в ухе различают три отдела: 1) наружное ухо, состоящее из ушной раковины и наружного слухового прохода; 2) среднее ухо—так называемая барабанная полость, которая имеет придатки—Евстахиеву трубу и сосцевидный отросток; 3) внутреннее ухо (лабиринт), состоящее из улитки (часть слуховая), преддверия и полукружных каналов (часть вестибулярная).

Если к этому присоединить и центральную часть, т. е. тот отрезок слухового нерва, который лежит вне внутреннего слухового прохода, а также слуховые пути в продолговатом и большом мозгу и центральные слуховые поля в коре височных долей, то весь комплекс будет называться слуховым аппаратом.

Наружный слуховой проход представляет собой трубку, несколько изогнутую, оканчивающуюся во внутренней своей

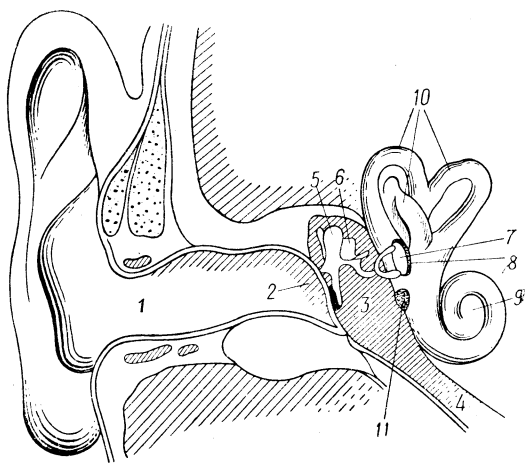


Рис. 3

1 наружный слуховой проход, 2 барабанная перепонка, 3 полость среднего уха, 4 Евстахиева труба, 5 молоточек, 6 наковальня, 7 стремя, 8 овальное окно, 9 улитка, 10 полукружные каналы, 11 круглое окно

части барабанной перепонкой. Барабанная перепонка полностью изолирует наружное ухо от среднего, т. е. барабанной полости. Перепонка имеет вид тонкой (0,1 мм толщиной) пленки. Она состоит из фиброзных волокон (радиальных и циркулярных) и по форме своей напоминает конус, обращенный своей вершиной в полость среднего уха. В барабанной полости находятся слуховые косточки (молоточек, наковальня и стремя), соединенные между собой суставами. Рукоять молоточка вращена в самую барабанную перепонку и доходит приблизительно до середины перепонки. На внутренней стенке барабанной полости имеются два отверстия — овальное, закрытое пластинкой стремени, и круглое, затянутое перепонкой (так наз. вторичной барабанной). Евстахиева труба соединяет барабанную полость с носоглоткой и служит для уравнивания наружного и внутреннего давления воздуха при восприятии очень сильных звуков.

Устройство внутреннего уха очень сложно, почему оно и называется лабиринтом. Слуховая часть его (улитка) имеет форму раковины морской улитки, у человека она образует  $2\frac{1}{2}$  завитка. Вестибулярная часть состоит из преддверия или цистерны и трех полукружных каналов (вертикальный, горизонтальный и сагиттальный). Весь лабиринт наполнен жидкостью. Поперек просвета завитка улитки проходит способная колебаться основная пластинка, а на ней расположен Кортиев орган, содержащий так называемые волосатые (слуховые) клетки с подходящими к ним окончаниями слухового нерва.

В функциональном отношении ухо можно разделить на две части — звукопроводящую (ушная раковина, наружный слуховой проход, барабанная перепонка и барабанная полость, жидкость, заполняющая лабиринт) и звуковоспринимающую (слуховые клетки, окончания слухового нерва, слуховые пути в мозгу и т. д.).

Ушная раковина не играет большой роли у человека. Части ее, находящиеся ближе к входу в слуховой проход, несколько усиливают звук, благодаря отражению в проход падающих на них звуковых волн. Кроме того, ушная раковина, видимо, помогает ориентации относительно источника звука в пространстве вследствие некоторого изменения тембра. Это имеет место, главным образом, при слушании обоими ушами (бинаурально). Наружный слуховой проход является тем основным каналом, по которому идет звук в среднее ухо.

В физиологии слуха барабанная перепонка (так же, как и вся связанная с нею слуховая цепь) имеет большое значение для передачи низких звуков; при разрушении перепонки или слуховых косточек низкие звуки воспринимаются или плохо, или же совсем не воспринимаются, средние же и высокие, при прочих равных условиях, слышатся удовлетворительно. Функции барабанной полости, поскольку последняя содержит цепь

слуховых косточек, ясны из предшествующего. Воздух, содержащийся в ней, способствует подвижности цепи слуховых косточек, что играет роль в проведении низких тонов, и кроме того, он сам по себе тоже проводит звук средних и низких тонов непосредственно пластинке стремени, а может быть — и вторичной перепонке круглого окна. Мускулы барабанной полости служат для регулирования натяжения барабанной перепонки и цепи слуховых косточек («аккомодация» к звукам различного характера) в зависимости от силы звука. Роль овального окна заключается в основной передаче звуковых колебаний лабиринту (его жидкости); круглое же окно является регулятором: при отклонении стремени внутрь давлением лабиринтной жидкости вторичная барабанная перепонка выпячивается кнаружи (вследствие несжимаемости жидкости). Известную роль в передаче звука играет и сама внутренняя (лабиринтная) стенка среднего уха.

Громадное значение в физиологии слуха имеет лабиринт. Звуковые волны, идущие через овальное окно, передают колебания лабиринтной жидкости преддверия, которая в свою очередь передает их жидкости улитки. Звуковые волны, проходящие через лабиринтную жидкость, раздражают окончание волосков соответствующих волосатых (слуховых) клеток; это раздражение, передаваясь коре головного мозга, вызывает слуховое ощущение.

§ 2. Способ восприятия звука еще не выяснен. Классическая теория резонанса Гельмгольца признает существование в лабиринте особого механического вспомогательного аппарата. Эластические волокна основной перепонки улитки, на которой покоятся слуховые клетки, по своей длине очень различны. Наиболее короткие волокна, расположенные в начальной части основного завитка, постепенно становятся длиннее, и в конце последнего завитка (верхушки) достигают максимальной длины (в 12 раз длиннее таковых основного завитка). Это позволяет считать, что в лабиринте имеются волокна (подобные струнам), способные служить резонаторами для тонов различной высоты, что подтверждается количеством волокон (около 20 000) основной перепонки улитки, которое соответствует числу тонов, воспринимаемых ухом (у человека от 16 до 20 000 к/с).

---

# АКУСТИКА МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГОЛОСОВОГО АППАРАТА

## Глава первая

### ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ

§ 1. Каждый музыкальный инструмент, независимо от его устройства, может состоять в основном из следующих главных частей:

а) звучащего тела — основной части инструмента, издающей звук. Иногда его называют латинским словом *в и б р а т о р*<sup>1</sup>, подразумевая при этом тело, которое возбуждает звуковые волны в окружающей нас воздушной среде. Возбуждение этих волн может происходить либо путем непосредственной передачи, либо с участием промежуточных излучателей звуковой энергии;

б) возбудителя колебаний звучащего тела. Для передачи энергии звучащему телу и для возбуждения его колебаний во многих случаях применяются более или менее сложные механизмы. Их устройство и форма варьируют, в зависимости от способа возбуждения колебаний и природы звучащего тела;

в) усилителя громкости звука, необходимого во всех тех случаях, когда отдача энергии звучащего тела окружающим его массам воздуха слишком мала. В большинстве случаев это происходит тогда, когда звучащее тело имеет слишком малую поверхность или объем. В таких случаях колебания звучащего тела должны быть переданы другому телу, имеющему большую поверхность или объем, которое тогда явится преимущественным излучателем его колебаний в окружающее воздушное пространство.

Применение твердых поверхностных излучателей необходимо во всех струнных инструментах; в этих случаях наиболее удобным видом излучателей являются резонансные деки, представляющие собой пластинки из какого-либо упругого материала (чаще всего дерева). В тех же случаях, когда звучащее

<sup>1</sup> От латинского *vibrare* — колебаться.

тело само по себе имеет большую поверхность (пластинки, перепонки), нет необходимости в применении добавочных излучателей колебаний.

Поверхностные излучатели звуковой энергии применяются во всех звуковоспроизводящих инструментах и приборах (патефон, граммофон, электрические воспроизводители звука — громкоговорители и т. п.). Во всех этих случаях излучателем звука в атмосферу является колеблющаяся пластинка или мембрана. Если поверхность такой пластинки мала, как например, в мембране граммофона или фонографа, то для усиления издаваемых ею звуков применяют раструбы; в тех же случаях, когда почему-либо нежелательно или невозможно применение раструбов, излучающую поверхность колеблющейся пластинки делают достаточно большой. Такие пластинки обычно называют диффузорами<sup>1</sup>.

Для того, чтобы излучатель звуковых колебаний мог хорошо выполнять свое усиливающее назначение, необходимо, чтобы он был хорошим множественным резонатором, т. е. чтобы он мог более или менее равномерно реагировать на колебания разнообразных частот, производимые звучащим телом, и более или менее равномерно отдавать их в окружающие массы воздуха. Поэтому, хотя в качестве излучателей и применяют тела, сходные по форме и конструкции с звучащими телами, но, в отличие от последних, их сооружают таким образом, или ставят в такие специальные условия, чтобы они по возможности не имели ярко выраженных собственных частот колебаний в пределах того диапазона частот, которые они предназначены усиливать и излучать.

Излучатели звуковых колебаний, как показывает практика, обычно в большей или меньшей степени участвуют также в образовании тембра излучаемых звуков. Их физические свойства благоприятствуют изменению формы звуковой волны, излучаемой звучащим телом. Регулируя устройство излучателей, мы получаем средства к управлению не только громкостью звука музыкальных инструментов, но и их тембрами.

§ 2. Существеннейшей частью каждого музыкального инструмента является одно или несколько звучащих тел.

В музыкальных инструментах применяются твердые и газообразные звучащие тела (воздух). Хотя существуют и жидкие звучащие тела, но, ввиду практических неудобств при их использовании, они не находят применения в музыкальной практике.

Все разнообразные звучащие тела, в зависимости от их материала, формы и акустических особенностей, чешский физик Эрнст Хладни подразделил на три основные категории:

<sup>1</sup> От латинского *diffundere* — распространять, рассеивать.



1. Тела, упругие вследствие своей природной твердости и формы; они не требуют предварительного натяжения или сжатия для того, чтобы получить способность издавать звук. Такие тела мы будем в дальнейшем называть самозвучащими телами. Они могут иметь разнообразную форму (бруски, стержни, пластинки плоские и изогнутые в виде сосудов, труб и пр.).

Обычно такие тела применяются в свободно подвешенном состоянии, или же в положении, при котором они опираются на немногие точки и которое не влияет на их способность колебаться.

Иногда применяется частичное закрепление таких звучащих тел, в некоторой степени ограничивающее свободу их колебаний. Это относится, например, к тонким упругим стержням и удлиненным пластинкам (язычкам), которые для того, чтобы они могли издавать необходимые музыкальные звуки, укрепляются на одном конце, а второй конец остается свободным. При таком способе частичного закрепления, как это мы увидим из дальнейшего, такие самозвучащие тела приобретают особые акустические свойства.

Такие частично закрепленные самозвучащие тела мы будем в дальнейшем называть полусамозвучащими.

2. Тела, становящиеся упругими вследствие натяжения, которому их подвергают. От степени натяжения, при прочих равных условиях, зависит частота их колебаний, т. е. высота издаваемого ими звука. Тела этой группы имеют форму либо с большим преобладанием одного пространственного протяжения над двумя остальными (струны), либо с большим преобладанием двух пространственных протяжений над третьим (перепонки, мембраны)<sup>1</sup>. Вследствие таких особенностей формы они лишены способности, подобно самозвучащим телам, колебаться и издавать музыкальные звуки в свободном или полусвободном состоянии.

3. Тела, становящиеся упругими вследствие процесса сжатия. В отличие от первых двух групп, где звучащие тела являются твердыми, тела этой группы — газообразные. Сюда относится главным образом воздух, наполняющий трубки духовых музыкальных инструментов.

§ 3. Все существующие способы возбуждения звучащих тел можно свести, в основном, к следующим трем способам:

а) Удар или толчок. Этот способ характеризуется мгновенным приложением и передачей энергии звучащему телу, с последующим предоставлением ему полной или относительной свободы колебаний. Отдача энергии в окружающее воздушное пространство и процесс внутреннего трения в материале звучащего тела приводят к постепенному уменьшению

<sup>1</sup> От латинского *membrana* — кожа, перепонка.

амплитуды его колебаний, т. е. к затуханию последних (как это мы наблюдаем в струне фортепиано, колоколе и т. п.). Газообразные звучащие тела возбуждаются быстро следующими друг за другом периодическими толчками; при этом возникает более или менее длительное вынужденное и притом незатухающее колебание звучащего тела;

б) **Щипок или зацепление.** Этот способ возбуждения, характеризующийся зацеплением звучащего тела каким-либо предметом, постепенным выведением его из положения равновесия и последующим внезапным его освобождением, применим только к некоторым видам твердых звучащих тел (струны, стержни, язычки);

в) **Трение.** Этот способ возбуждения можно свести к ряду периодически повторяющихся зацеплений и освобождений звучащего тела, следующих в ритме его звуковой частоты. В противоположность зашпыванию, после которого звучащее тело получает свободу колебаний, при возбуждении трением возбуждающее тело остается в тесном соприкосновении с звучащим телом в течение всего периода возбуждения. Возбуждение трением применимо как к твердым звучащим телам, где для повышения сцепления между возбудителем и вибратором часто применяют липкие и легкоплавкие связующие вещества<sup>1</sup>, так и к газообразным, где оно используется в так называемых свистящих, или лабиальных инструментах.

Все указанные способы возбуждения звучащих тел и возникающие при этом колебательные процессы можно охарактеризовать следующим образом.

В тех случаях, когда энергия подводится к звучащему телу в форме однократного импульса (удар, толчок, зацепление) и оно после этого получает свободу, оно начинает совершать свободные и затухающие колебания, постепенно расходуя сообщенную ему энергию на преодоление сопротивления раскачиваемого воздуха, на трение вне и внутри самого тела, на развитие в нем теплоты, на отдачу части энергии в точках закрепления или соприкосновения с другими способными колебаться телами. В этих случаях тела дают звуки, наиболее громкие в момент возникновения и более или менее быстро затухающие. Примеры—все ударные и щипковые струнные музыкальные инструменты.

Иная картина получается, когда к колеблющемуся телу энергия подводится непрерывно и длительно, малыми порциями во время каждого колебания, пополняя потери энергии, происходящие вследствие естественного их затухания. Колебания тогда приобретают постоянную амплитуду и делаются незатухающими, длящимися в продолжение всего того периода времени, когда к звучащему телу подводится энергия. По-

<sup>1</sup> Например, легкоплавкие смолы (канифоль).

ступление энергии здесь управляется механизмом, присущим самой колебательной системе, и источник энергии, идущей на поддержание колебаний, составляет неотъемлемую часть этой системы.

Такие системы называются автоколебательными, а совершающиеся в них колебания— автоколебаниями. Примером автоколебательных систем являются: смычковые струнные инструменты, все духовые музыкальные инструменты, речеголосовой аппарат человека и многие другие механизмы.

Особым случаем является подведение силы переменного значения к множественным резонаторам, как это мы видим в современных громкоговорителях, граммофоне, телефоне и т. п. Здесь наблюдается некоторое внешнее сходство с вышеописанными автоколебательными системами, выражающееся в том, что вибратор обычно колеблется в течение всего того периода, когда к нему подводится колебательная энергия, и может, в частности, совершать незатухающие колебания. Однако коренным отличием таких колебательных систем от настоящих автоколебательных систем является то, что вибратор здесь не управляет подведением к нему энергии, идущей на возбуждение и поддержание колебаний, не входит в состав колебательной системы, а является независимым от нее механизмом. В то время, как в настоящих автоколебательных системах вибратор активно участвует в организации и распределении колебательной энергии, в описанных системах вибратор является телом пассивным, послушно выполняющим любые движения, в соответствии с силами, подводимыми к нему извне и организуемыми без его участия.

---

## Глава вторая

### ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§ 1. Применяемые в музыкальных инструментах твердые самозвучающие тела характеризуются достаточной массой, инерцией и упругостью, а также сравнительно малой величиной внутреннего трения. В силу этого они, будучи возбуждены ударом, способны колебаться более или менее продолжительное время, с постепенно затухающей амплитудой.

Величина внутреннего трения в материале, кроме перечисленных других физических свойств, является важным фактором, определяющим продолжительность звучания этих тел; чем она меньше, тем медленнее, при прочих равных условиях, происходит затухание их колебаний.

Для звучания самозвучающие тела не нуждаются в закреплении; оно было бы даже вредным, так как мешало бы свободе их колебаний. Обычно их только подвешивают или кладут на немногие точки опоры, с целью сохранения их положения в пространстве.

В зависимости от формы, самозвучающие тела имеют различные акустические свойства и колеблются неодинаковым образом. В силу этого их целесообразно подразделить на следующие категории:

**А. Бруски и стержни.** Они характеризуются заметным преобладанием длины над двумя другими пространственными измерениями. В музыкальных инструментах они могут применяться либо свободно лежащими на двух точках опоры, либо подвешенными или укрепленными за один из концов, причем второй конец остается свободным<sup>1</sup>.

Будучи возбуждены ударом посередине, свободно лежащие бруски и стержни дают основной тон, разделяясь при этом двумя узлами на три колеблющихся участка: центральный,

<sup>1</sup> Такой способ закрепления на практике применяется гораздо реже, преимущественно для достаточно тонких стержней, так как при таком способе тела при колебании дают сильные негармоничные частичные тоны,

имеющий длину около  $5/9$  длины, и конечные, имеющие длину около  $2/9$  длины всего бруска или стержня. Поэтому, чтобы дать такому телу наибольшую свободу колебаний, точки его опоры располагают в местах, соответствующих узлам колебаний (рис. 4) основного тона. Такое положение точек опоры, давая наибольшую свободу для колебаний основной частоты, в то же время способствует ослаблению частичных тонов, при которых брусок или стержень разделяется на большее число колеблющихся частей, дающих более высокие тоны. Ослабление частичных тонов необходимо потому, что числа их колебаний находятся в весьма сложных отношениях к числу колебаний основного тона, и что эти тоны звучат негармонично, а поэтому и музыкально неприемлемо.

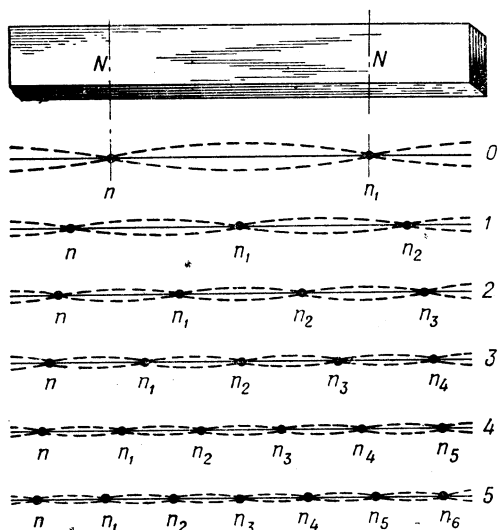


Рис. 4

Следующая таблица дает отношения частичных тонов бруска к его основному тону:

Число узлов	2	3	4	5	6	7
Приблизительно пропорциональные числа колебаний	$3^2$	$5^2$	$7^2$	$9^2$	$11^2$	$13^2$
То же, если принять число колебаний основного тона за единицу	1	2,78	5,45	9,00	13,45	18,8

Таким образом, звукоярд частичных тонов бруска с основным тоном до малой октавы будет приблизительно следующий:



Из этого примера видно, насколько важно максимальное уменьшение силы и продолжительности звучания столь негармоничных частичных тонов.

При употреблении стержней, укрепленных на одном конце, заглушение частичных тонов, происходящих от разделения стержня на отдельные колеблющиеся участки (рис. 5), невозможно. Тоны эти также весьма негармоничны, так как находятся тоже в весьма сложных числовых отношениях к основному тону.

Следующая таблица дает отношения частичных тонов закрепленного на одном конце стержня к его основному тону:

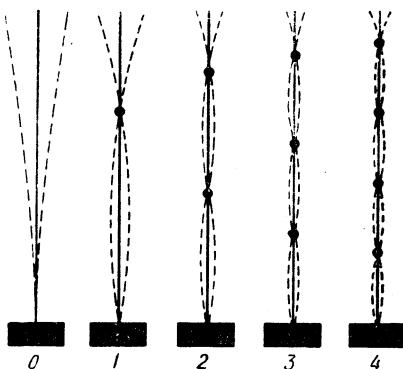


Рис. 5

Число узлов	0	1	2	3	4
Приблизительно пропорциональные числа колебаний	$6^2$	$15^2$	$25^2$	$35^2$	$45^2$
То же, если принять число колебаний основного тона за единицу	1	6,25	17,35	34,1	56,3

Таким образом, звукоряд частичных тонов стержня с основным тоном *До* большой октавы будет приблизительно следующий:



Спектр звука брусков и стержней осложняется комбинационными тонами, возникающими в результате взаимодействия частичных тонов друг с другом и с основным тоном. Это придает звукам ударяемых брусков и стержней своеобразный характер, не похожий на звуки других инструментов.

Для удобства прикрепления бруски и стержни могут быть просверлены в точках их основных узлов, что практически почти не влияет на их акустические свойства.

**Б. Пластинки**, если они не слишком тонки, и достаточно массивны, жестки и упруги, сохраняют также способность к

более или менее длительному колебанию после прекращения их возбуждения.

Если при этом они имеют форму удлиненного прямоугольника, то они колеблются подобно брускам, от которых они отличаются только меньшей толщиной (высотой). Как и бруски, они имеют два главных узла колебаний, находящихся приблизительно на расстояниях  $\frac{2}{9}$  их длины от концов. Все сказанное раньше о брусках относится в полной мере и к таким пластинкам.

К музыкальным инструментам, в которых применяется такая форма звучащих пластинок, относятся металлофон (гlockenspiel) и челеста.

Процесс колебаний у пластинок квадратной, многоугольной, овальной и круглой формы протекает значительно сложнее, чем у брусков и описанных выше прямоугольных удлиненных пластинок.

Из только что указанных форм пластинок в музыкальных инструментах применяются преимущественно только круглые пластинки, причем для повышения их упругости и улучшения их звуковых свойств их делают не плоскими, но придают им более или менее сложный изогнутый профиль.

Изгиб пластинок ведет к сближению узловых линий в месте изгиба, вблизи которого такие пластинки обычно держат или подвешивают при игре. Это необходимо для того, чтобы не создавать противодействия свободному колебанию их остальной поверхности и обеспечить наибольшую силу и продолжительность их звука.

Звукоряды, даваемые такими пластинками, крайне сложны; обилие негармонических частичных тонов, часто значительно более сильных, чем основной тон, делает распознавание последнего затруднительным, вследствие чего большинство из инструментов этого рода не имеет ясно выраженной высоты звука.

Примером оркестровых инструментов такого рода являются тарелки, гонги, колокола.

**В. Цилиндрические трубки**, ударяемые посередине, колеблются подобно брускам и стержням и подчиняются аналогичным акустическим законам. Однако, в отличие от цилиндрических стержней, при расчете высоты их основного тона надлежит руководствоваться не их диаметром, но квадратным корнем из суммы квадратов их внешнего и внутреннего диаметров. Таким образом, при данной длине, внешнем диаметре и материале трубки дают тем более высокие звуки, чем тоньше их стенки.

Звук трубок богат негармоническими обертонами; к нему примешиваются, в качестве формант, собственные тоны заключенных в них объемов воздуха. Благодаря этому тембр их приобретает несколько более закругленный и мягкий оттенок.

При изготовлении трубчатых музыкальных инструментов (тубафонов), материал трубок и толщину стенок трубок подбирают так, чтобы собственные частоты заключенных в трубках объемов воздуха соответствовали основным преобладающим тонам трубок и их усиливали.

§ 2. Упомянувшийся выше акустик Хладни подробно исследовал процессы колебания квадратных, многоугольных и круглых пластинок, укрепленных в центре и возбуждаемых смыч-

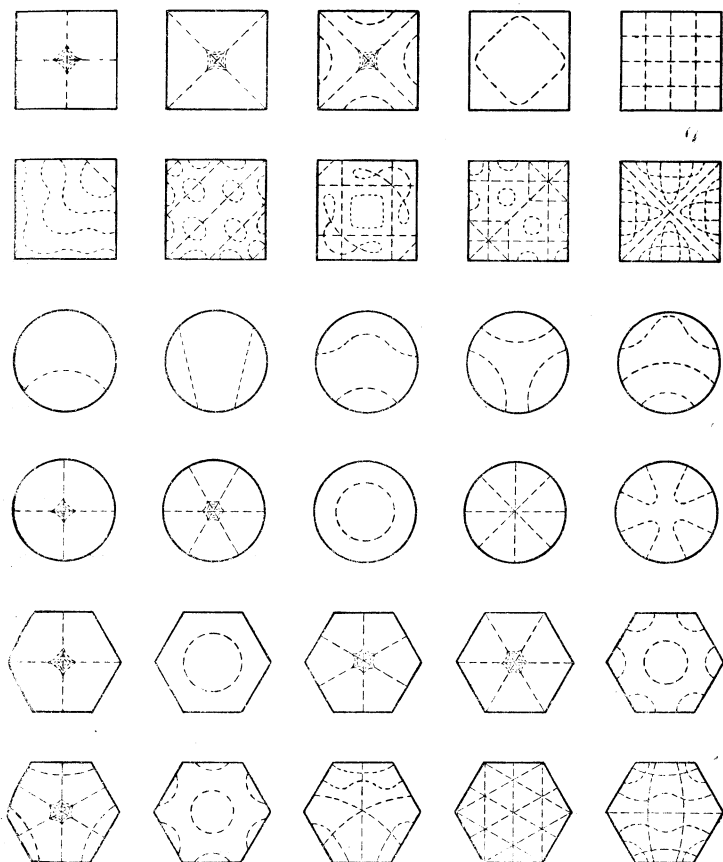


Рис. 6

ком в разных точках их периметра. При этом, в зависимости от места возбуждения и дополнительного прикосновения пальцами к некоторым точкам периметра пластинок, удавалось вызывать более или менее сложную форму колебаний пластинок, сопровождаемую тонами разной высоты.

Хладни обнаруживал форму колебания пластинок, посыпая их мелким сухим песком. При колебании пластинок, песок



сбрасывался с пучностей и скоплялся в виде кучек и линий в узлах, давая при этом более или менее сложный рисунок, показывающий расположение узлов. На рис. 6 показаны некоторые из форм колебаний и расположения узлов на пластинках, найденные Хладни. Получаемые при этом фигуры из кучек и линий песка получили, по имени изобретателя этого способа исследования, название хладниевых фигур.

§ 3. Перепонки (мембраны) и струны являются, в сущности, чрезвычайно тонкими пластинками и стержнями. Такое изменение их формы, когда одно или два пространственных измерения являются ничтожными по сравнению с остальными, приводит к существенному изменению их качеств, а именно к тому, что эти тела лишаются той упругости, которая необходима для того, чтобы они могли издавать музыкальные звуки. Этот недостаток упругости, связанный с особенностями их формы, практически восполняют тем, что искусственно натягивают эти тела, вследствие чего их упругость значительно повышается и они становятся способными издавать музыкальные звуки.

Перепонки натягивают, надевая их при этом на твердые рамки; струны растягивают между двумя неподвижными точками.

**А. Перепонки.** Наиболее удобным и типичным способом возбуждения натянутых перепонок является удар; поэтому почти все перепончатые музыкальные инструменты относятся к классу ударных инструментов.

Современные оркестровые перепончатые инструменты имеют круглую рамку и перепонку. Будучи возбуждена ударом, перепонка такой формы начинает совершать более или менее сложные, постепенно затухающие колебания. При этом она может колебаться вся целиком, попеременно вдавливаясь и выпячиваясь и давая при этом основной тон, либо она подразделяется узловыми линиями на отдельные участки, колеблющиеся в противоположных направлениях, и дает при этом соответствующие частичные тоны. Расположение узловых линий колеблющейся перепонки было выявлено методом фигур Хладни; оказалось, что узловые

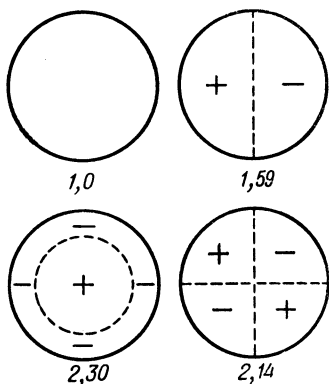


Рис. 7

линии являются либо ее диаметрами, либо образуют круги, концентрические с ее краями. Рис. 7 показывает некоторые простейшие формы колебаний круглой перепонки, дающие основной тон и ближайшие к нему частичные тоны, числа

колебаний которых по отношению к основному тону помещены под каждым из кругов.

Нижеследующий нотный пример дает приблизительную картину звучания первых четырех тонов круглой перепонки, если предположим, что ее основной тон есть *До* большой октавы:



Путем многовекового опыта играющие на перепончатых ударных инструментах пришли к выводу, что перепонка издает наилучший звук тогда, когда ее ударяют не в центре, а на половине расстояния между центром и краем. А так как частичный тон с числом колебаний 2,30 имеет кольцообразный узел, лежащий как раз на половине расстояния между центром и краем перепонки, то в силу закона Юнга<sup>1</sup> музыканты таким образом его устраняют, а вместе с ним устраняют и ряд более высоких частичных тонов, имеющих узел в этом же месте. Музыкальное качество звука перепонки от этого значительно улучшается, так как он очищается от некоторых негармонических частичных тонов.

Точные исследования показывают, что частота колебаний основного тона круглой перепонки обратно пропорциональна ее диаметру и квадратному корню из удельного веса ее материала и прямо пропорциональна квадратному корню из силы ее натяжения.

Эта зависимость верна, конечно, только для перепонки однородной структуры, а так как в оркестровых музыкальных инструментах для перепонки применяется выдубленная кожа животных, которая никогда не бывает однородной по толщине и плотности, то на практике наблюдаются значительные отступления от этих законов.

Неоднородность кожаной перепонки приводит к изменению фигур и взаиморасположения узловых линий, а следовательно и к иным соотношениям высот ее частичных тонов. Практически было найдено, что если перепонку делать утолщающейся от краев к центру, то удастся несколько приблизить звукояд ее частичных тонов к гармоническому ряду обертонов, чем и пользуются при изготовлении барабанов и литавр, с целью улучшения их звука.

Негармоническое соотношение издаваемых перепонками частичных тонов приводит к тому, что звуки большинства перепончатых ударных инструментов лишены определенной высоты. Вследствие этого они употребляются главным образом, как ритмические шумовые инструменты. Некоторое исключение из этого представляют литавры, дающие звуки достаточно определенной высоты, благодаря присутствию котлообразного резонатора, усиливающего основной тон перепонки.

<sup>1</sup> См. стр. 49 § 6.

**Б. Струны.** Первоначальным, наиболее типичным способом возбуждения струн является зажимывание (зацепление) их концом пальца, или каким либо предметом, к чему предрасполагает их форма. Кроме того, возможно возбуждение струн посредством удара или трения особым способом (смычок, колесо и т. п.).

§ 4. Законы колебания струн удобнее всего изучать на специальном приборе, называемом сонометром<sup>1</sup>. Он представляет собой продолговатый деревянный ящик (рис. 8), на верхней стороне которого натянуты рядом две струны, проходящие через две подставки, укрепленные на концах верхней доски (деки) сонометра. Одну из струн натягивают посредством колка, а вторую перекидывают через небольшой блок и натягивают подвешенным к ней грузом.

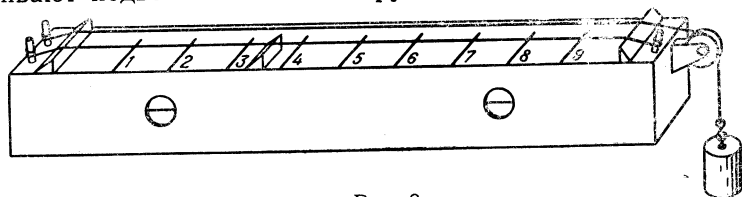


Рис. 8

Кроме двух крайних подставок, сонометр имеет третью призматическую подставку, которую можно передвигать вдоль по его деке, изменяя длину колеблющихся частей струн. Для определения положения подвижной подставки расстояние между крайними подставками разделено на части, и соответствующая шкала нанесена на деку.

Натянем на сонометр две одинаковые струны; при этом настроим струну, натягиваемую колком, в унисон со струной, натягиваемой грузом. Подставим под вторую струну подвижную подставку так, чтобы она разделила ее точно пополам. Возбуждая ее на какой-либо из ее половин, мы найдем, что обе половины будут звучать в унисон, но на октаву выше целой струны.

Если мы поставим подвижную подставку на расстоянии  $1/3$  длины второй струны, то найдем, что ее меньший отрезок даст дуодециму вверх от тона контрольной струны, а больший отрезок—квинту вверх от него. Тоны обоих отрезков струны в этом случае будут находиться в интервале октавы, а длины— в отношении  $1:2$ .

Ставя подвижную подставку на  $1/4$  длины струны, мы получим двойную октаву вверх от контрольного тона на меньшем отрезке, и кварту вверх от него—на большем отрезке. Соотношение между этими двумя тонами будет равно дуодециме, а отношение длин отрезков струны —  $1:3$ .

<sup>1</sup> От латинского слова *sonus* — звук и греческого *metron* — мера.

Из таких опытов, варьируя длины отрезков струны, мы можем вывести первый закон колебания струн:

*I. Число колебаний струны, при прочих равных условиях, обратно пропорционально длине ее колеблющейся части.*

Чем сильнее натянута струна, тем больше возрастает ее упругость, тем больше частота ее колебаний и тем выше издаваемый ею тон. Изменяя величину груза, натягивающего вторую струну, и сравнивая получающиеся при этом звуки со звуком первой струны, мы находим, что если груз увеличить в 4 раза, то звук повысится на октаву, т. е. число колебаний струны увеличится в 2 раза; если груз увеличить в 9 раз, то звук повысится на дуодециму, а число колебаний струны утроится, если груз уменьшить в 2 раза, то звук понизится на увеличенную кварту (тритон), т. е. число колебаний струны уменьшится в 1,41 раза, и т. д.

Отсюда следует второй закон колебания струн:

*II. Число колебаний струны, при прочих равных условиях, прямо пропорционально квадратному корню из натягивающей ее силы.*

Применяя, вместо одинаковых струн, струны равной длины, силы натяжения и одинакового материала, но разной толщины (диаметра), мы найдем, что высота звука более толстой струны будет ниже, чем высота звука более тонкой струны.

Точные исследования этой зависимости позволяют вывести третий закон колебания струн:

*III. Число колебаний струны, при прочих равных условиях, обратно пропорционально ее диаметру (толщине).*

Таким образом, если, например, увеличить толщину струны в 2, 3 и т. д. раз, то она даст вдвое, втрое и т. д. меньше колебаний, и обратно.

Наконец, применяя струны одинаковой толщины, длины и одинакового натяжения, но из разного материала, мы находим, что струны, сделанные из более плотного и тяжелого материала, дают более низкие звуки.

Точные исследования этой зависимости позволяют вывести четвертый закон колебания струн:

*IV. Число колебаний струны, при прочих равных условиях, обратно пропорционально квадратному корню из плотности ее материала.*

Например, беря струну из втрое более плотного материала, мы уменьшим частоту ее колебаний в 1,73 раза и т. д.

Оба последних закона можно объединить в следующий общий закон: при прочих равных условиях, число колебаний струны обратно пропорционально квадратному корню из ее массы.

Все вышеприведенные законы используются в практике строительства музыкальных инструментов и игры на них.

Так, например, чтобы получить из данной струны звуки разных высот, применяют укорачивание ее длины посредством прижима ее пальцем к особой доске (грифу), лежащей под струной.

Регулировкой силы натяжения пользуются при настройке инструментов. При игре на китайской цитре «кин», имеющей высокие подставки, делящие струны на две части—правую, на которой играют, и левую, обычно не используемую для звука, иногда для получения хроматического повышения звука увеличивают силу натяжения струны, нажимая на нее рукой в левой ее части.

Наконец, в многострунных инструментах для более низких звуков применяют не только более длинные, но и более толстые и тяжелые струны. Для этого басовые струны часто дополнительно обвивают проволокой из тяжелого металла, увеличивающей их массу. В особенности необходимо применение струн разной массы в таких инструментах, в которых длина всех струн одинакова.

§ 5. Исследуя движения возбужденной струны, мы обнаруживаем в них различные формы колебаний.

Простейшая форма колебания струны имеет место, когда она колеблется вся целиком между двумя точками ее закрепления. При этом (рис. 9—1) она имеет по концам узлы, а в се-

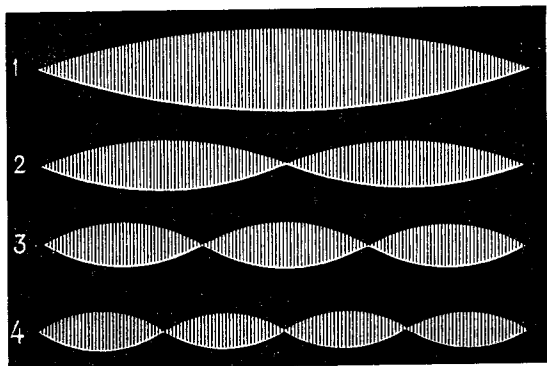


Рис. 9

редине—пучность колебаний и издает свой основной тон. Но, кроме этого простейшего случая, каждая струна, вследствие деформаций, испытываемых ею в точке возбуждения в момент последнего, одновременно с основной вышеописанной формой колебания будет совершать более сложные колебательные движения. При этом она делится промежуточными узлами на некоторое число равных отрезков, из которых каждый колеблется самостоятельно и дает звук, число колебаний которого подчиняется первому закону колебаний струн. Формы таких частичных колебаний струны даны на рис. 9—2, 3, 4. Соответствующие им звуки являются гармониками от основного тона струны, примешиваются к последнему в виде более или менее сильных призвуков и определяют тембр звука, издаваемый струной в целом.

В зависимости от материала, диаметра, длины и жесткости струны, а также от способа ее возбуждения, количество и сила возникающих при ее колебании частичных тонов весьма сильно варьируют. Так например, тонкие и длинные, а потому и гибкие струны, возбуждаемые каким-либо острым орудием (плектром, крючком и т. п.), претерпевают в месте возбуждения значительную деформацию и поэтому дают очень сложную форму колебательного движения, характеризующуюся большим количеством частичных тонов. Наоборот, возбуждение толстой и короткой, а потому и относительно жесткой струны тупым предметом (например, концом пальца), вызывая незначительную деформацию в месте возбуждения, дает более простую форму ее колебаний и меньшее количество частичных тонов.

§ 6. Томас Юнг, исследуя колебания струн при различных способах их возбуждения, нашел, что форма колебаний струны зависит от места, в котором ее возбуждают.

Он нашел, что:

1) если возбуждать струну в какой-либо точке, то в этой точке возникнет пучность и не может образоваться узел.

И обратно:

2) если в какой-либо точке струны создать торможение поперечного колебания, то в этом месте не может образоваться пучность, но возникнет узел.

Эти два положения носят название законов Юнга и по существу справедливы для всех вообще твердых звучащих тел, как например, для брусков, стержней, пластинок, перепонки и т. п.

Из первого закона Юнга вытекает, что место возбуждения звучащего тела определяет форму его колебания и вытекающий из этого состав частичных тонов, т. е. тембр его звука. Если, например, возбуждать струну точно в середине, то при этом в ней не возникнут те частичные колебания, которые имеют узел в этом месте; струна будет издавать только нечетные гармоники, а все четные гармоники окажутся исключенными. Если мы возбудим струну в точке, делящей ее на три части, то этим самым мы исключим из ее колебаний 3, 6, 9, 12-ю и т. п. гармоники, узлы которых попадают в точку возбуждения. Возбуждая струну фортепиано в  $1/8$  ее длины, мы выключаем 8, 16, 24-ю и т. п. гармоники. Другими словами, чем дальше мы отходим от средней точки струны при ее возбуждении, тем меньшее количество гармоник оказывается исключенным. Тембр звука от этого делается полнее и ярче.

Кроме устранения ряда гармоник, возбуждение звучащего тела в некоторой точке приводит к тому, что одновременно увеличиваются амплитуды всех тех его частичных тонов, пучности которых находятся в точке возбуждения. Мы это можем

наряду с исключением 8 и 16-й гармоник наблюдаются усиленные, например, на спектре звука фортепиано (рис. 20), где 4-й гармоник вокруг 4, 12 и 20-го частичных тонов, т. е. как раз тех, пучности которых находятся в точке удара.

Приближение точки возбуждения к одному из концов звучащего тела увеличивает число его частичных тонов и повышает силу их высоких номеров. Это влечет за собой увеличение яркости и резкости звука, извлеченного таким приемом игры. Наоборот, приближение точки возбуждения к середине вибратора уменьшает число частичных тонов и делает тембр более простым и мягким, при одновременном усилении основного тона вибратора.

§ 7. Одним из случаев использования второго закона Юнга является получение так называемых флажолетных тонов струн.

Сущность этого явления состоит в том, что если слегка прикоснуться концом пальца или иным легким и мягким предметом к струне в какой-либо точке, делящей ее в простом целократном отношении ( $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $1/5$  и т. д.), и привести ее в возбуждение<sup>1</sup>, то струна начнет колебаться, разделившись на целое число равных частей (2, 3, 4, 5 и т. д.), колеблющихся в противоположных фазах и отделенных друг от друга узлами.

Так как основной тон и ряд гармоник при такой форме колебаний струны будут исключены, то звук приобретает своеобразный тембр, делающий его похожим на тембр звука французского свирелеподобного народного инструмента—флажолета, откуда эти тоны и получили свое наименование.

Прикасаясь слегка к какой-либо точке струны и тормозя этим ее поперечные колебания, мы исключаем возможность образования в этом месте пучности, но создаем условия для образования узла. В то же время это легкое прикосновение не выключает остальную часть струны, как это имеет место при прижатии ее к грифу, но создает возможность передачи колебательного движения остальным частям струны, через посредство продольных колебаний в точке узла, происходящих в ритме поперечных колебаний в точке возбуждения. Поэтому, например, если мы касаемся струны на  $1/2$  ее длины, то, возбуждая одну из ее половин, мы получим одновременно колебания и другой ее половины. Обе они будут звучать в унисон, давая вторую гармонику, т. е. октаву от основного тона.

Если мы коснемся  $1/3$  струны, то она разделится на три колеблющихся участка, со вторым узлом на  $2/3$  ее длины и даст третью гармонику, т. е. дуодециму.

Касаясь  $1/4$  струны, мы делим ее на четыре колеблющиеся части, с узлами в точках  $1/4$ ,  $2/4$  и  $3/4$  ее длины; при этом струна даст 4-ю гармонику, т. е. двойную октаву.

<sup>1</sup> Лучше всего производить возбуждение струны смычком.

Касаясь  $1/5$  струны, мы разделим ее на пять частей, с узлами на  $1/5$ ,  $2/5$ ,  $3/5$  и  $4/5$  ее длины; при этом она даст 5-ю гармонику, т. е. большую терцию через две октавы, и т. д.

Обобщая эти явления, мы находим, что если отделить  $1:p$  длины струны, то мы разделим ее на  $p$  колеблющихся участков, с  $p-1$  узлами между ними, и получим  $p$ -ю гармонику от ее основного тона.

Если  $p$ —первоначальное число, то соответственный флажолетный звук можно вызвать прикосновением в любом из узлов; если же  $p$ —число, состоящее из нескольких первоначальных сомножителей, например 4, 6, 8, 9, 10 и т. д., то соответствующий номер флажолетного звука можно вызвать касанием только на тех точках струны, длина которых выражается несократимыми дробями (например,  $1/4$ ,  $3/4$ ,  $1/6$ ,  $5/6$ ,  $3/8$ ,  $5/8$ ,  $7/8$  и т. п.).

Практически число извлекаемых из струны флажолетных тонов ограничивается физическими свойствами струны, в первую очередь — степенью ее жесткости, затрудняющей разделение ее на мелкие самостоятельно колеблющиеся участки.

---



## Глава третья

### УДАРНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Применяемые в современном симфоническом оркестре ударные инструменты весьма разнообразны по устройству, видам и форме применяемых в них звучащих тел и по акустическим особенностям.

В основном, с точки зрения различия применяемых в них звучащих тел (вибраторов), их можно подразделить на две основные группы: а) инструменты с «самозвучащими» телами и б) инструменты с «несамозвучащими» телами, способными издавать музыкальные звуки только в состоянии их натяжения.

К первой группе относятся: ксилофон, треугольник, металлофон (гlockenspiel), колокола, гонги, тарелки, кастаньеты, различные хлопущки, трещотки, погремущки и т. п.

Ко второй группе относятся инструменты с перепонками — барабаны, литавры и бубны, а также некоторые из струнных инструментов, среди которых наиболее значительное место в современной музыке занимает фортепиано.

Из ударных оркестровых инструментов вибраторы первого типа имеют следующие инструменты:

§ 1. К с и л о ф о н<sup>1</sup>, представляющий хроматически настроенный набор брусков из упругого дерева, лежащих узлами на упругих подкладках и ударяемых деревянными колотушками.

Спектр звука ксилофона (рис. 10) характеризуется немно-

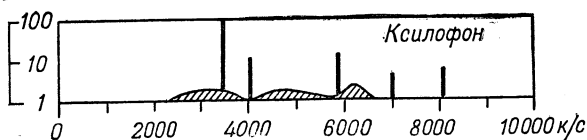


Рис. 10

гочисленными негармоническими частичными тонами, более слабыми, чем основной тон брусков. Кроме того, в звуке имеет-

<sup>1</sup> От греческих слов: *xulon* — дерево и *phosco* — звучу.

ся небольшое количество шумовых призвуков, а также примесь формант, вносимых ударами колотушек<sup>1</sup>:

Вследствие сравнительно небольшой плотности дерева и значительного внутреннего трения звуки ксилофона очень быстро затухают. Ввиду этого звук имеет своеобразный, пустой, сухой и острый тембр, резко выделяющий его в массе звуков других инструментов оркестра.

§ 2. Треугольник представляет стальной стержень круглого (реже призматического) сечения, согнутый в форме приблизительно равностороннего треугольника. Будучи свободно подвешен за один из углов и возбужден ударом по одной из прямых сторон железной или стальной палочкой, треугольник издает резкий и пронзительный высокий звук, лишенный определенной высоты. Анализ звука треугольника (рис. 11) показывает необычайную сложность его спектра. В его звуке найдено несколько десятков сильных негармоничных частичных тонов, частоты которых доходят до высших пределов слышимости.



Рис. 11

Сложность изгиба треугольника приводит к тому, что основные узлы его стержня перемещаются в углы, где они лежат чрезвычайно близко друг к другу. Кроме того, каждая из его прямых сторон во время звучания разделяется вторичными узлами на большое число участков различной длины, что и обуславливает чрезвычайную сложность его спектра. Замечено, что крутизна изгиба углов треугольника повышает количество и силу верхних частичных тонов, отчего звук треугольника делается еще резче и пронзительнее.

§ 3. М е т а л л о ф о н (гlockenspiel), аналогично ксилофону, состоит также из набора хроматически настроенных пластинок, но изготовленных из лучшей упругой стали, имеющих прямоугольное сечение и меньшую, по сравнению с брусками ксилофона, толщину. Набор таких пластинок, подобно брускам ксилофона, лежит узлами на упругих подкладках. При игре пла-

<sup>1</sup> Приводимые здесь и в дальнейшем описании музыкальных инструментов спектрограммы их звуков построены таким образом, что величины по ординатам пропорциональны логарифмам силы частичных тонов, а по абсциссам — пропорциональны частотам колебаний этих тонов. Такое построение спектрограмм наиболее соответствует нашим субъективным ощущениям, согласно закону Вебер-Фехнера (см. первый отдел, гл. 3). Заштрихованные участки, ограниченные сверху кривыми линиями, показывают наличие в данном звуке шумовых, т. е. непериодических элементов соответствующих частот и силы.

стинки ударяют либо ручными колотушками или молоточками, либо молоточками при помощи клавишного механизма.

По сравнению с ксилофоном, металлофон имеет звуки с некоторой продолжительностью, заметной на слух, так как внутреннее трение в стали гораздо меньше, чем в дереве. Тембр звука металлофона напоминает звуки маленьких колокольчиков; его многочисленные негармонические обертоны сравнительно слабы и быстро затухают. Исключение составляют только низко звучащие пластинки в диапазоне малой октавы и ниже; они имеют сравнительно более сильные частичные тоны, придающие звуку заметно фальшивый оттенок. В особенности в этих звуках слышен первый обертон (увеличенная ундецима), придающий им неприятный оттенок.

Применение резонаторов в виде настроенных воздушных объемов, заключенных в открытые с одного конца цилиндры или прямоугольные коробки, значительно усиливает основные тоны пластинок и способствует увеличению глубины и певучести звука и смягчению его тембра. К таким металлофонам принадлежит челеста, у которой удар по пластинкам, лежащим на отдельных коробчатых резонаторах, производится посредством обтянутых прессованным войлоком (фильцем) молотков, подобных фортепианным. Кроме того, в челесте так же, как и в фортепиано, применены глушители (демпферы), прекращающие колебания пластинок в момент снятия пальцев с соответствующих клавиш.

Звук челесты отличается значительной мягкостью и чистотой, хотя в нижнем регистре (малая октава) и не удалось освободиться от неприятных призвуков, вызванных наличием довольно сильных негармонических обертонов, лежащих на увеличенную ундециму выше основного тона пластинок.

§ 4. Тарелки относятся к категории круглых пластинок и состоят из пары одинаковых бронзовых пластинок, диаметром около 0,3—0,5 м. и толщиной около 1,5—2,5 мм. Центральная часть тарелок путем проковки, сообщающей их металлу высокую степень упругости, выгнута в виде небольшого полушара с поперечником около  $1/5$ — $1/6$  их диаметра. На вершине полушара имеется отверстие, через которое продета и закреплена кожаная рукоятка для держания тарелок при игре. Остальная, внешняя часть тарелок имеет слегка вогнутый профиль и также проковывается для увеличения упругости. При складывании вместе тарелки соприкасаются по кольцевой линии, концентрической с их краями, идущей на небольшом расстоянии от последних.

Возбуждение тарелок производится двояким способом. Ударяя их друг о друга встречным, слегка скользящим движением, с последующим разведением в стороны, мы вызываем сложное колебание их поверхностей, дающее резкий, своеобразный звенящий звук без определенной высоты, но с преоб-

ладанием средних и высоких частот. Возбуждение же одиночной тарелки колотушкой, в особенности если последняя снабжена мягкой головкой, дает более спокойный и определенный звук, напоминающий звук слабого колокола. Эрвин Мейер, исследуя такой звук, нашел, что он дает весьма сложный непрерывный спектр; при диапазоне частот от 50 до 12—13 тыс. к/с преобладающими являются частоты от 1 000 до 6 000 к/с (рис. 12):

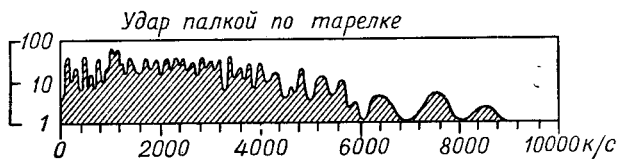


Рис. 12

Сложность колебаний тарелок выявлена методом хладниевых фигур. Некоторые из них представлены на рис. 13. При

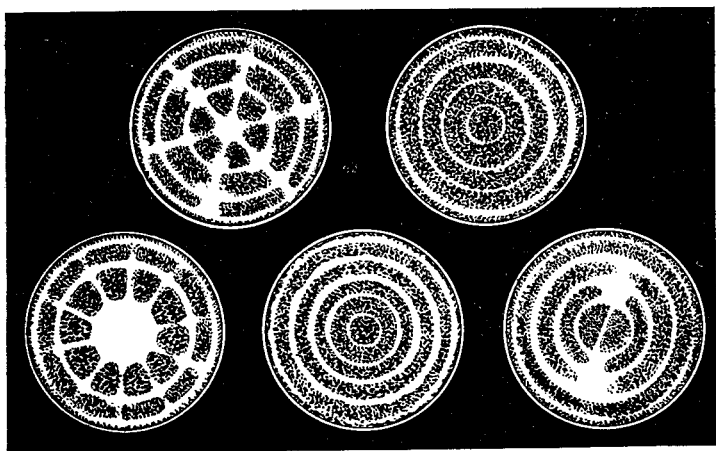


Рис. 13

этом в центре тарелки всегда получается узел; кроме того, наблюдается, что диаметральные узловые линии во время звучания медленно вращаются вокруг центров тарелок, создавая изменения фаз излучаемого в пространство звука. Вследствие этого слушателю кажется, что звук тарелок непрерывно вибрирует, так как подходящие к нему с разных точек тарелок колебания, интерферируя друг с другом, вызывают появление биений. Последние, кроме того, возникают в результате сложных интерференционных процессов между частичными тонами и возникающими комбинационными тонами, а также вслед-

ствие некоторой разницы в звуке обеих тарелок, которые при ручной обработке и проковке металла никогда не могут быть сделаны совершенно одинаковыми.

§ 5. Гонг (там-там) также относится к категории круглых пластинок. Однако, в противоположность тарелкам, гонг посередине слабо или вовсе не изогнут, но зато имеет обычно круто загнутые края, за которые его подвешивают для игры<sup>1</sup>. Вследствие резкого изгиба краев в область изгиба перемещается главная узловая линия, в то время как в середине гонга, по которой ударяют колотушкой с мягкой головкой, при звучании возникает пучность. Кованая бронза, из которой обычно делают гонги, обладая высокой упругостью и малой величиной внутреннего трения, обуславливает их способность давать длительные, медленно затухающие колебания. Звук гонга, вследствие чрезвычайной сложности колебательного процесса, богат негармоническими частичными тонами и поэтому в большинстве случаев не имеет ясно выраженной основной высоты; в спектре звука гонга преобладают главным образом низкие и средние частоты колебаний.

Подобно тарелкам, в колеблющемся гонге непрерывно происходит перемещение вторичных узлов и пучностей, вызывающее появление в звуке биений и вибрации.

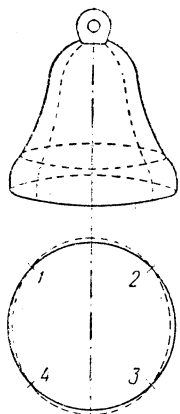


Рис. 14

§ 6. Колокола представляют глубокие, расширяющиеся к выходу, чашки или стаканы с довольно толстыми стенками, отлитые из бронзы. В отличие от тарелок и гонгов, они после отливки обычно не проковываются.

Сложную форму колокола можно рассматривать, как сильно изогнутую пластинку. Центр (вершина) колокола, где находится главный узел колебаний и точка подвеса, а также концентрическая зона (пояс) вблизи его краев, по которой производятся удары, делаются обычно несколько утолщенными. В качестве ударяющего орудия применяется массивный «язык», отлитый из бронзы или мягкого чугуна. Его подвешивают за ушко в глубине чашки колокола, а его утолщенная, висящая книзу головка при раскачивании бьет по утолщенному месту близ краев колокола.

Звучащий колокол разделяется на части многими узловыми линиями; главнейшие из них идут по меридианам, проходя через вершину колокола. При звучании основного тона колокол разделяется четырьмя меридиональными узловыми линиями на четыре сектора, причем колебания противоположащих секторов совпадают по фазе (рис. 14).

Кроме этих четырех узловых линий в колоколе появляются добавочные меридиональные узловые линии, а также кольцевая узловая линия, расположенная параллельно краям колокола. Получающиеся при этом частичные тоны даны в следующей таблице:

<sup>1</sup> Своей формой большинство гонгов поэтому напоминает сковороду или поднос.

	Приблизительная высота частичного тона	Расположение узловых линий
1	Основной звук	4 меридиана
2	Октава	4 меридиана и кольцо
3	Малая децима	6 меридианов
4	Дуодецима	6 меридианов и кольцо
8	Двойная октава	8 меридианов

Указанные соотношения основного и частичного тонов только приблизительно верны, так как частичные тоны сильно изогнутых пластинок вообще не являются гармоническими.

Так например, Рэйли, исследуя звук двух колоколов разного веса (4 и 6 центнеров), но дающих на слух преобладающий одинаковый тон *ре* второй октавы, нашел у них следующие частичные тоны:



Любопытно отметить, что у второго колокола нет в числе частичных тонов того звука *ре*, который слышится ухом.

Вообще, кроме основного тона, который часто бывает довольно слабым, колокола издают, как наиболее сильный и преобладающий, один из частичных тонов, который и определяет слышимую нами высоту его звука.

Тщательно исследуя звук колоколов, Табер Джонс пришел к заключению, что преобладающим тоном является двойная октава от основного (т. е. пятый частичный тон), но его распознавание затрудняется общим шумом остальных звуков колокола; вследствие этого наше ухо ошибается и относит его к более низкой октаве.

В первые секунды после удара тембр звука колокола заметно изменяется. Рис. 15 показывает, что в момент удара преобладает пятый частичный тон, но через три секунды после удара самым сильным становится третий частичный тон, а пятый и все выше него лежащие частичные тоны почти совершенно затухают.

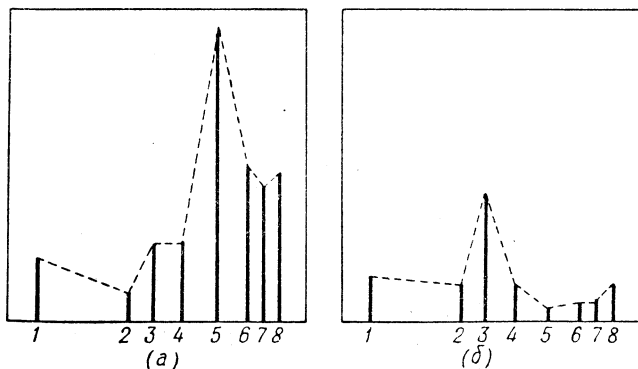


Рис. 15

Во время звучания в колоколах замечено медленное вращение узловых линий; это вызывает слышимый нами эффект биений и периодических изменений тембра звука. Кроме того, восприятие звука колокола еще осложняется возникновением сильных разностных комбинационных тонов между его частичными тонами. В основном частота колебаний колокола обратно пропорциональна его поперечнику. Более толстые колокола при данном поперечнике дают более высокие звуки, большую силу и продолжительность звучания. При сохранении геометрического подобия профилей колоколов, частоты колебаний их основных тонов обратно пропорциональны кубическому корню из отношения их весов.

§ 7. К группе ударных инструментов с самозвучащими телами в форме изогнутых пластинок нужно также отнести *кастаньеты*, состоящие из пары неглубоких одинаковых чашечек из твердого, упругого дерева, связанных вместе так, что их углубления обращены друг к другу, а половинки могут слегка раскрываться. Удар половинок кастаньет друг о друга вызывает сухой, шелкающий звук с довольно ясно слышимой высотой, причем наличие резонирующего объема воздуха между чашечками вносит в их звук некоторую форму, смягчающую их тембр.

Настоящие испанские кастаньеты, являющиеся непременной принадлежностью сопровождения сложными ритмическими фигурами народной песни и танца, делаются парными, для игры левой и правой руками, разной величины и разной высоты звука, причем настройка их отличается на кварту или квинту. Левая, более низко звучащая пара кастаньет отбивает основной ритм, в то время как правая отбивает мелкую ритмическую фигурацию. Получается своеобразное двухголосие и чередование ритмических фигур.

Оркестровые фабричные кастаньеты состоят из двух пар различно настроенных чашечек, сидящих на общей рукоятке; при их употреблении невозможно чередование высоты звуков и различных ритмов.

Исследования Э. Мейера показали, что в звуке кастаньет (рис. 16) имеются две преобладающие области частот, лежащие около 2 000 и 6 000 к/с, т. е. в интервале дуодецимы:

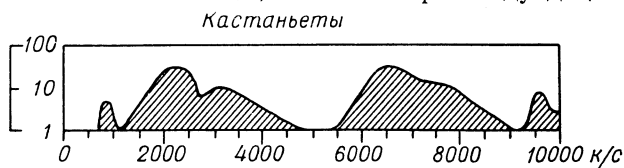


Рис. 16

В современном оркестре применяют следующие инструменты с ударяемыми трубками:

§ 8. *Туба фон*, представляющий набор хроматически настроенных металлических (преимущественно стальных) трубок, лежащих главными узлами на упругих подкладках.

Величина и взаиморасположение трубок, диапазон инструмента, а также способ игры в общем подобны ксилофону.

Звук тубафона довольно яркий, с своеобразным металлическим и в то же время несколько «бутылочным» тембром, что, повидимому, зависит от резонансового влияния полостей в трубках. Подобно металлофону, звуки тубафона длятся некоторое время. Низкие звуки имеют довольно хорошо слышимый негармоничный первый обертон (уменьшенную дуодециму), что делает их неприятными. Присоединение к трубкам полостных резонаторов, как это имеет место в американской разновидности тубафона, несколько усиливает основные звуки трубок и смягчает их тембр.

§ 9. Трубочатые «колокола». Так как применение в оркестре настоящих колоколов, вследствие их огромного веса и чрезмерной силы звука, неудобно, то их заменяют более легкими и компактными, менее сильными по звуку суррогатами — набором стальных хроматически настроенных труб, подвешенных вертикально в деревянной раме и ударяемых деревянными молотками.

Звуки трубочатых колоколов (рис. 17), очень богатые негармоничными частичными тонами, довольно удачно имитируют тембр настоящих колоколов.

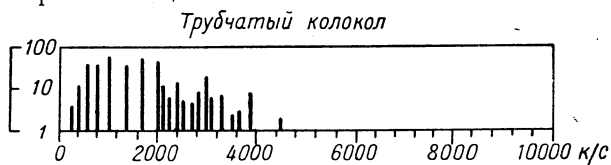


Рис. 17

Следующую группу ударных инструментов составляют инструменты с звучащими телами, требующими предварительного натяжения. Важнейшими из них являются:

§ 10. Литавры, представляющие приблизительно полушарообразные котлы из кованой меди, на верхнее широкое отверстие которых натянута кожаная перепонка, по которой ударяют двумя палочками с мягкими головками. В противоположность остальным ударным инструментам с перепонками, литавры дают звуки достаточно определенной высоты, благодаря присоединению к перепонке резонатора в виде заключенного в котле определенного объема воздуха, собственный тон которого близок к основному тону, издаваемому перепонкой. Кроме того, стенки котла литавр также принимают участие в звучании, колеблясь подобно колоколу. Отверстие на верхушке котла, находясь в его главном узле, не препятствует колебанию его стенок, а служит лишь для выхода избытка воздуха, образующегося в котле в моменты опускания мембраны и для обеспечения ей свободы колебаний.



Винты, укрепленные на периферии котла, служат для изменения натяжения и настройки мембраны. Будучи настроена в соответствии с основным тоном котла и заключенного в нем объема воздуха, перепонка может совершать колебания с значительным преобладанием основного тона, и потому высота ее звука легко распознается.

Этот факт показывает, что в литаврах мы имеем тройную связанную акустическую систему:

- а) собственный (основной) тон перепонки +
- б) основной тон объема воздуха в котле +
- в) основной тон стенок котла.

В случае точного совпадения всех трех тонов, качество звука литавр было бы наилучшим; на практике, однако, полного совпадения достигнуть не удастся, и поэтому литавры данного объема и величины допускают перестройку их перепонки в довольно широких пределах (приблизительно в объеме увеличенной квинты, т. е. на большую терцию выше или ниже некоторого среднего уровня).

Э. Мейер, исследовавший звук литавр, нашел в его спектре заметное преобладание определенной, распознаваемой слухом, частоты (рис. 18), хотя в основном спектр их звука, как и других перепончатых ударных инструментов, характеризуется весьма значительной примесью непериодических, т. е. шумовых составляющих:

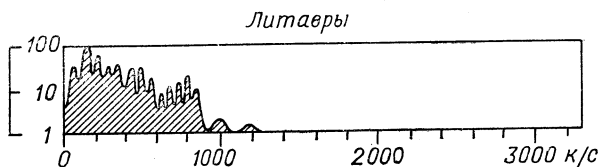


Рис. 18

Сила звука литавр, благодаря большой площади излучающей перепонки и большой амплитуде ее колебаний, весьма значительна; поэтому даже на фоне мощного «тутти» оркестра они дают отчетливо слышимые звуки.

Различие в материале головок колотушек, которыми бьют по перепонкам литавр, вызывает существенные различия в тембре получаемого звука. Сравнительно жесткие и весьма упругие колотушки с головками из пробки или твердого прессованного фильца, при сравнительно малой площади соприкосновения колотушки с перепонкой, дают более резкую деформацию кожи в точке удара, вызывают появление более сильных частичных тонов высших номеров, что придает звуку более яркий и резкий характер. Наоборот, мягкие, обтянутые фланелью, колотушки, вызывая меньшую деформацию кожи в точке удара, большую длительность и большую площадь соприкосновения с перепонкой, заглушают

высшие частичные тоны, придавая звуку более глухой и мягкий оттенок. Вариирование места удара также вызывает изменение тембра и громкости звука; при необходимости дать *ррр*, литаврист ударяет мягкой колотушкой вблизи края перепонки, отчего амплитуда ее колебаний уменьшается, а звук одновременно приобретает несколько большую остроту, необходимую для ясного различения его высоты при столь пониженной его интенсивности.

§ 11. Б а р а б а н, в противоположность литаврам, дает глухие звуки неопределенной высоты. Это различие в качестве звука обусловлено различием в устройстве названных инструментов и отсутствием у барабана специального резонатора, могущего усиливать основной тон его перепонки.

Типичным для барабана является невысокий цилиндрический корпус, оба конца которого закрыты двумя кожаными перепонками. Такое устройство значительно снижает резонансные свойства его корпуса и сводит почти на нет способность заключенного в нем объема воздуха резонировать на определенные частоты.

В самом деле, если в котле литавр, имеющем твердые стенки, мы имеем условия, достаточно благоприятные для образования стоячей волны, то в барабане, при вдавливании внутрь одной из его перепонки при ударе, образующееся под ней сгущение воздуха, дойдя до противоположной, второй перепонки, только в слабой степени отразится от нее, но преимущественно выпатит ее наружу. Через некоторое время, когда вторая перепонка, в силу упругости, начнет двигаться обратно, воздушная волна, переменяв направление, пойдет обратно и вызовет выпячивание первой перепонки, и т. д. Таким образом, во все время звучания внутри барабана происходит периодическое изменение направления распространения воздушной волны от одной перепонки к другой, при наличии лишь ничтожного отражения, необходимого для образования стоячей волны.

Поэтому барабан не дает определенной высоты тона, а лишь более или менее приблизительный намек на нее.

Величина, т. е. поперечник перепонки барабана, определяет общий высотный характер его звука. Если звуки большого барабана (диаметр корпуса около 0,65—0,75 м) можно причислить к категории низких, то звуки барабанов малых диаметров (0,35—0,5 м) можно отнести к области средних высот.

Длина цилиндрического корпуса барабанов влияет на окраску их звуков, привнося в последние некоторые форманты. Так например, замечено, что барабаны плоской формы, с невысоким корпусом, дают звуки более светлого и яркого характера, чем барабаны с длинным корпусом (тулумбас), звуки которых характеризуются более низким и глухим тембром.

Глухости и мягкости тембра барабанов способствует способ возбуждения колотушкой с мягкой головкой; при этом возникает относительно мало призвуков, преимущественно на низких частотах.

Анализируя звук большого барабана, Э. Мейер нашел в нем только непрерывный шумовой спектр (рис. 19), с сравнительно неясно выраженными отдельными частотами, соответствующими, вероятно, частичным тонам его перепонки:

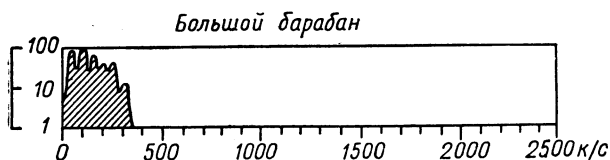


Рис. 19

Преобладающей частотой для большого барабана явилась полоса около 50 к/с.

§ 12. М а л ы й (военный) б а р а б а н, являясь разновидностью описанных барабанов, имея невысокий цилиндрический корпус, отличается от других барабанов, во-первых, применением жестких палочек для удара, а во-вторых, — наличием 2—4 струн, натянутых по диаметру нижней перепонки так, что они на всем протяжении плотно прилегают к последней. При колебании нижней перепонки, вызванном ударами по верхней перепонке, струны, ударяясь об нее, придают звуку сухой, трескучий оттенок. Кроме того, удар жесткими палочками, вызывая резкую деформацию кожи в точке удара, рождает больше высоких частичных тонов, что в совокупности придает звуку малого барабана резкий характерный тембр.

Э. Мейер, исследуя тембр малого барабана (рис. 20), нашел в нем наличие весьма широкой полосы частот, с довольно равномерно распределенными пиками, соответствующими, повидимому, в значительной степени частичным тонам струн, прилегающих к его нижней перепонке:

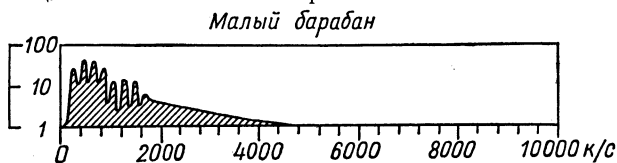


Рис. 20

§ 13. Что наличие второй перепонки на корпусе барабана не превращает последний в отвечающий на определенные частоты резонатор, доказывает применяемый в последнее время в больших оркестрах б а р а б а н - г о н г, состоящий из узкого деревянного обруча большого диаметра (свыше 1 м), с натянутой на него единственной кожей. Удар по ней мягкой колотушкой дает звук, в общем тождественный со звуком нормального большого барабана с двумя перепонками, но еще более значительный по силе, вследствие огромной площади

перепонки, излучающей большое количество колебательной энергии. Сходство тембров этих двух барабанов и неопределенная высота их звуков показывают, что наличие второй перепонки не является обязательным условием, дающим большую определенность высоты звука барабана.

§ 14. Б у б е н или т а м б у р и н, являясь самой малой разновидностью оркестровых ударных инструментов с перепонками, помимо своей величины (диаметр 0,25—0,35 м), характеризуется, во-первых, низким цилиндрическим корпусом с единственной перепонкой, а во-вторых,—наличием в нем большего или меньшего количества свободно подвешенных погремушек и побрякушек.

Последние, имеющие форму маленьких бронзовых тарелочек, бубенчиков и колокольчиков, при ударе рукой по перепонке и при встряхивании бубна ударяются друг о друга и производят резкий звенящий шум, состоящий из множества разнообразных высоких частот. Этот шум, примешиваясь к основным гудящим звукам перепонки, соответствующим смеси тонов средних высот, придает звукам бубна своеобразный характер.

Хотя сила звука бубна, вследствие незначительной площади излучающей перепонки, весьма не велика, однако наличие призывков, создаваемых его побрякушками, делает его звук весьма ярким и обеспечивает ему хорошую слышимость, даже на фоне мощного «тутти» современного симфонического оркестра.

Применение в качестве материала для перепонки кожи, как вещества, имеющего небольшой удельный вес и значительное внутреннее трение, приводит к сравнительно быстрому затуханию их колебаний. Поэтому все оркестровые инструменты с перепонками отличаются сравнительно короткими звуками. В основном можно считать, что продолжительность звучания прямо пропорциональна массе перепонки; поэтому большие и толстые перепонки звучат несколько дольше, чем малые и тонкие, дающие весьма быстро затухающий звук. В частности, затухание звука в малом (военном) барабане увеличивается еще вследствие применения струн, частично являющихся глушителем колебаний нижней перепонки. А заглушение колебаний нижней перепонки влечет за собой торможение колебаний верхней перепонки, что дает в итоге сухость и короткость звука малого барабана.

---

## Глава четвертая

### ФОРТЕПИАНО

Фортепиано — струнный ударный инструмент, с применением сложного клавишно-молоточкового механизма для возбуждения струн.

Источником звука фортепиано являются многочисленные (до 225—230 шт.) стальные струны, натянутые на массивную литую чугунную раму, укрепленную на прочном деревянном корпусе инструмента. В передней части рама скрепляется с так называемым вибрельбанком или массивной многослойной доской из прочного вязкого дерева (бук или клен), в которую вбиты стальные колки, натягивающие струны до получения нужной высоты звука.

В передней части рама имеет порожки или особые винты с продырявленными головками (аграфы), служащие для ограничения длины звучащих участков струн. В задней или нижней части рамы в нее вбиты стальные кольца (задние штифты), за которые струны зацепляются ушками или петлями.

§ 1. Важнейшей акустической частью фортепиано является резонансная дека, лежащая под струнами и рамой, вклеенная краями в корпус инструмента. Она представляет довольно толстую еловую доску, склеенную из нескольких частей; в басовой части дека имеет толщину около 7—9 мм, а в дискантовой — около 9—11 мм. Известная американская фабрика Стейнвей применяет в своих инструментах деки более толстые в середине (до 10—12 мм) и утончающиеся к краям (до 6,5—7 мм); таким образом дека получает до некоторой степени чечевицеобразную форму.

Резонансная дека, воспринимая энергию колебания струн, передаваемую ей посредством наклеенных на нее массивных брусков из бука или клена, называемых подставками или штегами, по которым проходят задние концы струн, преобразует и излучает эту энергию в окружающее пространство.

Колебания струн самих по себе, вследствие их небольшой массы и ничтожной поверхности, способны заставить колебаться лишь незначительный объем окружающего их воздуха. Поэтому звук, слышимый непосредственно от струн, настолько слаб, что перестает восприниматься ухом уже на очень небольшом расстоянии (3—5 м). Переданные же резонансной деке колебания струн распространяются на большую площадь и передаются затем значительным массам окружающего деку воздуха. Вследствие этого звук фортепиано во много раз усиливается. Кроме того, резонансная дека, будучи множественным резонатором, воспринимает и усиливает колебания самых разнообразных частот и потому, одновременно с общим усилением звука фортепиано, способствует также обогащению и улучшению его тембра.

В то же время дека, как и всякое иное твердое звучащее тело, постепенно расходует сообщенную ей колебательную энергию. Поэтому колебания струн, переданные ей, скорее затухают и звук получается менее продолжительным, чем звук струны сам по себе, без применения деки. Выигрыш в громкости звука таким образом достигается за счет уменьшения его продолжительности и певучести.

Затухание деки определяется в основном двумя причинами:

- а) потерями энергии внутри вещества самой деки и
- б) излучением колебаний в окружающее пространство.

Первая потеря является вредной, и чем меньше она будет, тем лучше. Вторая же величина, которую называют «затуханием излучения», должна быть как можно большей. Это затухание излучения, в основном, определяется отношением скорости звука в материале к плотности последнего. Поэтому, при подборе материала для резонансной деки, дерево оказывается выгоднее металлов, так как последние имеют слишком большую плотность. Эмпирическим путем было найдено, что наиболее пригодным материалом для резонансных дек является прямослойная ель, благодаря сравнительно большой скорости распространения в ней звука и малой плотности ее древесины. Затухание излучения для хорошей еловой древесины равно около 0,1, в то время как, например, у стали оно равно только 0,003, а у алюминия — 0,01.

Подбор дерева для деки играет весьма важную роль для получения хорошего качества звука фортепиано. Для этого применяются следующие методы:

1. Подбор древесины по слою. Многие мастера-практики считают, что более узкие слои древесины лучше отвечают на высокие тоны, а более широкие — на низкие. Поэтому более широколистное дерево они ставят преимущественно на левую, басовую часть деки.

2. Второй метод состоит в том, что посередине деки, т. е. там, где наклеивается дискантовый (большой) штег, ставят дощечки с широкими

слоями, а к краям по обе стороны подбирают дощечки с более узкими слоями.

3. Некоторые мастера изготавливают деки по методу «средней fugи». Для этого берут дощечки двойной толщины и подбирают их в щит треугольником так, чтобы самая длинная доска имела самые широкие слои. После склейки щит распиливают по толщине и обе половины склеивают длинными сторонами вместе. При таком способе изготовления деки, расположение в ней дощечек по их свойствам получается наиболее симметричным.

4. Иногда применяется подбор дощечек по звуку, посредством выстукивания пальцем или молотком отдельных дощечек, издающих при этом тоны определенных высот. При этом существуют два принципа отбора: либо подбираются дощечки с приблизительно одинаковым собственным тоном, либо на дискантовую часть деки подбирают дощечки с более высоким собственным тоном.

5. Более объективным и наиболее точным и совершенным современным способом является метод подбора «гомогенных» дек<sup>1</sup>, впервые примененный фабрикой Гротриан-Штейнвег и в настоящее время практикуемый некоторыми лучшими фабриками. Этот метод состоит в построении деки из древесины, упругость и плотность которой находятся в некотором наилучшем и притом постоянном для данной деки отношении, определяемом так называемой «акустической константой»: 
$$\sqrt{\frac{E}{\rho}} = \text{const.},$$

где  $E$ —модуль упругости материала, а  $\rho$ —его плотность.

Эта константа для хорошей резонансной древесины должна быть порядка 1 000—1 200. Ее определяют опытным путем, измеряя удельный вес (плотность) древесины и модуль ее упругости. В данном случае последний определяется измерением величины прогиба дощечки, положенной на две опоры и нагруженной посередине определенным грузом.

Испытания показывают, что «гомогенные» деки, т. е. построенные из дощечек с одинаковой акустической константой по всей поверхности, обладают лучшими механическими и акустическими (резонансными) свойствами, чем деки, изготовленные прежними способами. В частности, инструменты с гомогенными деками дают более равномерное распределение звуковой энергии по всему диапазону музыкальных звуков, что благоприятно влияет на их тембр и ровность их регистров.

Для резонансной деки важна не только однородность материала, делающая ее совершенным множественным резонатором, но и возможно быстрое и равномерное распространение колебаний по всей ее поверхности. А так как у дерева скорость распространения звука поперек волокон значительно меньше, чем вдоль их, то для устранения неравномерной скорости распространения колебаний по ее поверхности нижнюю (заднюю) сторону деки снабжают наклеенными на нее брусками из такого же резонансного дерева, называемых рипками или пружинами. Направление досок, из которых склеена дека, а следовательно, и ее волокон, чаще всего подбирается параллельно основному направлению наклеиваемого на нее дискантового штега. Направление же пружин или рипок выбирается приблизительно перпендикулярное к волокнам дерева деки.

<sup>1</sup> От греч. слова *homogenes* — однородный.

При изготовлении деки и наклейке на нее пружин, ей придается несколько выпуклая по направлению к струнам, сводообразная форма. Делается это, во-первых, для механического противодействия силе давящих на нее через подставки струн, а во-вторых, для повышения ее общей упругости, что благоприятно влияет на ее акустические свойства и придает ей большую чувствительность к разнообразным частотам колебаний. Выпуклость деки достигается тем, что наклеиваемые на нее пружины делаются не прямолинейными, но несколько дугообразными, так что их концы в процессе наклейки насильственно подтягиваются к деке и придают ей слегка выпуклую форму и некоторое внутреннее напряжение.

Края деки должны быть хорошо и по всей периферии вклеены в раму корпуса; таким образом колебания деки отчасти передаются всем остальным деревянным частям корпуса фортепиано, который, в силу этого, в известной степени участвует в усилении звука и образовании его тембра.

Замечено, что применяемые в новейшее время некоторыми фабриками (например, Стейнвей, Шредер) цельно-гнутые боковые стенки корпусов благоприятно влияют на качество звука инструментов, по сравнению с теми инструментами, у которых стенки корпуса делаются составными из нескольких отдельных участков.

§ 2. Применяемые в современных фортепиано стальные струны натягивают с силой приблизительно до 70—75 кг<sup>1</sup>, что дает в общей сумме для всего инструмента до 18—20 т и даже более. Такое сильное натяжение струн, возросшее в течение XIX столетия примерно в четыре раза, оказалось необходимым для увеличения силы звука и продолжительности звучания, т. е. певучести. Так как при этом начали применять все большие диаметры струнной проволоки, то жесткость и сопротивляемость изгибу в момент удара молотками увеличилась, вследствие чего количество частичных тонов в тембре современного фортепиано, по сравнению с тембрами старых конструкций фортепиано, а также его предшественников—клавесина и клавикорда—значительно уменьшилось. Однако фортепиано при этом настолько выиграло в силе звука и его продолжительности, что обеднение его тембра явилось меньшим недостатком, с которым современная музыка вполне примирилась<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Для крайних басовых струн это натяжение доводят свыше 100—120 кг.

<sup>2</sup> Это обеднение тембра струн было отчасти возмещено лучшими качествами резонансной деки.



Очень важным фактором, определяющим устойчивость строя фортепиано в отношении колебаний температуры, является приблизительно равномерная сила натяжения всех его струн, по крайней мере для среднего и высших его регистров, где применены гладкие, т. е. не обвитые струны. Эту равномерность натяжения можно получить двумя способами: либо, применяя везде одинаковый диаметр струн, увеличивать их длину обратно-пропорционально числам их колебаний (согласно первому закону колебаний струн — см. § 3 главы II этого отдела), либо, увеличивая постепенно их диаметр и массу по мере понижения звуков, одновременно сокращать их длину, против требуемого вышеприведенным законом пропорционального их удлинения.

Простой арифметический расчет показывает, что если, приняв длину колеблющейся части струны для высшего звука фортепиано  $c^5$  в 52—54 мм (как это теперь принято), мы строго будем следовать первому способу, то для струны  $A_2$  мы получим чудовищную длину 7,9—8,2 м, что не только сделало бы инструмент колоссальным по объему и весу и совершенно немыслимым в обращении, но привело бы еще к такому уменьшению жесткости для этих длинных и в то же время тонких басовых струн, что получить достаточную силу звука от них и музыкально пригодный тембр оказалось бы невозможным.

Поэтому практика строительства фортепиано пошла по второму пути, давая вместе с понижением звука постепенное увеличение диаметра и массы действующих частей струн, с одновременным уменьшением приращения их длин. Кроме того, для нижних 25—27 звуков басового регистра употребляют струны, обвитые медной проволокой, значительно увеличивающей их массу, при сохранении достаточной относительной их гибкости. Таким образом удалось значительно сократить длину действующих частей низко звучащих басовых струн, которая в современных больших концертных роялях, с общей длиной корпуса около 2,75 м, не превосходит 2—2,2 м.

Различные конструкторы предложили свои системы расчета мензуры струн фортепиано. Немецкие конструкторы — Ганзинг, Гебель и Юнгханс дают длину струны для  $c^5$ —52 мм, при диаметре 0,8 мм, и увеличивают ее с каждым полутоном в 1,0538 раза, одновременно прибавляя по толщине на каждый полутоном по 0,0045 мм<sup>1</sup>. Английский конструктор Уолфенден берет другие коэффициенты: 1,054 и 0,004117, начиная от наименьшей длины струны  $c^5$ —54 мм и от того же наименьшего диаметра 0,8 мм.

---

<sup>1</sup> Фактически, при существующем ассортименте и нумерации струн, с разницей в соседних диаметрах в 0,025 мм, на каждые 5—6 полутонов берут один диаметр (№) струны.

Отсюда получаются следующие длины и диаметры струн для верхнего и среднего регистров фортепиано, т. е. для необбитых стальных его струн:

Нота	по Ганзингу		по Уолфендену	
	длина	диаметр	длина	диаметр
c <sup>1</sup>	52,0	0,800	54,0	0,800
c <sup>2</sup>	97,4	0,850	102,0	0,850
c <sup>3</sup>	181,8	0,900	192,5	0,900
c <sup>4</sup>	340,9	0,950	364,0	0,950
c <sup>5</sup>	639,5	1,025	688,0	1,000
c	1199,2	1,100	1310,0	1,050
H	—	—	1370,0	1,075

Для нижнего регистра с оббитыми струнами, в зависимости от типа инструмента (рояль или пианино) и его величины, применяются разные длины струн, в связи с чем для них рассчитываются соответствующие диаметры основного стержня и обвивочной проволоки, чтобы достигнуть нужной высоты звука при заданной нормальной средней силе натяжения струн.

Вследствие убывания длины и массы струн, сила их звука, по мере его повышения, уменьшается. Этот недостаток устраняют, во-первых, тем, что увеличивают число струн для каждого звука: нижние 10—12 хоров<sup>1</sup> имеют по одной струне; следующие 14—16—по две струны, и остальные хоры—по три струны, настроенные в унисон, а во-вторых, изменением места удара молотков по струнам, что, согласно законам Юнга (см. § 6 главы II этого отдела), влияет на тембр получаемого звука.

Место удара молотка по струне в современном фортепиано устанавливается по следующему расчету:

а) для левой половины клавиатуры — на расстоянии  $1/8$  длины действующей части струны<sup>2</sup>;

б) для правой половины клавиатуры это расстояние прогрессивно уменьшается, доходя для c<sup>5</sup>:

У Уолфендена—до  $1/14$  длины струны,

У Ганзинга—до  $1/19$  длины струны и

У Гебеля и Юнгханса — до  $1/24$  длины струны.

<sup>1</sup> «Хорами» на техническом языке фортепианных мастеров называют группы струн, настроенных в унисон и обслуживаемых одним молотком.

<sup>2</sup> Это положение места удара сохраняется у Уолфендена до c<sup>1</sup>, у Ганзинга — до g<sup>1</sup> и у Гебеля—до a<sup>1</sup>.

Эти соотношения были найдены эмпирическим путем, так как при этом получилось наилучшее слуховое впечатление от звука фортепиано. Фактически, при выборе места удара на  $1/8$  части длины струны для низкого и части среднего регистров, был почти совершенно устранен 8-й частичный тон. Однако это не составило особого ущерба для качества звука, так как этот частичный тон отчасти дублируется другими гармониками. Главное же преимущество заключалось в том, что при этом удалось значительно снизить одновременно силу 7-го и 9-го частичных тонов, чрезмерная громкость которых вносила бы неблагоприятный оттенок в тембр фортепианного звука. В верхней же половине диапазона фортепиано, где звуки становятся слабее и беднее по тембру, сокращением расстояния места удара удалось несколько увеличить число частичных тонов и этим повысить яркость и субъективное впечатление громкости звука.

Форма, структура и физические особенности головки молотка оказывают большое влияние на тембр получаемого звука. В современном фортепиано применяются молотки, деревянная головка которых обтянута прессованным войлоком высокой степени упругости (так называемый молоточковый фильц). По мере повышения звука, радиус полукруглой части головки, ударяющей по струне, прогрессивно уменьшается, оставаясь приблизительно пропорциональным длине колеблющейся части струны. Одновременно уменьшается и толщина фильца, вследствие чего жесткость молотков, по мере приближения к высокому регистру, также прогрессивно увеличивается, что способствует увеличению яркости звука.

§ 3. В момент удара по струне фильц верхушки головки молотка сжимается и деформируется, так что фактически по струне ударяет некоторая площадка, длина которой пропорциональна радиусу кривой части головки. Кроме того, деформация происходит и в поперечном направлении, причем фильц частично облегает нижнюю часть окружности струны в виде желобка. Двигаясь по инерции вперед, головка молотка некоторое время остается в тесном соприкосновении со струной, вызывая ее деформацию и отклоняя ее из положения равновесия. Соприкосновение молотка со струной длится разное время, в зависимости от веса молотка, толщины слоя фильца на его головке и силы удара по клавише. В основном, басовые молотки, как более массивные и обтянутые более толстым, а следовательно, и более мягким и податливым слоем фильца, остаются в соприкосновении со струнами более продолжительное время, чем легкие молотки, высокого регистра, обтянутые более тонким, а потому и менее податливым слоем фильца. Подбор молотков с разным весом головок и разной толщиной фильца, вызывая разные степени деформации последнего в момент удара, обуславливает, таким образом, разное время соприкосновения молотков со струнами, приблизительно пропорциональное периодам их колебаний<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> При некоторой одинаковой силе удара.

Во всяком случае можно полагать, что в течение первой четверти периода основного колебания струны головка молотка, теряя свою скорость и отдавая свою живую силу струне, остается в тесном соприкосновении с последней.

Когда колебание струны переходит во вторую четверть ее основного периода, то молоток, продолжая идти навстречу ее движению (если его живая сила еще не вполне израсходовалась), продолжает некоторое время деформироваться как в головке, так и в отношении изгиба его стержня. Затем струна начинает вести его обратно, и к концу второй или же в начале третьей четверти первого периода ее колебания (смотря по силе удара) связь молотка со струной прерывается. В этот момент струна получает возможность совершать свободные колебания.

Описанная картина взаимодействия молотка и струны в момент удара может быть вполне вероятной только для гладких (не обвитых) струн среднего и верхнего регистров. Что же касается тяжелых и толстых струн басового регистра, имеющих обмотку медной проволокой, то, в силу большой инерции таких струн, отпадение молотка от струны здесь может совершиться в более ранний момент. В особенности это вероятно потому, что периоды колебаний низких басовых струн относительно весьма велики, а скорость обратной деформации фильца головок басовых молотков изменяется не в точной пропорциональности к скорости движения этих струн. Поэтому справедливо предполагать, что относительное время соприкосновения молотков басового регистра со струнами будет короче, чем в остальных регистрах фортепиано.

Относительная продолжительность времени соприкосновения молотка со струной является одним из важных факторов, определяющих тембр получаемого звука. Чем дольше молоток остается в соприкосновении со струной, тем большее количество гармоник высших номеров окажется заглушенным. Поэтому, если молотки относительно жестки и малы, то краткость их соприкосновения со струнами даст светлый, острый и даже резкий тембр звука, характеризующийся большим количеством и сравнительно силой высоких гармоник. И наоборот, если в инструменте применены более тяжелые и мягкие молотки, то время соприкосновения их со струнами будет относительно большим, а звук получит мягкий и тусклый тембр, характеризующийся малым числом гармоник низких номеров, при отсутствии высших.

Различные фабрики, желая придать своим инструментам определенный тембр звука, применяют разные размеры молотков и разную плотность фильца для их обтяжки. Кроме того, так как невозможно достигнуть абсолютно равномерной упругости всего комплекта молотков при их обтяжке фильцем, что отражается на ровности звуков в отношении их силы и тембра, то готовый инструмент подвергается специаль-

ной операции—интонировке, целью которой является выравнивание качества звука по всей клавиатуре фортепиано.

Сущность интонировки состоит в том, что те из головок молотков, фильц которых оказался слишком жестким и дающим резкий звук, разрыхляются посредством накалывания верхушек молотков особыми иглами; те же молотки, фильц на которых оказался слишком рыхлым и мягким, подвергаются операции уплотнения. Результат, т. е. степень равномерности упругих свойств фильца, проверяется на слух, по качеству (тембру) и ровности силы звука.

С течением времени верхушки головок молотков, от бесчисленных ударов по струнам, подвергаются поверхностному уплотнению, износу и устойчивой деформации; на них остаются желобки от струн. Вследствие этого охват нижней части окружности струн постепенно увеличивается, что влечет за собой некоторое увеличение времени соприкосновения молотка со струной и большее заглушение высших номеров гармоник. Кроме того, вследствие удлинения площадки удара, гармоники, соседние с местом удара, при изношенных молотках являются сильнее заглушенными. Поверхностное же уплотнение фильца увеличивает стучащие шумы в момент удара. Все эти факторы сильно изменяют и во всяком случае ухудшают тембр фортепиано со временем<sup>1</sup>.

Вследствие специфического устройства фортепианного механизма, сообщающего молотку принудительное движение посредством клавиши и промежуточных рычагов только на протяжении около 0,95 его пути и прерывающего связь клавиши с молотком за 2—3 мм до достижения его головкой струны<sup>2</sup>, мы не можем в этот последний момент влиять на способ удара молотка никаким способом. В распоряжении пианиста остается только одно средство: ударяя с различной силой и скоростью по клавише, сообщать молотку различную скорость движения. А так как фортепианный механизм имеет строго фиксированное место удара молотком по струнам и постоянный вес молотка, то различные способы удара по клавишам (так называемое «туше») могут изменять только скорость движения молотка в момент достижения им струны. Отсюда ясно, что все мыслимые оттенки одиночного фортепианного звука сводятся только к разным степеням силы этого звука.

То разнообразное окрашивание, которое искусные пианисты придают извлекаемым ими из фортепиано звукам, является результатом сопоставления целых комплексов звуков

---

<sup>1</sup> Вторым важным фактором, приводящим к ухудшению качества звука фортепиано со временем, является уменьшение упругости его резонансной деки, вызванное изменением механических свойств дерева под длительной нагрузкой и химическими процессами старения древесины деки.

<sup>2</sup> Что необходимо для отпадения молотка от струны после удара.

разной силы и продолжительности, а также использованием явлений резонанса неударяемых струн без или при употреблении педалей (см. ниже), а отнюдь не особыми качествами удара и способами извлечения отдельных тонов.

После удара молотка по струне по ней, в обе стороны от места удара, распространяется продольная волна, отражающаяся обратно после достижения ею обоих крайних точек (порожков). При встрече обратных продольных волн, последние частично интерферируют, причем общая форма колебания струны усложняется. Этот процесс длится в течение некоторого времени, пока первичная резкая деформация, вызванная ударом молотка, не выравняется и не угаснет. В результате такого сложного процесса, правильная стоячая волна и тембр звука струны возникают не мгновенно, а только спустя некоторое время после момента удара. Кроме того, молоток, находясь в тесном соприкосновении со струной в течение по крайней мере первого полупериода ее колебания, играет роль глушителя для некоторых высших номеров ее частичных тонов. Это заглушающее влияние длящегося соприкосновения головки молотка со струной особенно заметно сказывается на коротких струнах высокого регистра, где относительная продолжительность соприкосновения молотка со струной становится больше.

Осциллографические записи момента начала фортепианного звука подтверждают не мгновенное, но лишь постепенное нарастание силы звука и формирование тембра в течение первых периодов основного колебания струны (рис. 21):



Рис. 21

Кроме того, анализы тембра фортепианного звука показывают, что по мере повышения звуков, помимо уменьшения числа частичных тонов, возрастает количество и мощность шумовых призвуков, имеющих своим источником колебания стрежня и головки молотка, внутреннее трение в слое фильца, а также жесткость струн. Последняя в особенности дает себя чувствовать на басовых обвитых и коротких самых верхних струнах, где интенсивность непрерывного шумового спектра относительно весьма велика (рис. 22). Самую

незначительную примесь шумов мы имеем у нижних струн среднего (не обвитого) регистра, где значительная длина струн обуславливает большую, по сравнению с крайними

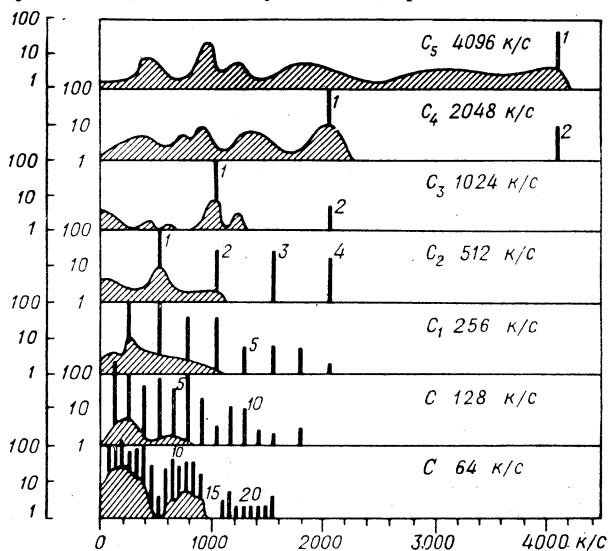


Рис. 22

струнами, относительную гибкость и податливость ударам молотков. Вследствие этого при ударах по средним струнам шумов возникает меньше. Интересно, что шумовой спектр фортепиано лежит главным образом в области низких частот и для струн верхней половины клавиатуры он быстро обрывается вблизи частоты основного тона.

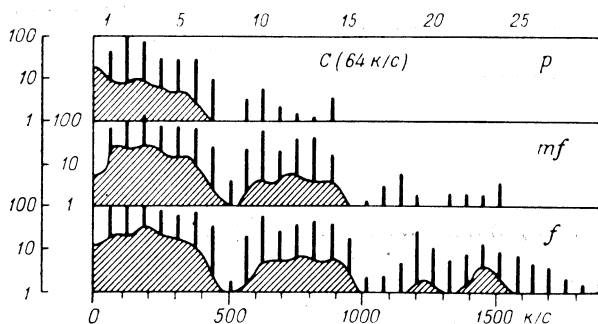


Рис. 23

В зависимости от силы удара по струне, тембр ее звука обогащается за счет увеличения числа высших частичных тонов (рис. 23).

Однако при этом все существенные особенности спектра (максимумы и минимумы амплитуд) остаются неизменно на одних и тех же частотах, и общая конфигурация амплитуд сохраняется. Это показывает, что в основном, независимо от силы удара, тембр одиночного фортепианного звука сохраняет один и тот же характер.

Сравнение тембра современного рояля с фортепиано бетховенской эпохи, когда струны в инструментах были тонкие и были натянуты в несколько раз слабее, а головки молоточков были легче и вместо фильца были оклеены более жесткой оленьей кожей (замшей), а также с клавиесином и клавикордом (рис. 24) показало, что с течением времени в зву-

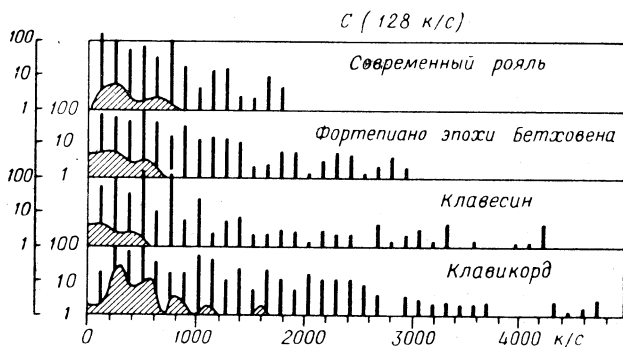


Рис. 24

ке струнных клавишных инструментов происходило сокращение числа частичных тонов, а следовательно, и постепенное обеднение тембра, за счет увеличения промкости звука. Большая жесткость возбуждающего орудия (оклеенный кожей молоточек, перышко и тангент) вызывала увеличение деформации тонкой и гибкой струны в точке ее возбуждения и вносила в спектр ее звука большое число частичных тонов высших номеров, что придавало звуку своеобразный звенящий («проволочный») оттенок.

§ 4. Очень важным акустическим приспособлением в фортепиано являются глушители или демпферы, служащие для быстрого погашения колебаний струн. Имея форму массивных деревянных брусочков, оклеенных мягким войлоком, демпферы лежат на струнах (в рояле), или же прижимаются к ним особыми пружинами (в пианино). При нажатии клавиши, в момент, предшествующий удару, подушечка демпфера отходит от струны, давая ей возможность колебаться. При прекращении нажима клавиши подушечка демпфера прижимается к струне и быстро прекращает ее колебания. Демпферами обычно снабжены только 5 1/2 нижних октав фортепиано; звуки 1 1/2—1 3/4 верхних октав, вследствие короткости струн, настолько быстро затухают, что в добавочном заглушении не встречается практической необходимости.



Особый механизм, действующий при нажиме правой педали, приподымает сразу все демпферы, освобождая все струны фортепиано. Благодаря этому при ударе и звучании какой-либо струны или группы струн в силу резонанса приходят в колебания как все струны высших тонов, соответствующих обертонам взятых звуков, так и более низкие струны, обертоны которых совпадают с частотами колебаний, возбужденных ударом струн. Вследствие этого, при нажатой правой педали, звук струн фортепиано значительно усиливается, обогащается в отношении тембра и делается более продолжительным (певучим).

При особом способе применения правой педали, если нажать ее через небольшое время после взятия отдельной ноты или аккорда, удастся вызвать даже небольшое кратковременное *crescendo* звука, вопреки его естественному затуханию.

Левая педаль современного рояля сдвигает клавиатурную раму со всем механизмом вправо, так что молоточки начинают ударять не по всем струнам отдельных хоров<sup>1</sup>. Вследствие этого не только уменьшается сила звука, но происходит и некоторое изменение тембра, за счет резонанса неударяемой струны хора, которая начинает колебаться несколько иначе, чем если бы она была нормально возбуждена ударом. Иная форма колебаний неударяемой струны несколько изменяет общий тембр комплекса струн данного хора, придавая звуку более прозрачный и иногда несколько звенящий оттенок.

Некоторые американские фабрики (например Стейнвей) в своих роялях применяют еще так наз. «задерживающую педаль» (*sustaining-pedal*), помещающуюся посередине между двумя обычными педалями. Механизм этой педали задерживает в поднятом состоянии отдельные демпферы или их группы, которые были подняты до ее нажатия; в то же время он не оказывает действия на те демпферы, которые в момент ее нажатия лежат на струнах. Пользуясь этой педалью, пианист может, по своему желанию, задержать звучащими те или иные звуки или группы звуков, независимо от общего действия правой педали, и достигать этим особых звуковых эффектов (органный пункт, проходящие мотивы на фоне аккомпанеента и фигурации, и т. п.).

Умелое применение педалей при игре дает пианисту средства для значительного окрашивания звука и внесения в игру разнообразных громкостных и тембровых оттенков.

---

<sup>1</sup> Для тройных хоров—по двум струнам, для парных хоров—по одной струне. Следует однако иметь в виду, что на одиночные струны в басу левая педаль не оказывает почти никакого действия. Некоторое смягчение тембра басовых струн может наблюдаться только в тех роялях, где молотки заметно износились от игры и при нажатии левой педали начинают ударять по струне менее уплотненной и изношенной частью головок.

§ 5. Стремясь обогатить тембр струн высокого регистра, некоторые фабрики (Блютнер, Безендорфер) применяют так наз. «аликвотную» систему. Она характеризуется употреблением добавочной четвертой струны в среднем и верхнем регистре, помещаемой обок и несколько выше остальных трех струн хора. Эта струна снабжается особой подставкой, стоящей на деке, и обслуживается специальной подушечкой на демпфере. Такая аликвотная струна настраивается в среднем регистре на октаву выше основного хора, а в верхнем — в унисон с ним. Резонируя при ударе основного хора, аликвотная струна вносит в тембр некоторые добавочные обертоны, придавая звуку большую полноту и певучесть.

Другие фабрики (Стейнвей, Шредер и др.) применяют систему так наз. «дискантного колокольчика», основанную на использовании лежащих за пределами порожков крайних участков струн<sup>1</sup>. Посредством установки дополнительных порожков на точно вычисленных, кратных с длинами ударяемых частей струн, расстояниях используют резонанс этих частей струн в верхнем регистре, увеличивая полноту и певучесть последнего. Эти крайние резонирующие участки струн настроены в октаву, квинту и в унисон с основными участками.

§ 6. Приспособлением особого назначения является модератор, применяемый в некоторых пианино и роялях. Он состоит из полоски мягкого войлока, вдвигаемой между молотками и струнами и смягчающей удары молотков по последним. Вследствие этого звук инструмента приобретает более мягкий и даже тусклый тембр, при одновременном значительном понижении его громкости. Художественного значения модератор не имеет и, будучи приспособлением, резко ухудшающим режим работы фортепианного механизма и приводящий к расстройкам его регулировки и к износу, лучшими фабриками не применяется.

§ 7. Разница в форме и конструкции рояля и пианино обуславливает разницу их акустических свойств и качеств, выражающуюся прежде всего в различном характере излучения звуковой энергии в окружающее пространство.

В этом отношении рояль представляет очевидные преимущества перед пианино, а именно:

1) так как корпус рояля может быть сделан гораздо большим, чем корпус пианино, то в нем могут быть применены более длинные и массивные басовые струны и большая по площади резонансная дека. Это дает возможность излучения большей звуковой энергии с большей же площади;

2) благодаря крылообразной форме корпуса рояля, расположение басового штега на его деке может быть сделано более правильным и механически рациональным, чем у пианино, где, из-за ограниченности места, басовую подставку приходится помещать слишком близко к краю деки, что уменьшает коэффициент отдачи колебаний струн деке;

3) главная масса звукового излучения, идущая от верхней (передней) стороны деки, плюс излучение струн<sup>2</sup>, в рояле может быть отражена почти на 100% верхней крышкой, подпираемой под углом около 45°, и

<sup>1</sup> Которые в большинстве случаев не используются, а заглушаются переплетением полосками сукна.

<sup>2</sup> Которое хотя и незначительно по интенсивности, но все же вносит в тембр характерную составляющую.

направлена в аудиторию. В пианино этого достигнуть невозможно, так как главная масса излучаемой энергии остается в ящике его корпуса и значительно поглощается передними филёнками. Вследствие этого ни громкость, ни тембр звука пианино не бывают полноценными;

4) нижняя (задняя) поверхность резонансной деки хотя и излучает достаточное количество звуковой энергии, но в пианино она в большинстве случаев не используется, так как обычно в домашней обстановке пианино ставится близко к стене, которая поглощает излучение задней стороны деки. В рояле же, благодаря значительному расстоянию деки от пола и свободному проходу между ножками, излучение с нижней стороны деки может в значительной степени идти в аудиторию, в дополнение к излучению верхней стороны деки и струн. Вследствие этого, слышимое количество и качество звука рояля становится более полноценным;

5) механизм левой педали пианино не сдвигает молотки в сторону, а только приближает их к струнам, уменьшая их размах и живую силу ударов. Поэтому изменения тембра, происходящего от резонирования неударяемой струны, в пианино не получается; в результате играющий на пианино лишен части средств для окрашивания звука.

---

## АРФА

§ 1. Арфа (рис. 25) принадлежит к группе щипковых струнных инструментов, не имеющих грифа, служащего для укорачивания длины действующих струн посредством нажатия их пальцами.

Устройство арфы в основном крайне просто: она представляет собой жесткую и прочную треугольную раму, на двух сторонах которой, параллельно третьей, натянуты многочисленные струны<sup>1</sup> разной длины и толщины, издающие звуки разных высот. Нижняя сторона рамы является резонансным ящиком, служащим для усиления звука струн; он имеет форму конусообразной коробки, со срезанным сверху сегментом, покрытым декой из резонансной ели, в виде удлиненного равнобедренного треугольника, ширина которого увеличивается по направлению к басовым струнам. По средней линии деки с обеих сторон (наружной и внутренней)

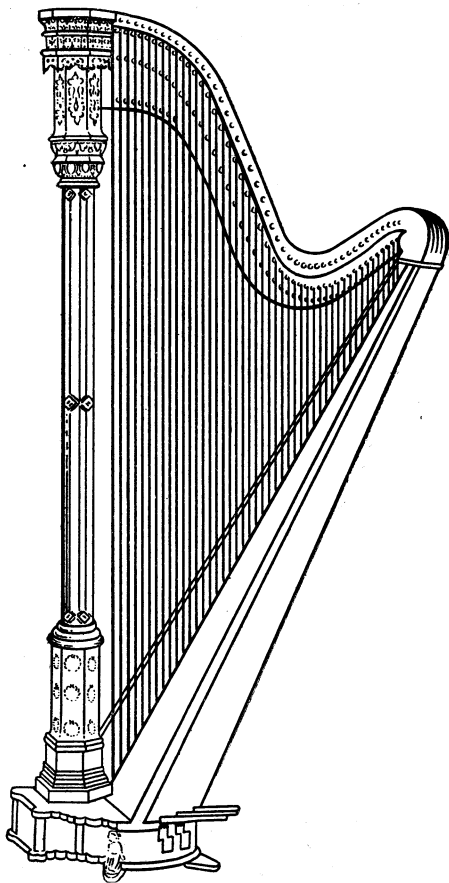


Рис. 25

<sup>1</sup> В современной арфе с двойными педалями—46 струн.

приклеены две продольные деревянные планки, к которым прикреплены нижние концы струн, передающие колебания деки. Для увеличения прочности деки, а также для распространения колебаний по всей ее поверхности на ее нижней половине изнутри приклеены два продольных ребра, симметрично относительно средней линии. При постройке деки преобладающей системой является поперечное расположение волокон дерева, хотя в новейшее время иногда применяют и продольное расположение волокон.

Снизу корпус резонатора снабжен пятью большими овальными отверстиями, для выхода излучаемых резонатором колебаний в атмосферу.

Верхняя сторона рамы современной арфы, делаемая обычно  $\sim$  образно изогнутой, несет на себе, во-первых, порошки и колки, служащие для натягивания струн при их настройке, а во-вторых, — заключенный в особую коробку сложный механизм для изменения высоты звуков, издаваемых струнами. Этот механизм, при нажатии педалей, помещенных в основании рамы арфы, через посредство соединительных тянущих стержней, проходящих внутри трубчатой вертикальной третьей стороны рамы арфы (колонки), приводит в действие систему спаренных дисков с укрепленными на них парами стержней («пальцами»), приходящими при повороте дисков в тесное соприкосновение со струнами и укорачивающими их колеблющиеся части, отчего издаваемые ими звуки повышаются. Этот механизм (рис. 26) устроен так, что когда играющий нажмет ногой какую-либо из семи педалей, опустив ее на одну зарубку в ее от-

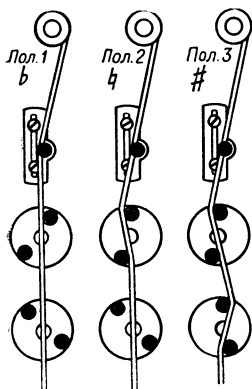


Рис. 26

верстии, то при этом повернутся диски для всех одноименных струн (например, для всех струн «до», или струн «ре» и т. д.) во всех октавах и укоротят эти струны на 0,056 их длины. Тогда звук всех соответствующих струн повысится на полтона. Более глубокое нажатие той же педали, с опусканием ее на две зарубки, приводит в действие вторые, ниже лежащие диски, пальцы которых укоротят все соответствующие струны еще на 0,053 их длины; при этом звук этих струн повысится еще на полтона, а в сумме — на целый тон.

Так как арфа имеет в основе диатонический звукоряд в строе C-dur, то, при однократном нажатии всех семи педалей, все семь ступеней звукоряда во всех октавах повысится на полтона; арфа тогда будет звучать в строе C-dur. Нажатие всех семи педалей на вторую зарубку дает строй Cis-dur.

Комбинируя разные глубины нажатия различных педалей, можно получить все употребительные в современной музыке мажорные и минорные звукояды, а также некоторые септаккорды<sup>1</sup>, которые используются в специфическом для арфы эффекте *glissando*.

§ 2. Извлечение звука на арфе производится оттягиванием струн концами пальцев, с последующим освобождением. Струна тогда начинает совершать свободные, постепенно затухающие колебания. При этом, с целью получения различных оттенков тембра, применяются как различные способы отщипывания, так и разные места отщипывания струн.

Отщипывание струн мягкотью концев пальцев дает меньшую деформацию струн на изгиб и более мягкий, сравнительно бедный гармониками звук. Отщипывание ногтями, вызывая резкую временную деформацию и изгиб струн в точках возбуждения, дает более острый тембр звука, более богатый высокими гармониками.

Отщипывание струны точно посередине, согласно закону Юнга, дает самый бедный гармониками звук (рис. 27). Отщипывание же вблизи конца струны повышает количество гармоник и обогащает тембр.

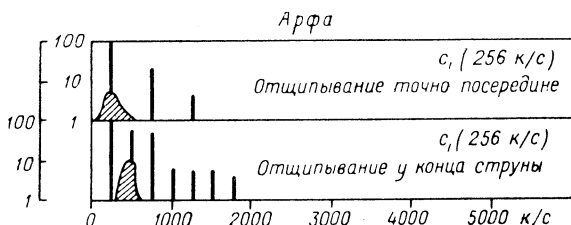


Рис. 27

Бедность звука арфы гармониками объясняется, во-первых, особенностями кишечных струн, применяемых не обвитыми в среднем и высоком регистрах и обвитыми металлической проволокой—в басовом регистре, имеющих малую массу и инерцию, при значительном внутреннем трении; а во-вторых, самым механизмом их возбуждения, при котором палец играющего является частично глушителем колебаний струны в момент ее освобождения. Сравнительно малая, по сравнению с другими струнными инструментами, площадь резонансной деки, а также невозможность применить большие диаметры и более сильное натяжение струн<sup>2</sup> делают звук арфы относительно слабым, хотя он и не лишен некоторой яркости и остроты в момент возбуждения, в особенности в

<sup>1</sup> С удвоением некоторых звуков.

<sup>2</sup> Это привело бы к отрыву резонансной деки от корпуса арфы.

верхнем регистре. Эта острота обуславливается отчасти наличием в звуке арфы небольшого количества шумовых призвуков, характерных для всех щипковых струнных инструментов.

Из особых акустических эффектов на арфе применяется игра октавными флажолетами; при этом к струне на момент слетка прикасаются пальцем или мякотью основания большого пальца, точно в ее середине; одновременно струну отщипывают в какой-либо точке, ближе к одному из ее концов. Получающийся при этом звук лишается своего основного тона, звучит на октаву выше и приобретает особый, несколько смягченный тембр, вследствие ослабления в нем некоторых гармоник.

---

## Глава шестая

### СМЫЧКОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

§ 1. К числу смычковых инструментов современного симфонического оркестра относятся: скрипка, альт, виолончель и контрабас.

Первые три инструмента сходны между собой по форме и отличаются только по величине; что же касается контрабаса, то он отличается от прочих смычковых инструментов не только по величине (он всех их больше), но и по форме. Поэтому, при описании составных частей скрипки, альта и виолончели, можно остановиться на одном каком-либо из трех названных инструментов, например, скрипке, так как все сказанное о скрипке будет, с соответствующими изменениями, приложимо и к альту и к виолончели; описание же контрабаса должно быть дано отдельно.

**А. Скрипка** (рис. 28, 29), состоит из следующих составных частей: корпуса (или кузова), рукоятки и принадлежностей (или прибора).

Корпус скрипки состоит из двух дек, верхней и нижней, называемых также иногда крышкой и дном, которые соединяются между собой бочками или обечайками.

Длина корпуса скрипки (как и остальных смычковых инструментов) установлена чисто эмпирическим путем. Поскольку идет речь о так называемой «полной» скрипке, т. е. скрипке, рассчитанной на взрослого человека, длина ее корпуса варьирует от 35 до 36,5 см. Наиболее распространенная длина корпуса — 35,5 см. или несколько более, что соответствует, если пользоваться мерой, которой пользовались старинные мастера смычковых инструментов, 14 дюймам.

Верхняя дека делается из ели радиального распила<sup>1</sup> и состоит обыкновенно из двух половин, склеиваемых друг с дру-

---

<sup>1</sup> Радиальным распилом называется распил ствола дерева по радиусам, идущим от центра ствола к его окружности.



гом по линии фуги<sup>1</sup>, причем более широкие годовые слои дерева пускаются при этом к краям, а более узкие—к середине (т. е. к линии фуги).

Поверхность деки—не плоская, а выпуклая снаружи и, соответственно, вогнутая изнутри; как говорят, верхняя дека скрипки изготавливается со сводами. Формы сводов и их высота бывают различны, но в общем своды верхних дек скрипок

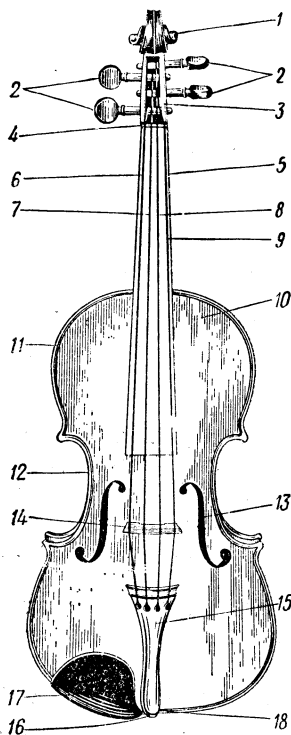


Рис. 28

1—завиток, 2—колки, 3—колковый ящик, 4—верхний порожек, 5—гриф, 6—струна „соль“, 7—струна „ре“, 8—струна „ля“, 9—струна „ми“, 10—верхняя дека, 11—ус, 12—боковой вырез (эс), 13—звуковое отверстие (эф), 14—подставка, 15—подгрифок, 16—пуговица, 17—подбородник, 18—нижний порожек

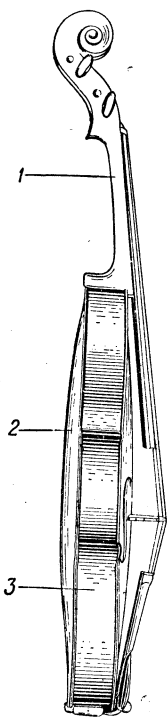


Рис. 29

1—рукоятка, 2—нижняя дека, 3—обечайки

бывают выше в своей средней части и понижаются к краям, около которых переходят в небольшую ложбинку.

В верхней деке прорезаются два звуковых отверстия, называемых «эфами», ввиду их сходства с буквой f. Назначение эфов двоякое: с одной стороны, они служат для сообщения воздушного объема, заключенного внутри корпуса, с наружным воздухом, а с другой,— для того, чтобы сделать среднюю часть деки (так называемую «грудь») более чувствительной к колебаниям, передаваемым корпусу от струн при помощи подставки.

По краям деки врезаются так называемый ус, т. е. три склеенные между собой тонкие полоски дерева, из которых две крайние — черного, а средняя — белого цвета; черные полоски делаются из черного или мореного в

черный цвет дерева, а белая — обыкновенно из клена. Назначение уса: служить украшением инструмента, а также предохранять края деки от излома.

<sup>1</sup> Линией фуги называется линия одного из краев поверхности, подготовленной футанком для склеивания с другой такой же поверхностью.

С нижней стороны верхней деки приклеивается тонкая (миллиметра 4—5) еловая пластинка, называемая пружиной. Назначение пружины — увеличивать сопротивление верхней деки давлению струн, а также увеличивать упругость деки и тем повышать ее резонансные качества.

Толщина верхней деки у хороших итальянских инструментов вырабатывается обыкновенно одинаковой по всей ее поверхности и, в среднем, не превышает 2,5 мм.

Нижняя дека скрипки, по общему правилу, делается из явора радиального распила. Как показал опыт, явор (вид клена) дает наилучшие в звуковом отношении результаты; а кроме того, поверхность его имеет очень красивый рисунок, чего нет у других пород деревьев. Нижняя дека весьма часто делается цельной, но также из двух половин, склеиваемых по линии фуги («елочкой» кверху или книзу).

По своим контурным очертаниям нижняя дека совершенно одинакова с верхней, но своды у нее поднимаются от краев более полого, чем у верхней, а иногда их высота бывает меньше, чем высота сводов верхней деки.

С внутренней стороны нижняя дека — вогнутая, как и верхняя. Ни прорезов, ни пружин на нижней деке не делается.

Около краев на нижней деке, как и на верхней, делается небольшая ложбинка и врезается ус.

Толщина нижней деки — больше, чем у верхней, и вырабатывается эта дека иначе, чем верхняя: она делается толще в своей средней части, где толщина достигает в среднем 4—4,5 мм, и затем постепенно уменьшается к краям, достигая здесь величины 2,5 мм или несколько менее.

Обечайки, или бочки, делаются из того же материала, как и нижние деки, и изгибаются в соответствии с контурами дек, но с тем расчетом, чтобы края последних несколько выступали за наружную поверхность обечайки. Вверху, внизу и в углах обечайки приклеиваются к шести небольшим кускам дерева, называемым стойками (одна—вверху, одна—внизу и четыре — по углам); по краям обечайки оклеиваются с внутренней стороны неширокими полосками дерева 8—10 мм, называемыми обручиками. Стойки и обручики делаются из ели, ольхи или другого какого-либо легкого дерева.

Толщина обечаек—в среднем, около 1,5 мм, а их высота от 30 до 32 мм, причем у итальянских скрипок, начиная от верхних углов, обечайки обыкновенно снижаются со стороны, примыкающей к верхней деке, по направлению к верхней стойке на 1—2 мм.

Рукоятка скрипки делается из целого куска явора.

Головка рукоятки слегка отклоняется назад и оканчивается улиткообразным завитком. В корпусе головки, от на-

чала шейки до начала завитка, выдалбливается так называемый колковый ящик. Сквозь стенки колкового ящика просверливаются четыре круглых отверстия, в которые вставляются колки, по два с каждой стороны.

Длина шейки рукоятки делается с таким расчетом, чтобы, считая от переднего края верхнего порожка до края верхней деки, она равнялась  $\frac{2}{3}$  расстояния от края верхней деки до зарубок эфов. Это дает возможность установить длину звучащей части струны, считая от порожка до подставки. В среднем она равняется у скрипки 330 мм (или несколько менее, что зависит от высоты подставки).

Своей пяткой рукоятка вклеивается в паз, сделанный в верхней части корпуса скрипки, с небольшим наклоном назад и таким образом, чтобы ее верхний край возвышался над плоскостью верхней деки миллиметров на пять.

Скрипичный прибор состоит из следующих частей: колков, верхнего порожка, грифа, подставки, души, подгрифа, нижнего порожка, пуговицы, сурдины и подбородника.

Колков, как уже сказано, четыре; они вытачиваются из черного или другого какого-либо твердого дерева. Для продевания струн в них просверливаются поперечные отверстия.

Верхний порожек представляет собой небольшой брусочек из черного дерева, приклеиваемый около нижнего края колкового ящика поперек шейки и служащий для поддержания струн на известной высоте над поверхностью грифа, а также для определения верхней границы звучащей струны.

Непосредственно к верхнему порожку примыкает гриф, который приклеивается к шейке рукоятки и представляет собой выгнутую пластинку из черного дерева, несколько расширяющуюся к нижнему концу. При игре струны прижимаются к грифу пальцами. «Ладов» на грифе не делается, и музыкант должен уметь ставить пальцы на нужные места, пользуясь слухом и присущим нам мускульным чувством.

Длина скрипичного грифа точно не установлена и всецело зависит от того, какова должна быть высота самого верхнего звука, какой скрипач желает получить на струне «е<sup>2</sup>». Обыкновенно длина грифа—около 27 см.

Подставка (рис. 30) служит для передачи колебаний струн корпусу инструмента и для определения нижней границы звучащей струны.

Подставка делается из клена и имеет вполне определенную форму, которая была окончательно установлена Страдивариусом. Верхний край подставки слегка округлен и несколько снижается по направлению к струне «е<sup>2</sup>». Высота подставки 32—34 мм, при соответствующей высоте верхнего края грифа над декой 17—19 мм; толщина ножек подставки около 3,5 мм, толщина верхнего края—около 1,5 мм.

Душка представляет собой еловую палочку цилиндрической формы, со слегка скошенными в одну сторону краями. Диаметр ее равняется 5—6 мм, а длина зависит от расстояния между поверхностями верхней и нижней дек внутри корпуса инструмента, где она помещается. Место душки — сзади правой ножки подставки, отступив от нее миллиметра на два или несколько более. Точное и наилучшее положение душки заранее определено быть не может: оно находится эмпирически в каждом данном случае. Душка вставляется на свое место, лишь слегка касаясь своими концами поверхностей обеих дек, но, тем не менее, плотно прилегая к ним. Главное назначение душки — создать в корпусе инструмента совершенно новые упругие напряжения, чем то было до ее вставления и, благодаря этому, обусловить иной характер резонирования корпуса и то качество звука, каким характеризуются именно смычковые инструменты с душкой. Кроме того, душка передает некоторую часть колебательной энергии с верхней деки на нижнюю, создавая в последней второй вибрирующий центр корпуса, колеблющийся синхронно и в одинаковой фазе с центральной площадкой верхней деки.

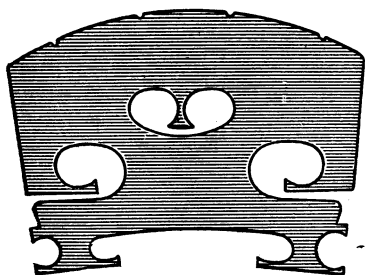


Рис. 30

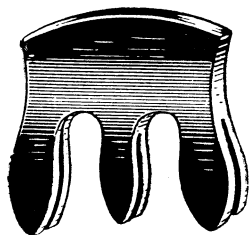


Рис. 31

Сурдина служит для заглушения (уменьшения громкости) звука скрипки и для изменения тембра последнего. Обычно она делается из черного дерева, имеет вид небольшого гребешка с тремя зубьями (рис. 31) и надевается своими зубьями между струнами подставки, для чего зубья соответственно пропиливаются вдоль своей длины.

Подбородник (или так называемая машинка Шпора, по имени ее изобретателя) прикрепляется с помощью особого механизма с левой стороны подгрифа, не касаясь последнего, служит для более удобного держания инструмента подбородком, а также избежания заглушения звука инструмента подбородком, что всегда бывает при игре на инструменте без подбородника. Подбородники бывают различной формы и делаются из черного дерева, эбонита и других материалов.

Смычок (рис. 32) — это круглая или восьмигранная трость из фернамбукового дерева (по крайней мере, в лучших сор-

тах смычков), слегка изогнутая и постепенно утоньшающаяся от одного конца к другому. На более тонком конце этой трости находится головка, а на более толстом — подвижная колодочка, или так называемый эсик, который можно двигать взад и вперед вдоль трости при помощи особого винта и гайки, помещающейся в специально выдолбленном для того углублении на конце трости. В головке и в эсике выдолблены соответствующей величины отверстия, в которых закрепляется волос в виде плоской ленты. До игры волос не имеет натяжения и свободно прилегает к изогнутой части трости; при игре же он натягивается при помощи винта.



Рис. 32

Струны для скрипки в настоящее время обыкновенно употребляются: «e<sup>2</sup>» — стальная, «a<sup>1</sup>» — стальная, обвитая алюминиевой канителью, «d<sup>1</sup>» — кишечная, обвитая алюминиевой канителью, «g» (басок) — кишечная, обвитая серебряной канителью.

Как уже сказано, струны своим нижним концом закрепляются в отверстиях подгрифа, откуда затем они передаются к колкам и продеваются в отверстия последних для последующего закрепления и натяжения, причем по пути к колкам они опираются на верхний край подставки и верхний порожек, где для них делаются небольшие углубления.

Скрипки строятся по чистым квинтам; то же самое следует сказать относительно альты и виолончели, контрабас же обычно строится по чистым квартам.

**Б. Альт и виолончель**, как уже сказано, отличаются от скрипки не своей внешней формой, а главным образом величиной; однако размеры альтов до сих пор не установлены с полной определенностью: встречаются альты и очень небольшого размера (37,5 см) и гораздо большей величины (до 47,5 см). С изменением размеров альты меняются, разумеется, в соответственном отношении и размеры всех составляющих его частей.

Вполне пригодными для игры следует считать размеры альтов по патрону Страдивариуса, длина которых равняется 40—41 см. Так как длина шейки у альтов вычисляется так же, как и у скрипки (она равняется  $\frac{2}{3}$  расстояния от края верхней деки до линии зарубок эфов, т. е., при длине альты в 40 см, равняется 14,6 см), то длина звучащей струны получается при этом вполне пригодной (около 36,5 см) для рук средней, нормальной величины.

В звуковом отношении такие альты также дают вполне удовлетворительные результаты. Струны для альтиков обыкновенно употребляются: «a<sup>1</sup>» — кишечная или стальная, обвитая алюминиевой канителью, «d<sup>1</sup>» — кишечная, обвитая алюминиевой канителью, «g» и «с» — кишечные, обвитые серебряной канителью.

В противоположность альтам, размеры виолончели — вполне определенные, и притом в общем те самые, какие были установлены Страдивариусом. Длина корпуса виолончели обыкновенно равняется 75 см, т. е. почти вдвое больше, чем длина корпуса скрипки. Почти в таком же отношении находятся и все другие размеры корпуса виолончели, за исключением обечаек, высота которых равняется 12 см (т. е. почти вчетверо больше высоты обечаек у скрипки).

Для удобства игры в пуговице виолончели просверливается отверстие, в которое вставляется шпиль, служащий опорой при игре на этом инструменте. Длина звучащей струны у виолончели определяется в общем так же, как и у скрипки, но иногда шейка несколько удлиняется (вместо 27,3 см делается равной 29 см), и тогда длина звучащей струны также соответственно увеличивается, достигая 71 см (при высоте подставки около 10 см).

Струны для виолончели употребляются только кишечные: «a» и «d» — простые, «G» и «C» — обвитые.

**В. Контрабас** (рис. 33). Длина его корпуса достигает 110—111 см. От прочих смычковых инструментов рассматриваемой группы он отличается, с одной стороны, тем, что в своей верхней части корпус его имеет не закругленную, а стрелообразную форму, наподобие старинных виол, с другой же, — тем, что нижняя дека у него не выпуклая, а плоская.

А так как у контрабаса очень толстые струны и давление их на корпус инструмента весьма значительно, то его нижняя дека подкрепляется для прочности четырьмя еловыми накладками (пружинами), идущими поперек всей деки от обручиков до обручиков. Из этих пружин самая большая третья, находящаяся под душкой, так как здесь корпус испытывает наибольшее давление струн.

Вместо одиночных колков у контрабаса употребляется

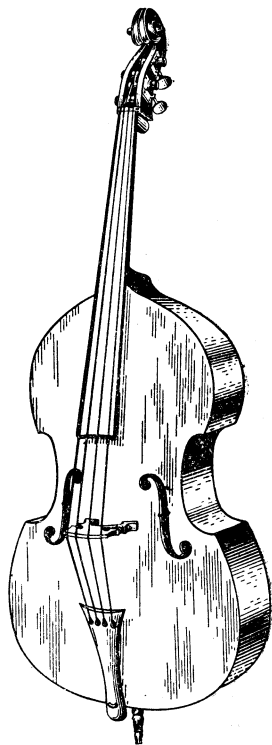


Рис. 33

колковая механика: струны контрабаса очень толсты, и было бы трудно натягивать при помощи обыкновенных колков.

Длина звучащей струны контрабаса определяется так же, как и у прочих смычковых инструментов.

Струны для контрабаса употребляются только кишечные: «G» и «D» — простые, «A<sub>1</sub>» и «E<sub>1</sub>» — обвитые.

При игре на контрабасе, как и при игре на виолончели, пользуются шпилем.

§ 2. Все смычковые инструменты представляют собой сложные звуковые системы, состоящие из двух основных звукообразующих частей: звучащей (вибрирующей) струны, в качестве источника звука, и резонирующего корпуса, усиливающего звуки колеблющейся струны путем приведения корпуса в вынужденные колебания соответствующей частоты.

Звуки колеблющейся струны, как таковые, слишком слабы, чтобы ими можно было пользоваться для музыкальных целей. Поэтому у всех струнных музыкальных инструментов и существуют различного рода резонансные коробки (кузовы, корпуса), которые усиливают звуки, издаваемые колеблющимися струнами, и притом не одни только какие-либо определенные звуки, а любые звуки; т. е. корпуса являются не единичными, а множественными резонаторами.

Колебания струн передаются корпусу инструмента через подставку, а также отчасти через шейку, так как струна колеблется на всем протяжении между подставкой и верхним порожком или местом прижима струны пальцем к грифу.

Для лучшего резонирования корпуса смычковых инструментов необходимо, чтобы он находился в состоянии упругого напряжения. Это достигается двояким способом: во-первых, тем, что внутри корпуса между деками вставляется так называемая «душка», а во-вторых, тем, что с левой стороны верхней деки, на ее внутренней поверхности, приклеивается с некоторым натяжением «пружина». Первоначальное назначение душки и пружины чисто механическое: увеличивать сопротивление верхней деки давлению струн, но обе они выполняют также и только что указанную весьма важную для акустики смычковых инструментов функцию.

§ 3. Звук из смычковых инструментов извлекается при помощи смычка, но иногда также при помощи щипка (при игре *pizzicato*) или удара по струнам тростью смычка (при игре *col legno*).

Самый процесс звукообразования происходит при этом следующим образом. При движении натертых канифолью волос смычка поперек струны, легкоплавкая канифоль, вследствие нажима волос, слегка размягчается и становится липкой. Поэтому волос пристает к струне и начинает оттягивать ее от положения равновесия вправо или влево, в зависимости от движения смычка вниз или вверх. Но такое оття-

гивание продолжается лишь до тех пор, пока сила упругости струны не становится больше силы сцепления между струной и волосом смычка. Когда наступает указанный момент, то струна отрывается от волоса смычка и начинает скользить вдоль волоса, стремясь прийти в свое первоначальное положение. Тогда волос вновь захватывает струну, в определенный момент струна опять отрывается от волоса, и т. д. В результате струна совершает поперечные колебания, соответствующие периоду ее собственных колебаний, и начинает звучать, издавая звук определенной высоты.

Что касается двух других способов возбуждения звука, то пользование тростью смычка, как орудием для удара по струнам (игра *col legno*), употребляется очень редко и применяется лишь для получения специальных звуковых эффектов. Игра же *pizzicato*, т. е. при помощи щипка, довольно широко применяется и на смычковых инструментах в подражание щипковому, причем употребляется *pizzicato* как правой, так и левой рукой.

§ 4. Звучащая струна заставляет резонировать корпус смычкового инструмента. Но она встречает при этом не безразличную среду, а сложную акустическую систему, обладающую собственными колебаниями. Поэтому, между двумя звукообразующими элементами смычковых инструментов (звучащей струной и резонирующим корпусом) должно происходить определенное взаимодействие, выражающееся в том, что частотный ряд колебаний струны налагается на частотный ряд резонирующего корпуса, в результате чего из колебаний струны выделяются некоторые частоты, которые и определяют характер ее звучания, ее тембровые качества.

Отсюда—первая проблема акустики смычковых инструментов, проблема изучения их тембра. Причем, так как, согласно сказанному выше, каждый смычковый инструмент представляет собой сложную систему, состоящую из колеблющейся струны и резонирующего корпуса, то мы должны будем рассмотреть указанную проблему в двух направлениях: 1) с точки зрения влияния на тембр смычковых инструментов особенностей колебаний струн и 2) с точки зрения влияния на их тембр структурных особенностей их корпуса.

С другой стороны, совершенно ясно, что каждый смычковый инструмент является излучателем звуковой энергии в окружающую среду и что количество этой энергии будет, очевидно, тем больше, чем сильнее колеблются струны, чем энергичнее резонирует корпус смычковых инструментов и чем больше объем резонирующего корпуса.

Интенсивность этой звуковой энергии, излучаемой смычковыми инструментами, будет восприниматься нами, как громкость звука, а потому проблема громкости звука смыч-



ковых инструментов является второй основной проблемой акустики смычковых инструментов.

§ 5. Тембр смычковых инструментов зависит в первую очередь от характера колебаний их струн.

При рассмотрении этого вопроса нужно иметь в виду материал, из которого сделаны струны, их толщину, способ возбуждения струн и место приложения и направления возбуждающей колебания струн силы.

С изменением материала струн меняется и тембр звуков инструмента. Так как натянутые кишечные струны менее упруги, чем стальные, то при колебании они разделяются на меньшее число частей, а следовательно, дают меньшее число высоких частичных тонов, чем стальные; поэтому, кишечные струны звучат менее ярко, чем стальные, но в то же время мягче и приятнее стальных, тембр которых значительно острее, но зато ярче.

Толстые струны труднее делятся при звучании на части, чем тонкие; поэтому тембр толстых струн менее ярк, чем тембр более тонких струн, которые легче делятся на части и могут дать при звучании большее число высоких частичных тонов, чем толстые струны.

Как мы уже знаем, возбуждение струн производится тройным способом: при помощи волоса смычка, при помощи щипка пальцами и при помощи удара по струнам тростью смычка.

В первом случае тембр струн зависит от места приложения смычка и от направления его ведения.

Обыкновенно смычок ведут на расстоянии  $1/9$  или  $1/10$  части звучащей струны, считая от подставки, где и образуется, так сказать, нормальный тембр смычковых инструментов. Если же смычок приближать к подставке или, наоборот, отодвигать от нее по направлению к грифу, то тембр струн будет при этом значительно изменяться. По мере приближения смычка к подставке все сильнее и сильнее будут звучать высокие частичные тоны, и у самой подставки, при так называемой игре *sul ponticello*, тембр струн примет своеобразный свистяще-металлический характер. По мере же приближения смычка к грифу, высокие частичные тоны будут все более и более выпадать, а более низкие усиливаться, в результате чего тембр струн будет становиться все более простым, и при игре *sulla tastiera* (над грифом) он будет слегка напоминать тембр звуков флейты. Обыкновенно оба только что названных способа игры на смычковых инструментах специально отмечают в музыкальных произведениях и, например, в самом начале 9-го каприза Паганини стоит: «*sulla tastiera, imitando il flauto*», т. е. «над грифом, подражая флейте».

Тембр звучащих струн смычковых инструментов очень сильно зависит также от того, ведется ли смычок перпендикулярно к струнам или под углом к ним. Только в первом случае можно получить вполне безукоризненный по качеству звук инструмента; при наклонном же ведении смычка к поперечным колебаниям струн примешиваются продольные, которые вызывают нечто вроде свиста, что ухудшает тембр звука, и это ухудшение происходит в тем большей степени, чем более косо движется смычок. Если в некоторых случаях, для получения того или другого художественного эффекта, косым ведением смычка и можно пользоваться, то делать это в виде общего правила рекомендовать нельзя.

Что касается тембра струн при игре *pizzicato* и *col legno*, то и в том и в другом случае он совершенно иной, чем при пользовании волосом смычка, так как при этом значительно сильнее выдвигаются более высокие частичные тоны, более же низкие отступают на задний план.

§ 6. Особое место при игре на смычковых инструментах занимают так называемые «флажолеты». Флажолеты можно получать при всех способах извлечения звука из струн смычковых инструментов, но они применяются только при игре смычком, так как только в этом случае они звучат достаточно ярко.

Употребляются двоякого рода флажолеты: натуральные и искусственные.

Для получения натуральных флажолетов следует, во время ведения смычка по струнам, слегка прикоснуться пальцем в одной из точек струны, в которых она может разделиться на 2, 3, 4, 5 и т. д. частей.

Теоретически говоря, можно получить любое число натуральных флажолетов, но на практике здесь все зависит от длины и толщины струн: чем струна длиннее и тоньше, тем легче получить на ней флажолеты, — и наоборот. Поэтому Паганини, который широко пользовался флажолетами при игре на скрипке, употреблял более тонкие струны, чем то делается по общему правилу.

Обыкновенно на смычковых инструментах пользуются флажолетами, звучащими не выше 5-й или 6-й гармоника, так как более высокие гармоники получить очень трудно и звучат они мало удовлетворительно.

Искусственные флажолеты, по существу, ничем не отличаются от натуральных и называются так только потому, что при их образовании верхний порожек заменяется пальцем, прижимающим струну в той или другой точке грифа.

В таком случае, если четвертым пальцем слегка коснуться струны в точках, где ее звучащий отрезок (от точки прижима пальцем до подставки) делится на 2, 3, 4 и т. д. частей, то и получатся соответствующие искусственные флажо-

леты от данного тона, возникшего вследствие прижатия струны пальцем к определенной точке грифа. Так, например, если первым пальцем прижать струну «g» на скрипке в том месте, где получается звук  $c^1$ , то, слегка прикоснувшись четвертым пальцем к точке, где струна делится на две части, можно получить флажолетный тон  $c^2$ ; если коснуться пальцем струны в том месте, где она делится на 3 части, то можно получить так называемый квинтовый флажолет  $g^2$ , и т. д.

Очевидно, что, если верхний палец передвигать по хроматическим ходам, то и флажолетные тоны будут располагаться в хроматическом порядке, например:  $g^2$ ,  $gis^2$ ,  $a^2$ ,  $ais^2$  — и т. д. Ввиду этого искусственные флажолеты представляют собой для музыкантов большие преимущества, чем натуральные, хотя они и не звучат так ярко, как последние.

Из искусственных флажолетов наиболее удобны для исполнения квартовые; поэтому, они и употребляются наиболее часто. Наиболее неудобны октавные, так как они требуют очень большого растяжения пальцев. Как натуральные, так и искусственные флажолеты имеют для музыкантов двоякое значение: с одной стороны, они служат для расширения диапазона смычковых инструментов, потому что путем флажолетов можно получить тоны такой высоты, какие на грифе получить нельзя, а с другой, — они являются одним из средств получения новых иначе недостижимых тембровых оттенков.

§ 7. Гораздо большее влияние на тембр смычковых инструментов оказывают акустические особенности их корпуса.

Корпус смычковых инструментов трансформирует тембр звучащих струн (что уже было отмечено в § 4), в зависимости от своих акустических особенностей.

Как указал на это еще Савар в начале XIX века, главнейшую роль в акустике смычковых инструментов играет высота настройки их корпуса, т. е. высота основного тона последнего, которую можно определить или путем выстукивания корпуса в средней его части, или путем вдувания струи воздуха в один из эфов.

Но самая настройка корпуса смычковых инструментов, при прочих равных условиях (считая в том числе и физико-механические свойства дерева), зависит, с одной стороны, от величины воздушного объема, заключенного внутри корпуса инструмента, а с другой, — от толщины образующих его дек.

Высота настройки корпуса бывает различна для различных смычковых инструментов и опять-таки в среднем та же, какую мы находим у классиков-кремонцев.

Для скрипки основной тон корпуса был указан уже Саваром и определен им, как  $c^1$  по физическому строю (т. е. в 256 колебаний в сек.). Более точные позднейшие исследования этого вопроса показали, что у различных хороших итальянских скрипок основной тон их корпуса колеблется между  $h$

(малой октавы) и  $c^1$  (при нормальной высоте бочков 30—32 мм и высоте сводов 15—16 мм).

При такой именно настройке корпуса скрипки и получается нормальный скрипичный тембр. Если основной тон инструмента понижается (например, становится  $b$  малой октавы), то тембр его меняется, приобретая оттенок более свойственный альту, чем скрипке, и инструмент «альтит» тем сильнее, чем ниже становится настройка его корпуса. Наоборот, если основной тон инструмента повышается, например, становится  $cis^1$ , то звук инструмента приобретает слишком «открытый» характер, становится как бы беднее красками, и это обнаруживается тем больше, чем выше настройка корпуса инструмента.

Корпус альтов обыкновенно бывает настроен в  $a$  (малой октавы); но такую настройку следует считать очень высокой, и именно такой высокой настройкой объясняется тот хорошо известный альтистам факт, что альты звучат слишком «по-скрипичному». Если принять во внимание, что альты строятся на чистую квинту ниже скрипок, то основной тон их должен быть, по крайней мере,  $f$  (малой октавы); если же иметь в виду диапазон голоса контральто, то и еще ниже, например,  $e$  или даже  $d$  малой октавы.

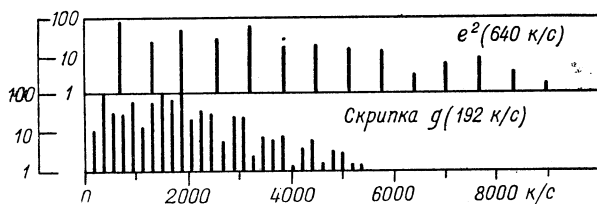


Рис. 34

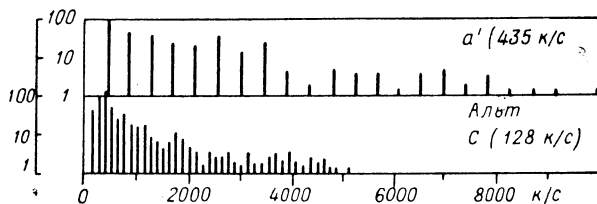


Рис. 35

Основной тон корпуса виолончели бывает обыкновенно  $F$  или  $G$  большой октавы. Если иметь в виду более баритональный характер инструмента, то такую настройку можно считать вполне приемлемой; если же иметь в виду более басовый тембр инструмента, то основной тон корпуса придется понизить до  $E$  или  $D$  большой октавы.

§ 8. Исследования Э. Мейера показывают, что в спектрах пустых струн смычковых инструментов (рис. 34, 35, 36 и 37) наблюдается уменьшение числа гармоник по мере повы-

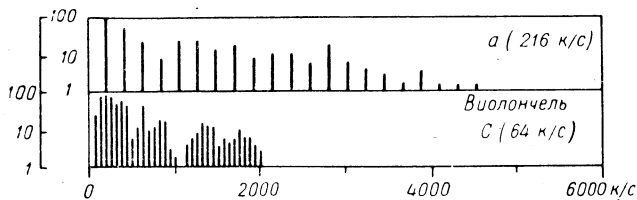


Рис. 36

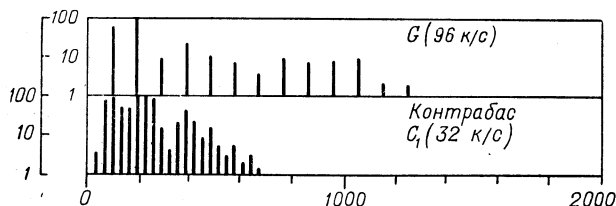


Рис. 37

шения звука: у скрипки—от 28 до 14, у альты—от 40 до 23, у виолончели—от 32 до 21 и у контрабаса—от 21 до 13. Характерной особенностью спектров нижних звуков является слабость или почти полное отсутствие основного тона, который достигает у скрипки 10% от силы 2-й гармоники, у альты—50% от силы 3-й гармоники, у виолончели — около 25% от силы 2—3—4-й гармоник и у контрабаса—всего около 3% от силы 2—3-й и 6—7—8-й гармоник. Эта слабость или даже почти полное отсутствие основного тона в спектрах звуков нижних струн объясняется тем, что, имея величину, малую по сравнению с длиной волны основного тона этих струн, корпус инструментов не способен заметно резонировать на эту низкую частоту, а поэтому и не способен излучать ее в окружающее пространство.

Заметно влияют на количество гармоник физические качества струн смычковых инструментов; так например, у контрабаса, вследствие толщины и грубости его струн, количество гармоник сильно уступает прочим смычковым инструментам.

Любопытно также отметить, что у спектра нижнего звука альты («с») замечается некоторое сходство конфигурации со спектром гобоя (рис. 61); оно связано, повидимому, с некоторой гнусавостью звука альты.

На существование формант у хороших смычковых инструментов указывают две диаграммы спектров пустых струн

альта Андрея Гварнери и виолончели Монтаньяны (рис. 38 и 39).

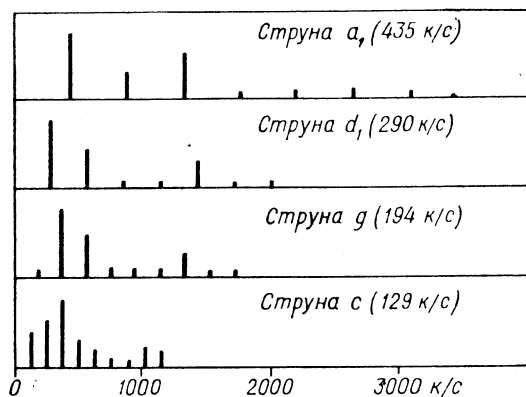


Рис. 38

Из них видно, что форманты обоих инструментов лежат на довольно низком уровне—около 400—500 к/с. Кроме того, эти спектры намекают на существование второй форманты, лежащей около 1 400 к/с, т. е. на расстоянии верхней дуодецимы от первой, главной форманты.

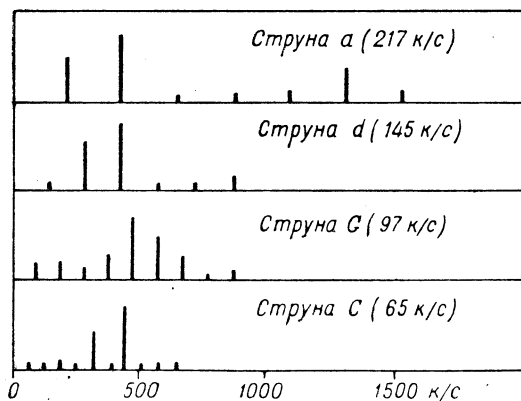


Рис. 39

Бакгауз, исследовав резонансные характеристики скрипок, дает интересную сравнительную диаграмму распределения

энергии колебаний для четырех скрипок разного качества (рис. 40).

Из нее видно, как главная форманта, лежащая у скрипки Страдивариуса между 3 200 и 4 200 к/с, передвигается у другого старого итальянского, но не столь высококачественного инструмента в область 2 800—3 400 к/с; у хорошей современной скрипки она лежит между 2 500—3 200 к/с, а у плохой фабричной скрипки она спускается еще ниже—в область 2 200—2 800 к/с.

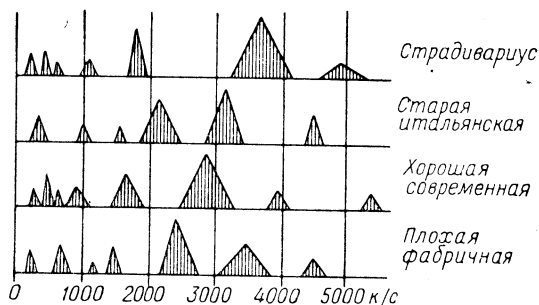


Рис. 40

§ 9. Среди музыкантов до сих пор весьма распространен взгляд, что обыгрывание, т. е. продолжительная игра на инструменте, является средством улучшения качества его звука; однако в пользу этого взгляда, в сущности, никем не было приведено сколько-нибудь веских оснований. Плохая скрипка, сколько на ней ни играть, от этого не улучшится, хорошая же скрипка звучит хорошо, хотя бы на ней и не играли совершенно. Когда Вильом в 1855 г. приобрел у Таризио (известного собирателя итальянских смычковых инструментов) почти совершенно новую, неигранную скрипку Страдивариуса, ставшую потом известной под именем «Мессии», и попробовал ее тон, то оказалось, что инструмент звучит очень хорошо, хотя она и не подвергалась никакому обыгрыванию. «Этот инструмент,—говорит Вильом,—струн которого смычок не касался в течение более полутора лет, прошедших с момента его построения, блестяще опровергает мнение, согласно которому свободный и чистый звук на скрипке можно получить только после обыгрывания, так как в этом новом инструменте соединялись все качества хорошего инструмента—сила, мягкость, округленность, острота, легкость вибрации, тон замечательный, благородный, проникающий».

Все дело не в том, подвергался ли инструмент обыгрыванию или нет, а в том, правильно или неправильно он построен: для правильно построенной скрипки никакого обыгры-

вания не нужно, для неправильно же построенной оно бесполезно. Правильно же построенным смычковым инструментом следует считать такой, у которого основной тон корпуса имеет надлежащую высоту, а все составляющие корпус части — надлежащие, установленные главным образом на опыте старинных итальянских мастеров, размеры.

§ 10. В соответствующей литературе очень мало затрагивается вопрос об утомлении смычковых инструментов, но наличие самого факта не подлежит сомнению. Всякий строительный материал, в том числе и дерево, испытывая постоянное напряжение, в особенности, если при этом в качестве сопровождающего момента происходят динамические воздействия на него (например, толчки), рано или поздно начинает «утомляться», т. е. упругость его уменьшается и способность сопротивляться деформациям все более и более падает, в результате чего материал все более и более становится непригодным к отправлению своих функций (например, деревянная балка может прогнуться или, в крайнем случае, подвергнуться излому).

То же самое, в той или другой мере следует сказать и по поводу дек скрипок и вообще смычковых инструментов. Скрипичные деки несут в течение долгого времени не только довольно большую нагрузку, обуславливаемую натяжением струн, но и испытывают в то же время значительные динамические воздействия, как от колебания струн, так и от различного рода нажимов смычка на струны, причем за последнее время нагрузка от натяжения струн значительно увеличилась ввиду повышения настройки камертона (см. приложение), как равным образом возросли динамические воздействия от нажимов смычка на струны, вследствие развития виртуозной игры на инструменте. Сюда же следует отнести привычку некоторых скрипачей «выжимать» тон из скрипки, что еще более увеличивает давление струн и силу толчков от нажимов смычка.

Все это, взятое вместе, не может не отражаться крайне неблагоприятно на упругости корпуса инструмента. Инструмент мало-помалу начинает «утомляться», причем звук его все более и более делается глухим и тусклым; в конечном итоге инструмент становится совершенно непригодным для игры, по крайней мере, для игры, какая требуется от современного артиста-виртуоза.

Явление утомления смычковых инструментов распространено гораздо более, чем это, быть может, думают. Большинство старинных смычковых инструментов уже давно пережило эпоху своего расцвета, не исключая и таких мастерских произведений искусства, как скрипки Страдивариуса и Гварнери дель Джезу, и в настоящее время находятся в поре



беспорного увядания, кроме весьма немногих, лучше других сохранившихся инструментов.

Утомление смычковых инструментов наступает тем скорее и тем в большей степени, чем больше играют на инструменте, чем сильнее на нем натяжение струн и чем «напористее» пользуется смычком музыкант. Поэтому играющие на смычковых инструментах и обладающие ценными экземплярами таковых должны очень бережно обращаться со своими инструментами и никоим образом не пользоваться ими для ежедневных и продолжительных упражнений, так как это может без нужды и ранее времени утомить их инструменты и ценные экземпляры превратить в экземпляры малоценные и непригодные для виртуозной игры. Сарасате даже на репетициях не пользовался своим «Страдивариусом», заменяя его хорошей копией инструмента; это — пример, заслуживающий всяческого подражания.

§ 11. Среди музыкантов, играющих на смычковых инструментах, весьма часто говорят о так называемом «итальянском тоне», об итальянском тембре, который будто бы является наилучшим и характерным именно для итальянских смычковых инструментов.

Мы напрасно, однако, старались бы получить на этот счет какие-либо более конкретные и более точные указания. Кроме общих утверждений, вроде, например, таких, что «итальянский тон» отличается мягкостью, округлостью, соединенной с известной остротой, сходством с человеческим голосом и т. п., ничего иного по этому поводу, по существу, мы не получим. Но в этом и нет ничего удивительного, так как тембр итальянских инструментов отличается крайним разнообразием, и даже среди инструментов одного и того же мастера едва ли можно найти два таких, тембр которых ничем не отличался бы один от другого. Скрипки Страдивариуса, построенные до эпохи расцвета его творчества, отличаются иным качеством звука, чем скрипки, относящиеся к названному периоду; равным образом, скрипки, построенные им под конец жизни, звучат иначе, чем скрипки периода расцвета.

§ 12. Проблема громкости звука смычковых инструментов до сих пор разработана очень мало. Вполне определенно можно лишь утверждать, что каждый смычковый инструмент может дать свой максимум громкости, после чего возрастание давления смычка на струны никакого влияния на увеличение громкости инструмента не оказывает; громкость звука после указанного момента остается постоянной.

## Глава седьмая

### ДУХОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

§ 1. Звучащим телом в духовых музыкальных инструментах является наполняющий их объем воздуха, приходящий в колебание под влиянием специального возбудителя. Специфической особенностью каждого духового музыкального инструмента является твердая оболочка для звучащего объема воздуха, которую и называют самим инструментом.

Так как инерция столба воздуха, заключенного в оболочке духового инструмента, весьма мала, то, несмотря на большую упругость воздуха, затухание единичного колебания совершается с большой быстротой. Поэтому возбужденное одиночным импульсом колебание воздуха в полости духового инструмента может произвести на нас впечатление короткого толчка с слабым тональным призвуком, не более. Чтобы духовой музыкальный инструмент начал издавать музыкальный звук, нужно подводить к нему энергию в течение более или менее продолжительного времени, в форме сжатого под некоторым давлением воздуха, и тогда, при определенных условиях, в наполняющем духовой инструмент объеме воздуха возникает длительный, автоколебательный процесс, результатом которого мы воспринимаем, как музыкальный звук.

Такой автоколебательный процесс можно охарактеризовать, как подведение к звучащему объему воздуха энергии в форме правильно следующих друг за другом ритмических импульсов, приобретающих множественный характер, подобно тому, как это мы наблюдаем, например, при возбуждении струн смычкового музыкального инструмента трением волос смычка.

Малая величина инерции наполняющего оркестровые духовые инструменты объема воздуха приводит к почти мгновенному затуханию звука в тот момент, когда подведение энергии к музыкальному инструменту прекращается. Только в исключительно больших по объему тридцатидвухфутовых (32') органнх трубах затухание звука длится заметные для

слуха доли секунды, равно как и при начале вдувания в них воздуха проходит некоторая доля секунды, прежде чем столб воздуха в трубе раскачается и начнет издавать звук.

Современные оркестровые духовые инструменты, имея достаточно малый объем наполняющего их воздуха, обладают практически мгновенной «отзывчивостью»<sup>1</sup>, увеличивающейся по мере уменьшения величины инструмента и массы возбудителя звуковых колебаний.

Форма объема воздуха, заключенного в полости духового музыкального инструмента, оказывает большое влияние на его отзывчивость и на качество его звука. Путем многовекового опыта человек пришел к употреблению для музыкальных целей удлиненных столбов воздуха, заключенного в трубки призматического, цилиндрического, конического, экспоненциального, гиперболического или параболического профиля<sup>2</sup>. Такие удлиненные столбы воздуха легче и правильнее резонируют, поддерживая возникающий автоколебательный процесс, и в то же время в большей или меньшей степени обладают способностью одновременно с основным тоном или же в качестве самостоятельных звуков давать производные колебания высших кратных периодов (гармоники). Использование гармоник, как самостоятельно звучащих тонов, дало возможность увеличить количество извлекаемых из инструмента звуков и расширить его диапазон по направлению вверх.

§ 2. По способу возбуждения оркестровые духовые музыкальные инструменты можно разделить на две основные категории:

а) свистящие инструменты, в которых возбуждение звука происходит в результате трения движущейся с некоторой скоростью воздушной струи о край твердого тела (губу или лабиум)<sup>3</sup> и

б) язычковые инструменты, в которых возбуждение звука происходит в результате ритмических изменений,

<sup>1</sup> Отзывчивостью мы называем способность инструмента начинать издавать звук через минимально короткое время после начала подведения к нему энергии.

<sup>2</sup> В то время, как у призматических и цилиндрических труб площадь их сечения по всей длине остается постоянной, в других профилях поперечник трубы ( $d$ ) изменяется по следующим формулам:

а) коническая труба —  $d_x = d_o + ax$

б) экспоненциальная (показательная) труба —  $d_x = d_o \cdot a^x$

в) гиперболическая труба —  $d_x = \frac{a}{x + b} + c$

г) параболическая труба —  $d_x = d_o + ax^n$

<sup>3</sup> Отсюда другое название этих инструментов — лабиальные.

возникающих в струе воздуха, вдуваемого в канал инструмента. Эти изменения создаются посредством особого ритмически действующего клапана, помещенного на пути воздушной струи.

Другими словами, свистящие или лабиальные инструменты мы можем отнести к категории инструментов с газообразным возбудителем звука, в то время как язычковые инструменты следует отнести к категории инструментов с твердым возбудителем звука.

Смотря по форме и устройству возбудителя, язычковые инструменты разделяются на две группы:

1) собственно язычковые инструменты имеют возбудитель в виде одиночного или парного язычка, т. е. упругой удлиненной пластинки, укрепленной при ее основании и свободной на противоположном конце. Если язычок одиночный, то он обычно лежит над краями отверстия, через которое вдувается в инструмент воздух; если язычки двойные, то своими свободными концами они прилегают друг к другу, образуя в состоянии покоя щель для прохода воздуха.

При продувании воздуха язычки приходят в колебание, периодически изменяя площадь отверстия для пропуска воздуха в канал инструмента, начиная от некоторого максимального значения и почти до нуля. В результате такого периодического неравномерного пропуска воздуха, в канале язычкового духового инструмента возникают попеременные сгущения и разрежения воздуха, рождающие стоячую звуковую волну. Аналогичная звуковая волна, колебания которой противоположны по фазе колебаниям в канале инструмента, возникает в том объеме воздуха, который находится в резервуаре, накапливающем его в сжатом состоянии<sup>1</sup>.

2) инструменты с воронкообразными мундштуками<sup>2</sup> язычков не имеют; функцию язычков берут на себя особым образом сложенные, натянутые и сближенные краями губы играющего, которые он прикладывает к углубленному устью канала инструмента. При продувании воздуха, последний, насильственно раздвигая щель между губами, приводит их в колебание, результатом чего является периодическое увеличение или уменьшение площади щели между губами, а следовательно, и периодическое изменение количества поступающего в канал инструмента воздуха.

<sup>1</sup> Трубопроводы, мехи, дыхательные пути человека.

<sup>2</sup> Термин предложен Н. А. Гарбузовым. Следует иметь в виду, что инструменты с воронкообразными мундштуками в обычной музыкальной практике часто называются также амбушюрными инструментами (этот термин был применен в 1-м издании настоящего учебника). Это название до некоторой степени указывает на исключительно важную роль для звукообразования в этих инструментах амбушюра, т. е. особым способом сложенных губ музыканта.

Таким образом, действие губ играющего сходно с действием двойных язычков, с той только разницей, что губы являются мягкими массивными язычками перепончатого типа. Возникающие вследствие действия губ периодические сгущения и разрежения воздуха рожают в канале инструмента звуковую волну; аналогичное ей колебательное движение, но с противоположной фазой, возникает одновременно в дыхательных путях играющего человека.

Исходя из этого, мы должны рассматривать духовые инструменты с газообразным возбудителем (т. е. свистящие или лабиальные), как двойные связанные акустические системы: возбудитель+колебательный процесс в резонирующей надставке.

Все же духовые инструменты с твердым возбудителем (т. е. языковые и амбушюрные инструменты) мы должны рассматривать, как тройные связанные акустические системы: колебательный процесс в резонирующей надставке+возбудитель+колебательный процесс в резервуаре с запасным воздухом.

Усложнение системы во втором случае вызывает большую сложность колебательного процесса у языковых и амбушюрных инструментов, что приводит к большей сложности спектра их звуков, по сравнению с звуками лабиальных инструментов.

---

## ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ТЕЛ

§ 1. Исследования процессов, происходящих во время звукообразования в духовых музыкальных инструментах, приводят к заключению, что основной причиной возникновения звуковых колебаний в наполняющем духовой музыкальный инструмент объеме воздуха и в окружающей его атмосфере является изменение скорости движения воздуха, вызванное столкновением воздушной струи с находящимся на ее пути твердым телом.

Возникновение звуковых колебаний при подобных обстоятельствах можно наблюдать в окружающей нас действительности, как, например, в гудении телеграфных проводов при сильном боковом ветре, в свисте бича при рассекании им воздуха и т. п.

Явление, сходное с гудением телеграфных проводов, уже издавна использовано человеком в своеобразном музыкальном инструменте — эоловой арфе, представляющей рамку с натянутыми на ней струнами, которая ставится на пути дуящего ветра<sup>1</sup>. При движении воздуха мимо струн, последние приходят в колебания, частота которых меняется в зависимости от скорости ветра, увеличиваясь при ее возрастании.

Исследования процессов обтекания потока газа или жидкости вокруг стоящего на пути цилиндрического тела показывают, что за этим телом возникают вихревые явления (рис. 41). Если цилиндрическое тело, являющееся препятствием, может в известных пределах изменять свое положение, то, при некоторой скорости потока, образующиеся вихревые движения увлекают это тело, и оно начинает совершать колебательные движения в плоскости, перпендикулярной к направлению движения потока.

<sup>1</sup> Для улучшения действия эолову арфу обычно снабжают двумя широкими раструбами, концентрирующими воздушный поток и направляющим его на струны.

Это явление мы можем наблюдать, погружая палку в быстрый поток воды; при этом возникают сильные поперечные колебания палки, чувствуемые рукой.

Прилагая данные этого опыта к эоловой арфе, мы видим, что струны последней также колеблются преимущественно в плоскости, перпендикулярной к направлению ветра. При этом струна может совершать колебания не только со своей основной частотой; увеличение скорости ветра заставляет ее совершать более частые колебания, причем она разделяется на несколько частей, колеблющихся с частотами ее гармоник.

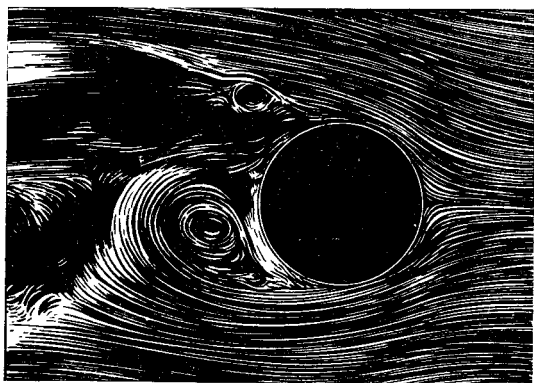


Рис. 41

В свою очередь, устанавливающиеся периодические колебания струны влияют организующим и ритмизирующим образом на возникновение вихрей вокруг нее, которые таким образом становятся также периодическими.

В результате образования вихрей, в потоке возникают периодические изменения скорости, вызывающие появление местных сгущений и разрежений, а это, в свою очередь, ведет к появлению в нем звуковых волн.

Точные исследования происходящих при этом явлений обнаруживают следующую зависимость:

$$\frac{V}{nd} = \text{const.}$$

где  $V$  — скорость воздушного потока,  
 $n$  — число колебаний струны и  
 $d$  — ее диаметр.

Отсюда  $n = \frac{kV}{d}$ , т. е. частота возникающих колебаний струны прямо пропорциональна скорости потока.

В случае эоловой арфы мы имеем движение свободного потока атмосферного воздуха по отношению к находящемуся на его пути твердому телу. Аналогичные же явления возникновения вихревых движений и связанных с ними звуковых колебаний наблюдаются и в случае движения твердого тела в неподвижном воздухе, например, при рассеивании его бичом. Качественная и количественная стороны явления от этого не меняются.

§ 2. Останавливая внимание на явлениях, сопровождающих звукообразование у свистящих музыкальных инструментов (флейта, свирель, органные трубы), мы видим здесь следующие компоненты, участвующие в звукообразовании:

1) источник силы, вызывающий движение воздушной струи;

2) приспособление для ее регулирования и направления;

3) твердое тело, входящее во взаимодействие с воздушной струей, и

4) резонансная надставка, регулирующая и ритмизирующая процесс звукообразования.

В случае употребляемой в настоящее время поперечной оркестровой флейты мы имеем в качестве источника, вызывающего движение воздушной струи, механизм дыхательного аппарата человека. При этом полость легких, дыхательного горла, бронх и их разветвлений, гортани, носоглотки и рта является резервуаром, в котором накапливается нужный для звукообразования воздух, а сила мышц диафрагмы, грудной клетки, лица и шеи—тем источником энергии, который вызывает превышение давления этого запаса воздуха над атмосферным давлением и побуждает его поэтому, при открывании губ, с большей или меньшей скоростью выходить наружу.

Приспособлением для регулирования и направления воздушной струи являются губы музыканта, а также его язык, кончик которого играет роль вспомогательного клапана, дающего возможность открывать щель между губами и закрывать ее.

Твердым телом, входящим во взаимодействие с выходящей из рта музыканта воздушной струей, является край бокового отверстия в стенке головки флейты.

Наконец, самый корпус флейты, представляющий в ее современной конструкции цилиндрическую трубку<sup>1</sup>, закрытую вблизи отверстия для вдувания воздуха твердой пробкой, открытую на противоположном конце и снабженную многочисленными боковыми отверстиями, является той резонансной надставкой, которая регулирует процесс звукообразования.

Исследование явлений, возникающих в струе газа или жидкости, вытекающих с некоторой скоростью из узкого отверстия или щели, показыва-

---

<sup>1</sup> Т. е. системы Теобальда Бема; в флейте старого типа канал имел коническую форму, причем его диаметр уменьшался по направлению к выходному концу.



ют, что здесь также возникают вихревые движения (рис. 42). Наблюдения, сделанные Каррьером над моделями органных труб, показали, что в воздушной струе, выходящей из щели трубы, при столкновении



Рис. 42

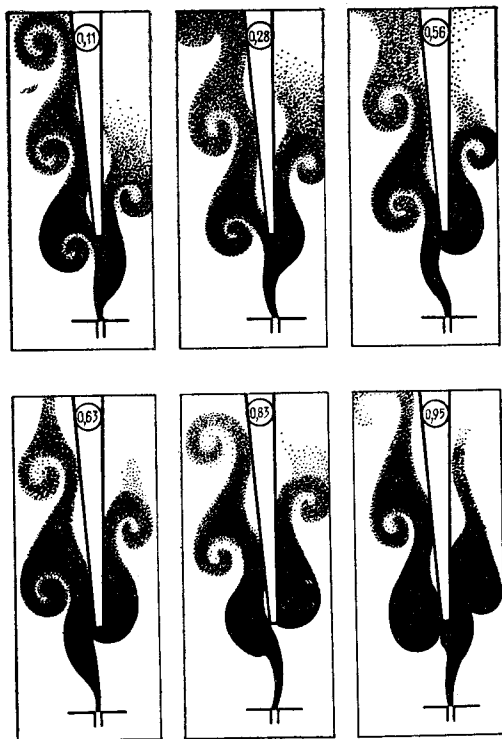


Рис. 43

ее с губой или «лабиумом» трубы, в связи с происходящим при этом трением и изменением скорости, также возникают вихреобразные движения, распространяющиеся двумя потоками по обе стороны от твердого тела (рис. 43)

В результате возникновения этих вихрей, в струе воздуха появляются периодические изменения скорости движения, а следовательно, и связанные с этим местные сгущения и разрежения, ведущие к возникновению звуковых колебаний.

В действительности удается получить тон определенной высоты, направляя поток воздуха с некоторой постоянной скоростью на край твердого тела, отстоящего от отверстия на определенном расстоянии. Исследование таких «краевых тонов» (как их назвал Ричардсон) привело к следующему простому выражению:  $n = \frac{U}{l}$ ,

где  $n$  — число колебаний в получаемом звуке,

$l$  — расстояние между возникающими в струе вихрями (в частном случае  $l = f_0$ ).

$U = aV$ , т. е.  $U$  есть величина, прямо пропорциональная скорости истечения  $V$ , причем  $a$  есть константа, зависящая от природы газа.

Другими словами  $V: n f_0 = \text{const}$ .

Если  $f$  остается постоянным, а  $V$  постепенно увеличивается, то вместе с тем соответственно увеличивается и  $n$ , пока  $V$  не достигнет приблизительно двойной величины против первоначальной. Тогда, после периода некоторой неустойчивости звука, последний вдруг сразу перескакивает на октаву вверх. Произойдет так называемое «передувание», при котором столб воздуха в резонаторе разделится на две колеблющиеся части. При дальнейшем увеличении можно получить следующее передувание, сопровождаемое дальнейшим частичным тоном — дуодецимой, и т. д., до известного предела, определяемого формой резонатора и обстановкой опыта.

Музыкант, играющий на современной оркестровой флейте, использует происходящие при этом вихревые явления таким образом, что, играя низкие звуки, он дует в амбужное отверстие сравнительно слабо, с умеренной или даже с небольшой скоростью. При желании извлечь более высокие звуки, например, во второй или третьей октавах диапазона флейты, он несколько суживает щель между губами и усиливает вдвухание воздуха, увеличивая таким образом  $V$ . При этом он получает, путем передувания, желательную ему высшую гармонику (2, 3 или 4). Явление передувания может быть наглядно выражено на следующей диаграмме (рис. 44), где

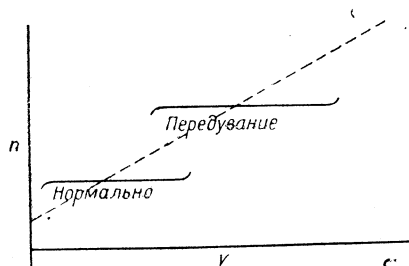


Рис. 44

пунктирная линия показывает увеличение  $V$ , а сплошные кривые линии — высоты соответствующих получаемых при этом звуков. Мы видим, что при некоторой величине  $V$  могут одновременно существовать условия, благоприятные для двух гармоник; выбор той или иной из них зависит от некоторых условий, определяемых музыкантом (например, различные комбинации закрытых и открытых боковых отверстий).

Анализ вышеприведенных формул, определяющих общие условия для возникновения «краевых» тонов, приводит еще и к тому заключению, что, по мере повышения частоты колебаний у лабиальных (свистящих) музыкальных инструментов, сила их звука должна возрастать. Эта зависимость подтверждается на практике и хорошо известна всем играющим на свистящих музыкальных инструментах. Низкие звуки на них имеют малую силу, и музыкант не может давать на них  $f$  и  $f'$ ; наоборот, звуки высшей октавы их диапазона всегда сильны и пронзительны, и на этих звуках невозможно получить  $p$  и  $pp$ . В особенности резко эта особенность выражена в флейте-пикколо, а также у инструментов со свистковым мундштуком (свирель, флажолет и т. п.).

У язычковых и амбушюрных инструментов, благодаря наличию промежуточного воздушного клапана, влияющего на количество поступающего в канал инструмента воздуха, такое соотношение силы звука с высотой выражено не ясно, и иногда даже наблюдается обратное соотношение. (Подробности см. ниже, в соответствующих §§ руководства.)

При игре на флейте Пана мы имеем сходные, но несколько более простые условия звукообразования. При сохранении тех же условий использования человеческого дыхательного аппарата и способа направления губами струи воздуха на края трубочек флейты, приемом передувания здесь обычно не пользуются. Скорость воздушной струи остается приблизительно постоянной, или колеблется в сравнительно небольших границах. Как правило, из каждой трубочки этой флейты, закрытой на нижнем конце глухой перегородкой или пробкой, извлекается только один основной звук, высота которого определяется длиной трубки и заключенного в ней столба воздуха.

§ 3. Законы колебания воздушных столбов всего легче и удобнее могут быть изучены на органных трубах. Будучи по условиям звукообразования родственными флейтам и являясь также свистящими духовыми музыкальными орудиями, органные трубы имеют следующее устройство.

В основном корпус органной трубы имеет, как это показывает само ее название, вид и форму более или менее длинной трубки, круглого или призматического (обычно квадратного или прямоугольного) сечения (рис. 45).

В нижней части трубы имеется трубчатая ножка А, по каналу которой в трубу вдувается воздух. Последний попадает в нижнюю камеру трубы В, а оттуда выходит плоской ленточной струей через щелеобразное отверстие С. Выходящая из С струя воздуха, встречаясь с острым краем губы D, делится этим краем на два потока и выходит частично в окружающую атмосферу через окно Е в стенке трубы, частично же попадает в канал трубы F.

По описанному ранее, в результате столкновения с губой D, выходящей из С струи воздуха, в последней возникают ритмические вихревые движения, вследствие появления «краевого тона»; в этом случае возникает так называемая связанная акустическая система, так как краевые

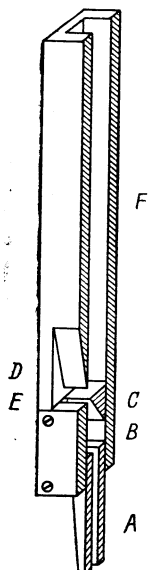


Рис. 45

тоны, рождающиеся у губы трубы, взаимодействуют с натуральными резонансными частотами столба воздуха, заключенного в канале трубы  $F$ . Другими словами, звук свистящей органной трубы является вообще одним из возможных краевых тонов, определяемых расстоянием  $CD$  (высотой губы), давлением подаваемого в трубу воздуха и длиной резонансной насадки. Это значит, что заключенный в канал трубы  $F$  объем воздуха, имея определенные геометрические размеры и обладая соответствующей последним собственной частотой колебаний, приходит в возбуждение и принудительным образом регулирует частоту образования воздушных вихрей у губы  $D$ , а следовательно, и связанных с ними периодических сгущений и разрежений воздуха. Возникшая в результате такого взаимодействия звуковая волна распространяется вдоль канала трубы  $F$ . Дойдя до конца трубы, волна отражается обратно и таким образом в полости трубы возникает стоячая звуковая волна с определенным периодом колебаний, т. е. с определенной высотой тона.

Пока в полость трубы подводится через щель  $C$  поток сжатого воздуха, в трубе существует устойчивый автоколебательный режим, быстро прекращающийся в момент прекращения подачи воздуха.

В зависимости от устройства органной трубы, процесс возникновения стоячей звуковой волны протекает различным образом.

**А. Закрытые трубы.** Если мы имеем органную трубу, закрытую твердой стенкой или пробкой на конце, противоположном окну  $E$  (рис. 46), то образование стоячей волны в ней происходит в следующем виде.

Возникающая у окна  $E$  пучность рождает волну, которая доходит, при постепенном падении амплитуды колебаний скорости частиц и одновременном увеличении амплитуды колебаний давления, до верхней перегородки  $G$ , отражается от нее и возвращается к окну  $E$ . При этом у  $G$  возникает узел волны, характеризующийся максимальным изменением давления воздуха; у окна  $E$  остается пучность колебаний, характеризующаяся минимальным изменением давления воздуха, при среднем значении, равном атмосферному давлению. Таким образом, длина верхней камеры трубы будет равна приблизительно  $1/4$  длины волны того звука, который соответствует ее основному тону, т. е.

$$L = \lambda_1 : 4$$

При усилении вдвухания воздуха, в особенности если поперечник трубы мал сравнительно с ее длиной, а высота губы



Рис. 46

(т. е. окна Е) незначительна, вслед за периодом некоторой неустойчивости звука наступает момент передувания. Вместо основного тона труба начинает издавать дуодециму от него, являющуюся вторым частичным тоном этой трубы.

Исследование происходящего при этом колебательного процесса показывает, что, кроме сохраняющегося у закрытого конца трубы G узла колебаний, в ее канале появляется еще второй узел G<sub>1</sub> (рис. 47), расположенный на расстоянии 1/3 длины канала от окна Е. Соответственно этому, в промежуточной точке Е<sub>1</sub> появляется вторая пучность, а длина трубы и длина волны получающегося звука будут находиться в следующем отношении:

$$L = 3\lambda_2 : 4$$

При дальнейшем усилении вдвухания мы можем получить следующие частичные тоны: 3-й, 4-й и т. д. (рис. 48 а и б). Во всех этих случаях у закрытого конца трубы G сохраняется узел колебаний, а в канале трубы появляются дополнительные узлы G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> и т. д., а в промежуточных точках Е<sub>1</sub>, Е<sub>2</sub>, и т. д.— дополнительные пучности колебаний. При этом соотношения

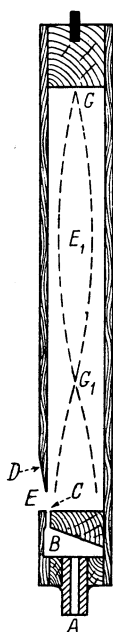


Рис. 47

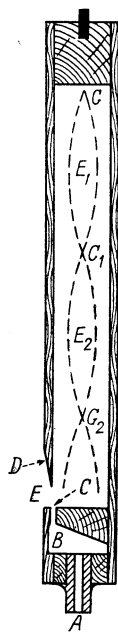


Рис. 48а

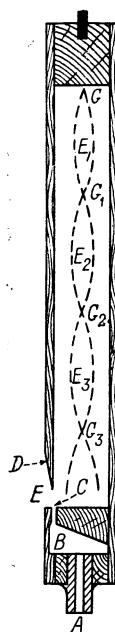


Рис. 48б

длины волны получающихся звуков и длины трубы выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} L &= 5\lambda_3 : 4 \\ L &= 7\lambda_4 : 4 \\ L &= 9\lambda_5 : 4 \end{aligned}$$

и т. д.

Отсюда могут быть выведены:

1. Первый закон звучания органных лабиальных труб: — закрытая лабиальная труба дает основной тон, длина волны которого равна учетверенной длине верхней резонирующей части трубы.

2. Второй закон: — при передувании закрытая лабиальная труба дает только нечетные гармоники от ее основного тона.

Наблюдения показывают, что чем уже канал закрытой трубы, тем легче извлекаются высокие номера ее гармоник и тем менее устойчивым становится ее основной тон. При употреблении очень узкой и длинной трубы основной тон может даже отсутствовать.

И наоборот: короткие и широкие закрытые трубы, например, приближающиеся по форме к кубу, шару и т. п., могут издавать только основной тон и извлечь из них тоны передувания становится невозможным. При этом тембр такой трубы вообще становится бедным обертонами; практически, кубическая труба дает только основной простой (синусоидальный) тон.

**Б. Открытые трубы.** Несколько иначе протекают звуковые и колебательные процессы в органных лабиальных трубах, открытых на противоположном от вдувания конце.

У последнего не может образоваться узел, так как этот конец открыт и давление при выходе из трубы равно атмосферному. Вследствие этого вблизи открытого конца трубы всегда образуется пучность.

Исследование колебательного процесса в трубе, издающей при сравнительно слабом вдувании свой основной тон, показывает (рис. 49), что в этом случае у окна Е и у выхода Е<sub>1</sub> находятся пучности, в которых колебания воздуха совершаются в противоположных фазах. Посередине между точками Е и Е<sub>1</sub>—в точке F находится узел колебаний.

При этом открытая труба той же длины, как закрытая, дает звук на октаву выше последней, а длина ЕЕ<sub>1</sub> резонирующей части трубы будет равна  $L = \lambda_1 : 2$ .

При усилении вдувания воздуха, после периода некоторой неустойчивости звука, происходит передувание, выражающееся в том, что звук с основного тона перескакивает на октаву вверх. В этом случае (рис. 50) звуковая волна в трубе располагается так, что, кроме двух пучностей у окна и у выхода из трубы, посередине между ними располагается третья пучность Е<sub>2</sub>, а в промежуточных точках F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub>—узлы

колебаний. При этом в точках  $E$  и  $E_2$  колебания будут находиться в одинаковой фазе, а в точке  $E_1$ —в противоположной. Длина трубы будет находиться в следующем соотношении с длиной волны полученной гармоникой:  $L = 2\lambda_2 : 2 = \lambda_2$ .

При дальнейшем усилении вдвухания наступают моменты второго, третьего и т. д. передуваний. Соответственные тоны будут 3, 4, 5-й и т. д. гармониками от основного звука трубы. При этом столб воздуха в канале трубы разделяется на все большее число участков, колеблющихся в противоположных фазах, но на крайних точках (т. е. у окна и у выхода) всегда останутся пучности (рис. 51 а и б).



Рис. 49

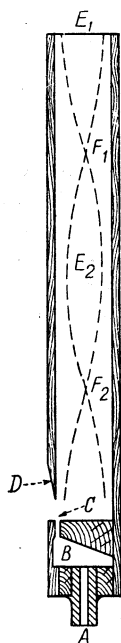


Рис. 50

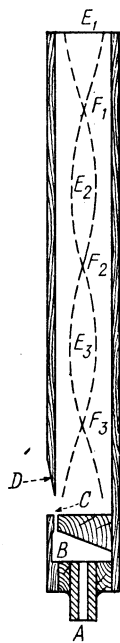


Рис. 51а

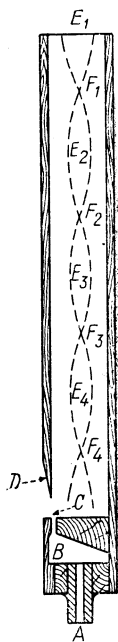


Рис. 51б

Отношение поперечника трубы к ее длине, т. е. мензура, как и в рассмотренном ранее случае закрытой трубы, обуславливает большую или меньшую легкость передувания. Узкие и длинные трубы легко дают высокие номера гармоник, при неустойчивости или даже невозможности извлечения основного тона; короткие и широкие трубы дают преимущественно бедный обертонами основной тон и трудно или вовсе не поддаются передуванию.

Из всех опытов с открытыми лабиальными трубами вытекает:

3. Третий закон звучания органных труб: — открытая лабиальная труба дает основной тон, длина волны которого равна удвоенной длине верхней резонирующей части трубы, а также

4. Четвертый закон: — при передувании открытая лабиальная труба дает полный ряд гармоник от основного тона.

Явления передувания и изменения высоты тона в лабиальных трубах и других духовых музыкальных инструментах, кроме усиления вдвухания в них воздуха, можно вызвать также следующим способом: так как при звучании основного тона в открытой лабиальной трубе на середине ее длины образуется узел колебаний, характеризующийся максимальной амплитудой изменения давления, то достаточно в этом месте создать условия, препятствующие образованию узла, чтобы волна разделилась пополам и труба стала издавать тон на октаву выше. Этого можно достичь, просверлив в стенке трубы на середине ее длины маленькое отверстие (рис. 52); устанавливая сообщение полости трубы с атмосферой, это отверстие лишает возможности образования узла, и в этом месте возникает пучность. В результате происходит дробление столба воздуха пополам и возникновение на расстояниях  $1/4$  и  $3/4$  длины трубы двух узлов, т. е. акустическая картина, соответствующая первому передуванию при усилении вдвухания, описанному выше.

Просверливая отверстие на расстоянии  $1/3$  или  $2/3$  длины трубы, мы вызовем разделение волны на три части и появление 3-й гармоники, и т. д.

Подобным же образом, просверливая отверстие в закрытой трубе на расстоянии  $2/3$  длины от окна Е, мы также вызовем образование в этом месте пучности волны и, как следствие, погашение основного звука и появление второго частичного тона, т. е. дуодецимы от основного звука.

В некоторых органах употребляется регистр «flûte octaviante», представляющий набор открытых лабиальных труб, с просверленными в их стенках боковыми дырочками на половине их длины. Вместо основного тона эти трубы дают вторые гармоники, т. е. звучат на октаву выше нормальных открытых лабиальных труб той же длины.

Просверливание небольшого отверстия в пробке, закрывающей конец закрытой органной трубы, также приводит к невозможности образования в этом месте узла колебаний. Колебательный процесс нарушается, и труба превращается по своим свойствам в «открытую» трубу, но однако не сразу.

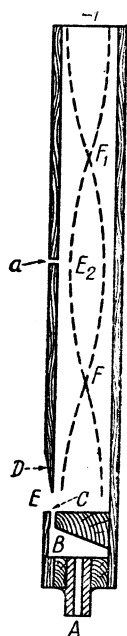


Рис. 52



Если отверстие очень мало, то колебательный процесс в трубе становится неустойчивым и извлечение звука определенной высоты становится невозможным; только начиная от некоторой достаточной площади отверстия, труба будет издавать тон при вдувании. При этом сначала этот тон звучит ниже нормы, соответствующей открытой трубе той же длины, и лишь при постепенном увеличении площади отверстия и приближении ее к площади сечения канала трубы, тон ее постепенно повышается и доходит до нормальной высоты, свойственной открытым трубам той же длины. Труба при этом проходит последовательно стадии закрытой, полуоткрытой и вполне открытой трубы. Из них только первая и последняя стадии, характеризующиеся вполне устойчивым колебательным режимом, могут находить применение для музыкальных целей.

Все сказанное об органах трубах в полной мере приложимо и к разнообразным свистковым музыкальным инструментам (дудки, сопилка, свирель, флажолет и др.), мундштучная часть которых по конструкции весьма близка к лабиальным органным трубам.

В них также имеется направляющее струю воздуха приспособление в виде щели, расположенной против грани амбушюрного отверстия, соответствующей окну и губе органной трубы. И только в качестве источника энергии для получения сжатого воздуха здесь используется не воздухоудный механизм, но дыхательный аппарат человека. Условия же для передувания здесь несколько сужены, чем при игре на оркестровой поперечной флейте, так как в последнем случае музыкант может одновременно изменять и скорость вдувания, и форму и сечение воздушной струи. В свистковых же инструментах форма и площадь поперечного сечения струи воздуха остается всегда неизменной, а меняется только скорость истечения воздуха из щели.

§ 4. Выше было указано, что длина лабиальной трубы и длина волны ее основного тона связаны довольно простой зависимостью. В основном, длина волны тона, издаваемого трубой, прямо пропорциональна ее длине, или же частота колебаний звука лабиальной трубы обратно пропорциональна ее длине.

Поэтому, чтобы повысить звук трубы (без пользования передуванием), нужно уменьшить ее длину, и наоборот.

Практически такой способ управления высотой звука духовых музыкальных инструментов очень удобен и осуществляется следующим образом:

1. В органе, где какие-либо механизмы для извлечения из одних и тех же труб звуков разной высоты не применяются; для каждого регистра<sup>1</sup> имеются наборы геометрически-подобно и по возможности из одинакового материала построенных труб разных размеров, по количеству труб равные числу клавиш обслуживающей их клавиатуры. Каждая клавиша

<sup>1</sup> Регистрами в органе называются группы звуков сходного тембра.

включает отдельную трубу определенной длины, издающую звук соответствующей высоты.

2. Большинство применяемых человеком свистящих и язычковых духовых музыкальных инструментов представляет собою трубки, имеющие в своих стенках большее или меньшее число просверленных отверстий, которые при игре могут в разных комбинациях закрываться пальцами или клапанами. Открывание отверстий в стенке духового музыкального инструмента изменяет длину его воздушного столба, укорачивая ее в большей или меньшей степени, по сравнению с длиной такой же трубки, но не имеющей боковых отверстий, и таким образом повышает тон, издаваемый инструментом.

Кроме того, некоторые из таких отверстий, будучи расположены на соответственных местах трубки инструмента, облегчают передувание и получение тонов высших частот (гармоник) и их производных.

3. В большинстве духовых инструментов с воронкообразным мундштуком применяется иной механизм для изменения высоты звуков. В известных точках канала инструмента<sup>1</sup> помещаются клапаны, ведущие в боковые ответвления, vyplненные в форме петлеобразных трубок. Обычно эти клапаны не включают указанные ответвления, и звуковая волна идет по каналу инструмента напрямик, кратчайшим путем. Только при приведении в действие механизма клапанов, последние включают боковые ответвления, отчего длина канала инструмента увеличивается, а высота всех звуков его натуральной гаммы соответственно понижается.

4. В некоторых лабиальных инструментах, например, в так называемой цуг-флейте, применяется подвижной поршень, скользящий по каналу и изменяющий его длину, а следовательно, и высоту звука.

5. Наконец, в некоторых инструментах (тромбон, цуг-флейта) применяется раздвижное устройство трубки, также позволяющее плавно изменять длину канала инструмента, а следовательно, и высоту всех издаваемых им звуков.

Изменение формы изгиба канала духового музыкального инструмента, как показывают теоретические исследования и опыты, оказывает влияние на частоту колебаний заключенного в нем воздушного столба. А так как в каждом изгибе канала увеличивается трение и сопротивление распространению воздушной волны, то в этих местах частота колебаний и связанная с ней высота звука понижаются. Однако, как показала практика строительства духовых музыкальных инструментов, изгибы их трубок, если они не особенно многочисленны и имеют достаточный радиус кривизны, не оказывают заметного влияния на высоту звука, издаваемого трубой данной длины. Практически это влияние, даже в самых сложно изогнутых духовых инструментах<sup>2</sup>, в сумме так ничтожно, что при расчете инструментов им вполне можно пренебречь.

<sup>1</sup> Обычно в начальном, узком участке его канала.

<sup>2</sup> Как например, контрафагот и большинство инструментов с воронкообразными мундштуками.

§ 5. Измеряя открытые лабиальные трубы и эквивалентные им свистящие, язычковые и амбушюрные инструменты, мы находим, что длина действующего в них столба воздуха всегда бывает несколько меньше половины длины волны их основного тона. То же самое соотношение, т. е. меньшую длину столба воздуха против четверти длины волны основного тона, мы находим в закрытых лабиальных трубах и эквивалентных им музыкальных инструментах.

Кроме того, сравнивая аналогичные инструменты со столбами разного поперечника, мы обнаруживаем, что разница их теоретической и фактической длины в известной степени пропорциональна их поперечнику.

Наконец, сравнивая длины волн звуков, полученных посредством открывания боковых отверстий, с расстоянием от точки возникновения звукового колебания до центров соответствующих отверстий, мы также находим, что длины волн всегда будут больше фактических расстояний на инструменте, причем величина этой разницы будет пропорциональна разности между диаметром канала инструмента и диаметром соответствующего бокового отверстия.

Как показывают исследования, все эти отклонения длины инструментов от элементарного теоретического расчета являются следствием взаимодействия между заключенным в корпусе инструмента воздушным столбом и окружающей его атмосферой. Здесь первым фактором является то, что стоячая воздушная волна, устанавливающаяся внутри инструмента во время его звучания, всегда выходит своими концами за пределы инструмента на участках некоторой протяженности и объема и вступает в окружающую инструмент атмосферу, отдавая ей при этом часть колебательной энергии, распространяющейся далее в форме сферических звуковых волн. Если бы этого выхода части волны из инструмента в атмосферу не было, мы не восприняли бы звука этого инструмента.

Второй фактор состоит в том, что при передаче энергии от стоячей волны, образовавшейся внутри инструмента, в окружающую его атмосферу, т. е. из ограниченного твердыми стенками корпуса инструмента объема в неограниченный и бесконечно больший объем воздуха, происходит частичное поглощение последним звуковой энергии, вместе с торможением и некоторой потерей скорости колебательного движения частиц воздуха. В результате совместного влияния этих двух факторов происходит некоторое уменьшение частоты колебаний, а следовательно, и некоторое понижение звука<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Это уменьшение частоты колебательного движения не следует смешивать с потерей скорости поступательного движения воздушного потока в канале инструмента в целом; уже на небольшом расстоянии от конца инструмента последняя становится почти равной нулю.

В зависимости от поперечника выходного отверстия, выходящая из канала инструмента масса колеблющегося воздуха вступает во взаимодействие с разной площадью атмосферного воздуха; чем больше эта площадь, тем больше тормозящее и поглощающее энергию влияние атмосферы и тем больше удлинится волна и понижается звук инструмента.

Отсюда ясно, что понижающее влияние выходного конца инструмента является функцией его поперечника.

Различные ученые теоретически вычисляли величину сопротивления атмосферы выступающей в нее из инструмента звуковой волне, или акустический импеданс<sup>1</sup> выходного конца, и дали формулы, определяющие величину необходимого укорачивания длины канала инструмента, по сравнению с длиной волны его основного тона. С другой стороны, многие мастера духовых инструментов и органов стремились практически, опытным путем установить величину поправки длины духового музыкального инструмента.

Приведем некоторые из найденных поправок.

а) Магийон (Mahillon) дает для цилиндрической открытой с обоих концов трубки, в которую вдувают воздух навстречу краям одного из концов, следующую формулу:

$$L = L_0 - D,$$

где  $L$ —фактическая длина трубки,  $L_0$ —длина полуволны даваемого ею звука ( $\lambda : 2$ ) и  $D$ —диаметр трубки. При этом он указывает, что эта формула справедлива только для тех трубок, длина которых превышает поперечник по крайней мере в восемь раз и более.

б) для таких же трубок, но закрытых на противоположном от вдувания конце, Магийон дает формулу:

$$L = \frac{L_0}{2} - 0,5D$$

Для лабиальных органных труб и свистков, где на нижнем конце имеется стенка, частично перегородившая канал трубы, а окно находится сбоку, получаются иные формулы.

в) Так например, известный французский органный мастер Кавайе-Колль (Cavaillé-Coll) дал следующие формулы: для открытых труб призматического сечения:

$$L = L_0 - 2P,$$

где  $P$ —глубина трубы, считая от окна до противоположной стенки, и для открытых цилиндрических труб:

$$L = L_0 - 1,67D$$

г) Что касается длины духовых инструментов с воронкообразными мундштуками, то, вследствие криволинейности профиля выходного участка их канала (раструба), Магийон не мог вывести единой достаточно точной формулы для определения поправки их длины.

<sup>1</sup> От латинского *impedio*—мешаю, препятствую. Это есть отношение между приложенным давлением и полученной скоростью воздушного потока. Величина акустического импеданса зависит от вязкости газа и частоты колебаний.

Наши же исследования на большом числе разнообразных инструментов этого типа дали возможность найти формулу:

$$L = L_0 - \left( \frac{D + D_1}{2} + l \right),$$

позволившую с высокой степенью точности рассчитывать длину канала этих инструментов, независимо от их величин и характера мензуры<sup>1</sup>, при условии выполнения конечного участка раструба инструментов по гиперболическому профилю.

В тех духовых инструментах, которые имеют боковые отверстия, расчет длины волны и высоты основного тона еще больше усложняется.

Так например, наличие в головке флейты, вблизи от закрывающей канал пробки, отверстия для вдувания воздуха (амбушюрного отверстия) влияет на акустическую длину столба воздуха по следующей, выведенной Магийном, практической формуле:

$$L = L_0 - 2D + d_0,$$

«где  $D$  — диаметр канала флейты, и  $d_0$  — диаметр амбушюрного отверстия.

При этом наимыгоднейшее расстояние от пробки до центра амбушюрного отверстия должно быть равно:

$$0,5D - 1,0D,$$

при каковом положении пробки обертоны, даваемые флейтой при передувании, будут звучать верно.

Если мы имеем на флейте ряд боковых отверстий с диаметром  $d_1$ , то следующая практическая формула дает возможность достаточно точно рассчитать расстояния между центром амбушюрного отверстия и центром любого из боковых отверстий:

$$L = L_0 - [D + (D - d_0) + (D - d_1)] = L_0 - 3D + (d_0 + d_1)$$

Расчет значительно усложняется для конических флейт.

Расчет языковых инструментов с цилиндрическим и коническим каналами является более сложной задачей, не разрешимой средствами элементарной акустики и математики. Поэтому мы его не приводим.

Толщина стенок трубки духового инструмента, если он имеет боковые отверстия, вносит существенные осложнения в вышеприведенные элементарные расчеты. Здесь оказывает сильное влияние изменение проводимости боковых отверстий, которая равна

$$K = \frac{\pi d^2}{4l},$$

где  $d$  — диаметр отверстия, а  $l$  — его высота, т. е. толщина стенки.

Так как проводимость и импеданс являются величинами обратно-пропорциональными<sup>2</sup>, то очевидно, что увеличение толщины стенок инструмента пропорционально увеличивает и импеданс данного бокового отверстия. А это приводит к тому, что увеличение толщины стенки у ам-

<sup>1</sup> Подробнее см. XI главу этого отдела.

<sup>2</sup> Следующая формула показывает нам это соотношение:

$$Z = \frac{\omega p}{k},$$

где  $z$  — импеданс (акустическое сопротивление),  $\omega = 2\pi n$  ( $n$  — частота колебаний) и  $p$  — плотность газа.

Другими словами, после подстановки:  $Z = \frac{8nlp}{d^3}$

бушюрного отверстия понижает основной тон инструмента и затрудняет его образование, а увеличения толщины стенки у бокового пальцевого отверстия, помимо понижения соответствующего звука, придает ему слабость и неустойчивость<sup>1</sup>.

Влияние боковых отверстий, при достаточной толщине стенки, сказывается во время игры еще и в том, что в то время, как каждое открытое отверстие уменьшает импеданс столба воздуха и сокращает длину волны, каждое закрытое отверстие, вследствие находящегося под ним столбика воздуха и поглощения колебательной энергии поверхностью пальцев или подушкой клапана, оказывает обратное действие. По мере увеличения площади отверстия, соответствующее влияние его усиливается.

Кроме того, замечено, что это двойное влияние открытых и закрытых боковых отверстий сказывается тем сильнее, чем ближе данное отверстие к пучности соответствующей звуковой волны. По мере увеличения расстояния от нее в обе стороны, влияние это быстро убывает.

Понижающее влияние закрытых боковых отверстий легко устанавливается опытом. Например, нами было однажды замечено, что трубка кларнета, до просверливания боковых отверстий, дала основной звук (е) примерно на полтона выше, чем тогда, когда на ней были просверлены все необходимые отверстия и кларнет был закончен производством.

Из всего сказанного ясно, что процесс колебания воздушного столба в духовых музыкальных инструментах осложняется многими одновременно действующими факторами. Поэтому точный теоретический расчет этих инструментов, при современном состоянии акустики, пока еще невозможен, а все вышеприведенные формулы дают только приближенные результаты.

§ 6. По своему устройству и действию язычки духовых музыкальных инструментов, представляющие удлиненные упругие пластинки, укрепленные с одного из концов (основания), могут быть разделены на два основных типа:

1. Так называемые бьющие язычки имеют площадь большую, чем площадь отверстия для пропуска воздуха. Поэтому при каждом колебании они ложатся краями на края отверстия и могут почти совершенно закрывать проход воздуха в трубку инструмента<sup>2</sup>. При частичном прилегании к краям отверстия, в момент наибольшего приближения к последнему, бьющий язычок производит как бы удар, вследствие чего в тембре издаваемого им звука возникают довольно сильные гармоника высших номеров, а также непериодические колебания, привносящие в звук дребезжащие и скрипучие призвуки. Поэтому звук инструментов с бьющими язычками всегда в большей или меньшей степени имеет примесь остроты и резкости.

---

<sup>1</sup> Мы это наблюдаем, например, у фюгата, где некоторые боковые отверстия просверлены наискось к оси трубки и поэтому имеют значительную длину каналов (l). Тоны, извлекаемые посредством этих отверстий, характеризуются слабостью и силпостью.

<sup>2</sup> В процессе игры полного прилегания язычка к краям отверстия никогда не получается; оно вызвало бы прекращение поступления воздуха в канал инструмента (проводимость = 0, а импеданс =  $\infty$ ), а следовательно, и его звучания. Подобные «киксы» случаются иногда у неопытных музыкантов, при неумелом пользовании своим губным аппаратом и при слишком сильном нажиме на язычок во время игры.

Язычки бьющего типа применяются в современных оркестровых духовых язычковых инструментах, а также в органе, где они составляют подавляющее большинство язычковых регистров.

В зависимости от числа участвующих в звукообразовании бьющих язычков, современные оркестровые язычковые инструменты делятся на инструменты с одиночным язычком (кларнет и саксофон) и с двойными язычками (гобой, фагот, саррюзофон). Двойные язычки, при сближении между собой, частично ударяются краями друг о друга; благодаря большей, чем у одиночных язычков, внезапности и кратковременности удара, в тембре инструментов с двойными язычками резче выражены гнусавые и скрипучие призвуки, чем у инструментов с одиночными язычками, имеющих более мягкий и спокойный тембр звука.

2. Так называемые проходящие или свободные язычки по своим размерам и площади делаются всегда меньше площади отверстия для прохода воздуха. Поэтому при каждом колебании они свободно проходят через такие отверстия, и площадь для пропуска воздуха через последние никогда не уменьшается меньше некоторой величины, определяемой разностью между площадью отверстия и площадью язычка. Благодаря такому более мягкому действию, а также вследствие отсутствия каких-либо ударов твердых частей друг о друга, в тембре звука, возникающего в инструменте с проходящим язычком, высокие обертоны получаются более слабыми, а также отсутствуют сколько-нибудь заметные шумовые призвуки. Звук получается поэтому более мягким и певучим.

Одиночные язычки свободного типа<sup>1</sup> применяются в некоторых язычковых регистрах органа (Aeoline, Physharmonika и др.); кроме того, этот вид язычков находит широкое применение в ряде новейших клавишных инструментов язычкового типа (гармониум, фисгармония и т. п.), а также в ручной и губной гармониках (баян, аккордеон, концертино и т. п.).

§ 7. Во всех тех инструментах, в которых для возбуждения язычков применяется механическое или механизированное дутье (орган, гармониум, гармонифлут, ручная гармоника) или в которых губы и язык играющего музыканта не входят в непосредственное соприкосновение с язычками (например, в губной гармонике), последние обычно делают из металла. Они представляют в таком случае удлиненные пластинки прямоугольной или, реже, трапецевидной формы, равномерной толщины, или утолщенные к свободному концу, прочно прикрепленные (приклепанные) к металлической же рамочке (рис. 53).

<sup>1</sup> Двойные язычки проходящего (свободного) типа конструктивно не выполнимы.

Такой язычок имеет определенный период собственного колебания, соответствующий его основному тону и зависящий от его длины, толщины, а также от физических свойств его материала (удельный вес и модуль упругости).

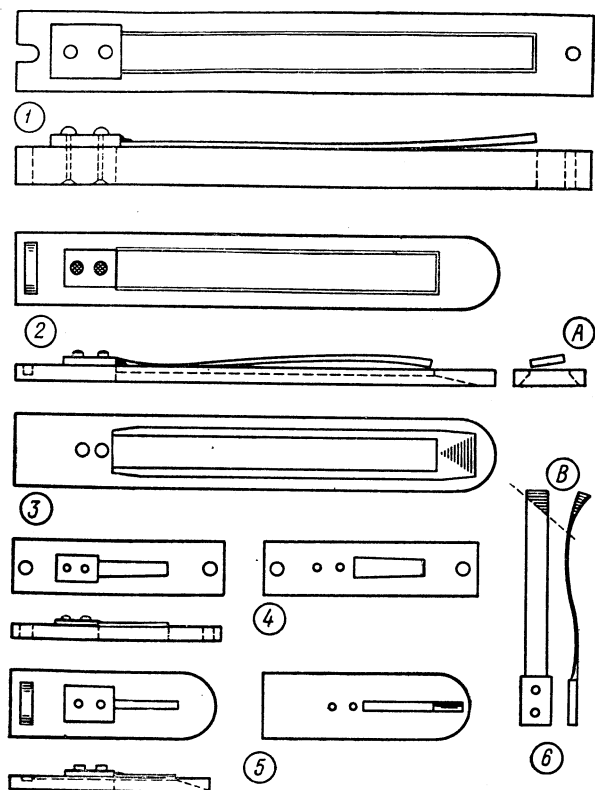


Рис. 53

В таких случаях употребление приставной резонирующей полости, имеющей период колебания, соответствующий периоду колебания язычка, не является обязательным. Применение такой резонирующей надставки является, однако, во многих случаях желательным, так как это усиливает звук, возбуждаемый язычком, сообщает ему устойчивость и увеличивает степень чувствительности и отзывчивости язычка.

Такие надставные резонирующие полости, цилиндрической или конической формы, применяются преимущественно только в органе.

В гармоние, губной и ручной гармониках и т. п. инструментах с проходящими язычками, надставные полости, настроенные в унисон с язычками, по условиям конструктивного характера (громоздкость) не



используются; применяющиеся в этих инструментах небольшие настраиваемые каналы и камеры играют роль резонаторов, усиливающих некоторые высшие обертоны язычка и выделяющих поэтому в его тембре некоторые форманты.

Детальное исследование характера колебаний свободных (проходящих) металлических язычков, произведенное современными чувствительными электрическими методами, показало, что различные точки их поверхности колеблются с разными частотами, находящимися в гармоническом отношении друг к другу. Это дает возможность снимать электростатическим путем с разных участков колеблющегося язычка его главные гармоники, усиливать их электрическими средствами и использовать для создания разнообразных тембров органоподобного характера, как это осуществлено, например, в электрическом инструменте «Оргатрон» — Эверетта.

Кроме того, нашими исследователями (Бернштейн), установлено, что в свободных язычках, вследствие некоторой неоднородности их формы в геометрическом отношении, отдельные обертоны могут находиться в не вполне точном гармоническом отношении друг к другу, хотя эти неправильности обычно очень невелики и не влияют на качество звука заметного ухудшающим образом.

Все вышеуказанное свидетельствует о большой сложности колебательного процесса в язычках свободного типа.

В оркестровых язычковых инструментах, где играющий непосредственно воздействует на язычок (или язычки) прикосновением губ и языка, в его распоряжении имеется возможность в некоторых пределах изменять действующую площадь и массу язычка, а следовательно, тем самым влиять на частоту колебаний язычка. В таких случаях для изготовления язычков применяется не металл, но более мягкий и податливый материал растительного происхождения, каковым по преимуществу являются пластинки, вырезанные из стеблей тростника «Арундо донакс» (*Arundo donax*). Эти пластинки, в отличие от металлических язычков, делают всегда утончающимися к свободному концу. Благодаря этому, изменяя длину и площадь колеблющейся части такого тростникового язычка губами, а также изменяя скорость и силу вдувания, играющий может в значительных пределах изменять частоту колебаний язычка<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Следует иметь в виду, что интонация при игре на оркестровых духовых инструментах может вообще довольно сильно варьировать, в зависимости от способов игры на них и, в частности, от личных особенностей амбушюра (т. е. губного аппарата) музыканта. Точные измерения высоты звуков, издаваемых любым оркестровым духовым инструментом, показывают, что не только два или несколько разных исполнителей могут на них интонировать одни и те же звуки по-разному, но и один и тот же исполнитель почти никогда не сыграет подряд один и тот же звук на данном инструменте на одинаковом высотном уровне. Отсюда вытекает, что если мы желаем составить более или менее верное объективное суждение о звукояре данного духового музыкального инструмента, то следует проиграть на нем по много раз нескольким исполнителям и взять средние из записей высот звуков, данных этими исполнителями. Вероятность точного и объективного суждения о звукояре инструмента, согласно «закону больших чисел», будет повышаться, по мере увеличения числа наблюдений и записей высот исследуемых звуков инструментов.

Ввиду таких особенностей тростникового язычка и его способности издавать колебания разных частот, к нему обязательно должна быть присоединена резонирующая надставная трубка, регулирующая и устанавливающая высоту возбуждаемого язычком звука.

Применяя боковые отверстия, просверленные в трубке инструмента, мы получаем возможность изменять длину и объем резонирующего столба воздуха и тем самым воздействовать на язычок и регулировать частоту его колебаний, а также вызывать явление «передувания», значительно расширяющего диапазон звуков инструмента.

В своеобразном народном музыкальном инструменте — в о л ы н к е — язычки заключены в особые наконечники и дутье в известной степени механизировано. Здесь также применяются надставные резонирующие трубки с боковыми пальцевыми отверстиями, изменяющие резонанс столба воздуха и высоту получаемого звука. Тростниковый язычок волынки может в некоторых пределах изменять частоту своих колебаний, приспосабливаясь к меняющемуся резонансу надставной трубки, однако, вследствие отсутствия воздействия на язычок амбушюра играющего, диапазон его частот, по сравнению с оркестровыми язычковыми инструментами, сильно сужен. В частности, явление передувания, широко используемое в современных оркестровых язычковых инструментах, на волынке не применяется.

Сходные с волынкой условия действия язычков наблюдаются у восточных примитивных инструментов типа гобоя (замр, зурна, бишкур и др.), на которых играют без прикосновения губами и языком к язычкам инструмента. Эти инструменты также имеют сравнительно узкий диапазон частот (приблизительно в объеме октавы), и передувание на них обычно невозможно.

Интересный пример использования резонанса надставной трубки мы встречаем в китайском инструменте шенг.

Последний представляет подобие чайника, в носик которого играющий вдвухает ртом воздух, а из крышки выходят вверх бамбуковые трубки разной длины, с укрепленными на их нижних концах, вставленных в корпус инструмента, язычками проходящего типа, настроенными на определенные высоты. На каждой выходящей из корпуса шенга трубке сбоку просверлено небольшое отверстие. Если играющий оставляет эти отверстия открытыми, то язычки остаются в покое; закрывание пальцем отверстия на какой-либо трубке шенга, восстанавливая резонанс заключенного в ней столба воздуха, настроенного в унисон с колебаниями язычка, приводит последний в колебание, каковое не было возможно, пока боковое отверстие было открыто и, следовательно, не было соответствия между периодами колебания язычка и заключенного в трубке столба воздуха.

Настройка язычков на желаемую частоту колебаний совершается двояким способом.

Первый способ. Если мы имеем язычок, действующая длина которого не может быть изменена (например, проходящий язычок гармонума, баяна и т. п. инструментов), то, чтобы повысить частоту его колебаний, нужно уменьшить толщину (т. е. массу) его свободного конца. Уменьшение же толщины части язычка, ближайшей к точке его закрепления, делает

его более гибким и менее упругим, понижая частоту его колебаний.

**Второй способ.** Если толщину (а следовательно, массу и упругость) язычка изменять нельзя, то высоту его звука регулируют изменением длины его действующей части.

Этим способом пользуются главным образом при применении бьющих язычков, например, в язычковых регистрах органа, где для этого применяются особые проволочные крючки, входящие в камеру с язычком и прижимающиеся к его основанию (рис. 54). Вытягивая конец крючка, увеличивают длину действующей части язычка, понижая частоту его колебаний, и обратно.

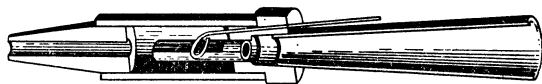


Рис. 54

Подобный же способ регулирования высоты возбуждаемого язычком звука применяется при игре на некоторых современных оркестровых язычковых инструментах. Так например; желая извлечь высокий звук, кларнетист сильнее сжимает мундштук губами, одновременно перемещая их к его концу. Этим он одновременно уменьшает действующую длину и массу язычка и повышает его упругость. Если же он хочет извлечь низкий звук, то он уменьшает нажим губ на мундштук, одновременно захватывая его губами несколько глубже. Этим он увеличивает действующую длину и массу язычка и уменьшает его напряжение и упругость. А так как, как мы это указали ранее, тростниковый язычок обычно утончается к свободному концу, то уменьшение его массы при укорачивании действующей части будет происходить не пропорционально его длине, но в значительно большей степени. Такая нелинейная зависимость между действующей длиной и массой язычка является фактором, благоприятствующим расширению диапазона звуков инструмента.

§ 8. Форма надставной резонирующей трубки существенно влияет на акустические свойства язычкового инструмента.

Конические, гиперболические, экспоненциальные и т. п. трубки, постепенно расширяющиеся от язычка к выходу, в акустическом отношении эквивалентны открытым органным трубам, описанным ранее. Это выражается в том, что длина волны их основного тона приблизительно равна удвоенной длине трубки, а при «передувании» получается полный ряд гармоник от основного тона.

Цилиндрические же язычковые трубки эквивалентны закрытым органным трубам. Это выражается в том, что дли-

на волны их основного тона равна приблизительно учетверенной длине трубки, а при «передувании» они дают только нечетные номера гармоник.

§ 9. Сложность процессов звукообразования у духовых музыкальных инструментов понуждает нас, для ясности и во избежание недоразумений, добавочно разъяснить ту роль, которую играют при этом различные факторы и элементы духовых музыкальных инструментов.

В начале главы VII мы указывали, что духовые музыкальные инструменты представляют собою твердые трубки различного сечения и размеров, наполненные воздухом. Кроме того, мы отметили, что для возбуждения звуковых колебаний они нуждаются в особых механизмах или приспособлениях, а также в особом способе сложения губ человека (амбушюре), которое определяет и обуславливает способ передачи им необходимой энергии. Устройство и действие этих механизмов и приспособлений было в общих чертах описано.

Рассмотрим же еще раз по отдельности роль, степень участия и взаимную связь всех этих органов и элементов духового инструмента в звукообразовании.

Основным звучащим телом духового музыкального инструмента, как мы уже указывали, является объем воздуха, наполняющий канал его трубки (корпуса). Однако в известной степени звучащим телом (вибратором) в язычковых духовых инструментах является также вибрирующий язычок (или язычки), а в инструментах с воронкообразными мундштуками—губы человека. Оба эти элемента—объем воздуха + язычки или губы, участвуя в автоколебательном процессе, являются функционально связанными, а потому и функционально неотделимыми друг от друга соучастниками в звукообразовании.

В то же время язычки и губы человека являются и возбудителями колебаний наполняющего канал инструмента воздуха, так как без их специального участия и особого действия последний не способен самостоятельно прийти в состояние длительного и правильного колебания.

Каждый сосуд с твердыми стенками, наполненный воздухом и сообщающийся с атмосферой одним или несколькими отверстиями, является, как это уже давно известно, резонатором, отвечающим на звуковые колебания определенных частот, в зависимости от его геометрической формы, величины, объема и площади отверстий, сообщающих его с атмосферой. Духовые музыкальные инструменты являются подобными же резонаторами, снабжаемыми, в отличие от лабораторных приборов такого рода, обычно теми или иными приспособлениями для изменения их резонирующей способности, по желанию играющего на них музыканта. Поэтому наполняющий трубку духового музыкального инструмента воздух является

не только телом звучащим (разделяя эту функцию с язычками или губами человека), но одновременно и телом резонирующим, т. е. определяющим, выбирающим и поддерживающим определенную частоту колебаний системы. Наличие приспособлений, позволяющих изменять длину воздушного столба или же площадь отверстий, сообщающих его с атмосферой, позволяет изменять резонансные свойства этого воздушного столба, менять частоту колебаний возникающей в нем стоячей волны, а следовательно, и влиять одновременно на частоту колебаний соучаствующего в звукообразовании твердого вибратора, а тем самым и изменять высоту извлекаемого из инструмента музыкального звука.

---

## СВИСТЯЩИЕ И ЯЗЫЧКОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

§ 1. Флейта принадлежит к свистящим, или лабиальным инструментам, общее понятие о которых было дано в предыдущей главе этого отдела (§ 2 и след.).

Нормальным типом современной оркестровой флейты является цилиндрическая сопрановая флейта системы Теобальда Бема. Верхний участок ее канала, называемый головкой, имеет профиль, слабо суживающийся по направлению к пробке, которой он закрыт. Вблизи пробки в стенке головки флейты просверлено овальное отверстие для вдувания воздуха и возбуждения звука (так называемое амбушюрное отверстие), окружаемое иногда снаружи валикообразными боковыми возвышениями, в целях лучшей концентрации и направленности воздушной струи.

Присоединенный к головке цилиндрический ствол флейты имеет для изменения высоты звука 15—16 боковых отверстий<sup>1</sup>, с присоединенным к ним сложным механизмом клапанов. Открывая и закрывая последние, музыкант изменяет длину звучащей и резонирующей части столба воздуха, а вместе с тем и высоту извлекаемого звука.

Материал, из которого изготавливаются флейты, оказывает заметное влияние на качество их звука. Практически установлено, что деревянные флейты дают более мягкий, а металлические—более яркий тембр звука, обладая одновременно большей отзывчивостью, по сравнению с деревянными. Гладкость внутренних стенок флейты играет очень важную роль; замечено, что флейты с шероховатым или плохо отполированным каналом дают более сильный тембр и менее отзывчивы при игре.

Путем опыта Бем нашел, что делать канал в головке флейты также цилиндрическим нецелесообразно; он дал ему небольшое сужение по

<sup>1</sup> 15 отверстий у флейты с диапазоном до  $c^1$ ; 16 отверстий у флейты с диапазоном до  $h$ .

направлению к пробке (от 19,0 до 17,8 мм., т. е. примерно на 10%) на протяжении около 140 мм длины. Это сужение идет не по прямолинейному конусу, а по некоторому эмпирически найденному криволинейному профилю. При соблюдении данных Бемом для этого профиля поперечников канала головки, качество звука и строй (интонация) флейты получаются наилучшими. Точно так же, опытным путем Бем установил размеры (т. е. площадь) амбушюрного отверстия и угол, под которым должна идти внутренняя стенка его переднего края, о который разбивается струя воздуха, выходящая из рта музыканта. При этом угле, равном  $7^\circ$  от нормали, звук извлекается легче всего и обладает наибольшей устойчивостью. Опытным же путем было найдено и наимыгоднейшее расстояние от пробки до центра амбушюрного отверстия, равное 16—17 мм; увеличение этого расстояния понижает тоны третьей октавы относительно тонов двух нижних октав; уменьшение его оказывает обратное действие.

При вдувании воздуха в амбушюрное отверстие, по обе стороны от края последнего возникают вихревые движения в струе воздуха, в результате чего в канале флейты возникает стоячая волна, имеющая пучности вблизи амбушюрного отверстия и несколько далее выходного конца или последнего открытого бокового отверстия. Бем нашел, что расстояния между центром амбушюрного отверстия и центрами боковых отверстий должны быть равны половине длины волны желаемого звука, минус 51 мм<sup>1</sup>.

При слабом вдувании воздуха на флейте можно получить тоны первой октавы до  $cis^2$ ; чтобы получить  $d^2$  и следующие более высокие звуки, усиливают вдувание в амбушюрное отверстие, получая путем передувания второй, т. е. октавный обертон; при дальнейшем усилении вдувания можно получить 3-й, 4-й и следующие обертоны, как самостоятельные звуки, которые можно хроматически изменять, посредством открывания и закрывания боковых отверстий. Впрочем, трудности получения высших номеров обертонов возрастают из-за того, что давление вдуваемого воздуха увеличивается пропорционально квадрату получаемой частоты звуковых колебаний.

Благодаря тому, что возбудителем колебаний является струя вдуваемого в канал флейты воздуха, обладающая ничтожной массой и инерцией, по сравнению с остальными оркестровыми духовыми инструментами, флейта является наиболее подвижным и виртуозным инструментом, на котором возможно исполнение самых быстрых пассажей.

Звук флейты беден обертонами. По данным Э. Мейера (рис. 55), в ее основном звуке  $d^1$  наиболее сильными являются 2, 3 и 4-я гармоники, при значительно пониженной

---

<sup>1</sup> При диаметре канала флейты 19 мм, диаметре боковых отверстий около 12,5—13 мм и толщине стенок флейты не более 4 мм, флейта при этом достаточно хорошо следует формуле:  $L = L_0 - 3D + (d_0 + d_1)$ , приведенной в § 5 главы VII этого отдела.

амплитуде колебаний основного тона и при быстром убывании 5—10 гармоник. Присутствие более высоких обертонов не установлено. При ослаблении силы звука амплитуда основного тона значительно увеличивается; наоборот, при игре  $f$  начинают преобладать гармоники, лежащие по соседству с

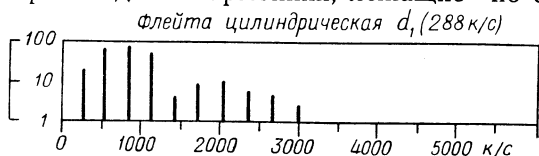


Рис. 55

основным звуком. Незадолго до наступления «передувания», громкость 2-й гармоники настолько возрастает, что получается впечатление игры октавами. При передувании основной тон затухает, а на его место становится ближайшая высшая гармоника.

Употреблявшаяся ранее коническая оркестровая флейта, с каналом, суживающимся по направлению от головки к выходу, имела еще более бедный тембр (рис. 56); в ее звуке найдены преимущественно 1-я и 2-я гармоники, при крайней слабости 3-й, 4-й и 6-й гармоник и несколько более сильной 5-й; выше 6-й гармоники частичных тонов не найдено.

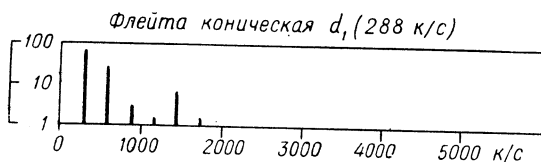


Рис. 56

Исследования Германн-Гольдапа обнаружили в тембре флейты форманту, лежащую в пределах от  $f^3$  до  $a^3$  (1 400—1 760 к/с), выявляющуюся при звучании тонов ее второй октавы ( $d^2$ — $cis^3$ ). Ее сила колеблется от 0,96 до 0,32 силы основного тона.

Разновидность нормальной оркестровой флейты—пикколо-флейта—имеет длину вдвое короче и звучит поэтому на



Рис. 57



октаву выше нормальной флейты. Устройство ее в общем аналогично устройству большой оркестровой флейты.

В чрезвычайно резком, пронзительном звуке пикколо-флейты Э. Мейером найдены немногочисленные гармоники, быстро убывающие по мере увеличения их номера (рис. 57). Выше 8-й гармоники частичных тонов в звуке пикколо-флейты не обнаружено.

§ 2. Кларнет принадлежит к группе язычковых инструментов с одиночным бьющим язычком. Характерным отличием кларнета от других язычковых инструментов является цилиндрический канал на значительном (около 0,7) протяжении его длины, расширяющийся на выходном конце в небольшой раструб. Трубка кларнета имеет довольно большое число боковых дырочек (15—23), прикрываемых при игре частью пальцев, частью же при помощи более или менее сложного клапанного механизма. Для передувания и получения высших гармоник, на трубке кларнета, на расстоянии около 0,3 его длины от мундштука имеется небольшое «регистровое» отверстие, прикрываемое особым клапаном.

Значительная протяженность цилиндрического участка канала делает кларнет в акустическом отношении до некоторой степени эквивалентным закрытым лабиальным трубам. Это выражается, во-первых, в том, что общая длина трубки кларнета приближается к четверти длины волны самого низкого издаваемого им звука; во-вторых, в том, что при передувании на нем получаются только нечетные гармоники, т. е. 3, 5, 7-я и т. д.; и, в-третьих, в том, что в спектре его тембра ближайшие к его основному тону четные гармоники являются сильно ослабленными.

Все это ставит кларнет в особое положение в семье современных оркестровых язычковых инструментов как по способу игры, так и по характеру тембра.

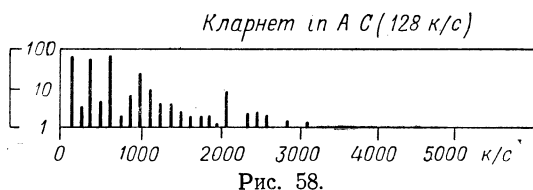
Звукообразование, подобное закрытым лабиальным трубам, у кларнета может быть объяснено особенностями действия его одиночного язычка. Исследования механизма звукообразования у кларнета показали, что в начале вдувания язычок прижимается сжатым воздухом, накопившимся во рту музыканта, к краям отверстия в мундштуке, предварительно пропустив в трубку кларнета некоторое количество сжатого воздуха. Это создает местное сжатие воздуха ниже язычка, которое затем распространяется по трубке инструмента к выходу. Дойдя до последнего, волна отражается от окружающей атмосферы и, изменив фазу, идет обратно к мундштуку. Теперь она приходит к язычку в фазе разрежения, которое, взаимодействуя с наличием сжатого воздуха во рту музыканта, оставляет язычок прижатым к краям мундштучного отверстия. Отразившись от внутренней поверхности язычка, волна снова идет по трубке к выходу и, вторично претерпев отражение от атмосферы, возвращается опять в мундштук, но уже в фазе сжатия. Теперь наличие сгущений воздуха по обеим сторонам язычка дает ему возможность, вследствие упругости, отклониться и открыть отверстие, пропустить в трубку кларнета вторую порцию воздуха и т. д.

Таким образом, за один цикл колебания язычка воздушная волна в трубке кларнета успеет пройти четыре раза (два—в прямом и два—в обратном направлении), что и вызывает явление, сходное с звукообразованием у закрытых лабиальных труб.

Преимущественно применяемый в оркестре сопрановый кларнет *in B* имеет общую длину около 655—660 мм, при диаметре цилиндрической части канала около 15,0 мм и наибольшем диаметре на выходе из раструба 52—55 мм. Применяемый в оркестре такой же кларнет *in A* имеет общую длину около 690—695 мм, при тех же диаметрах канала и при выходе из раструба.

Раструб обычно выполняется по кривой, близкой к параболе, которая начинается на расстоянии около 140 мм от выхода. Исследования показывают, что раструб влияет слегка понижающим образом на два нижних звука кларнета (*e* и *f*) и несколько менее — на их гармоника (*h*<sup>1</sup> и *c*<sup>2</sup>). Кроме того, он вносит в тембр кларнета довольно слабую форманту, порядка 1 400—2 000 к/с.

По исследованиям Э. Мейера, в самом нижнем звуке кларнета (рис. 58)  $c = 128$  к/с. найдено свыше 20 обертонов; наиболее сильными являются 1, 3, 5 и 8-й частичные тоны, с резкими провалами между ними. Наблюдается также сравнительно сильный 17-й частичный тон (близкий к форманте). 18, 22 и 24-й частичные тоны не обнаружены.



Материалом, из которого преимущественно изготавливают кларнеты, являются твердые породы дерева (самшит, кокосовое, гrenaдильное), хотя в последние годы начинают применять эбонит, пластические массы и металлы.

Наблюдения показывают, что материал оказывает некоторое влияние на качество звука кларнета; поскольку, однако, его стенки имеют достаточную массу, твердость и гладкую поверхность, оно все же не очень значительно. Наблюдается лишь несколько большая мягкость тембра деревянных кларнетов по сравнению с металлическими, которые дают более яркий звук, при несколько большей отзывчивости и чувствительности к изменениям амбушюра музыканта.

Форма и размеры мундштука играют большую роль при звукообразовании. Внутренний профиль канала мундштука,

будучи геометрически очень сложным, несомненно, оказывает значительное влияние на формирование тембра. Чрезвычайно важна правильная кривизна профиля «накладки», т. е. той площадки, на которой закрепляется язычок (трость); отклонения даже в сотые доли мм здесь оказывают заметное влияние на процесс звукообразования, делая его более легким или более затрудненным на разных участках диапазона инструмента. Профиль кривой части «накладки», т. е. краев входного отверстия, должен идти по гиперболе определенной крутизны, степень которой определяется личными особенностями губного аппарата музыканта<sup>1</sup>.

В большинстве случаев наиболее удобными для наших музыкантов являются такие мундштуки, отклонение которых на верхнем конце от верхушки трости равно около 0,9 мм, при общей длине кривой части «накладки» в пределах 23—25 мм<sup>2</sup>.

Язычок, являющийся возбудителем колебаний (так называемая «трость»), делается из пластинки, вырезаемой из ствола тростника «Арундо-донакс». К верхнему свободному краю трость срезывается по плавной кривой, близкой к кубической параболе, примерно до 0,12—0,15 мм толщины. Захватывая верхними зубами спинку мундштука и нажимая нижними зубами, через находящуюся между ними и тростью в качестве мягкой прокладки нижнюю губу, на утончающийся конец трости и вдувая воздух в канал мундштука, музыкант приводит тонкий конец трости в колебание, рождающее звуковые волны в канале кларнета. Механизм действия язычка объяснен выше. Количество и расположение открытых и закрытых дырочек определяет колебательные свойства столба воздуха, а следовательно, и частоту колебаний язычка, диапазон которой доходит до трех слишком октав.

Непосредственным усилением вдувания получить передувание на кларнете (как и на других язычковых инструментах) невозможно или очень трудно. Поэтому здесь применено вышеупомянутое «регистровое» отверстие, открывание которого, создавая сообщение канала кларнета с атмосферой в точке, отстоящей от мундштука приблизительно на  $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$  длины канала, вызывает появление в этом месте пучности, разбивая столб воздуха на части и повышая звук на дуодециму. Более сложные сочетания открытых дырочек, также с участием «регистрового» клапана, позволяют еще больше делить столб воздуха, давая возможность получить 5-ю и 7-ю гармоники.

<sup>1</sup> Для лиц с крепким, сильным губным аппаратом более подходят мундштуки с большой крутизной накладки; для музыкантов со слабым губным аппаратом — с малой крутизной.

<sup>2</sup> В некоторых западных странах и в США музыканты предпочитают мундштуки с короткой кривизной накладки, порядка 16—19 мм.

Регистровое отверстие дает возможность также извлекать звук  $b^1$ , получаемый при его комбинации с отверстием для звука  $a^1$ .

Другие разновидности кларнета (малый *in* Es, сопрановый *in* A, бассет-горн *in* F, альтовый *in* Es, басовый *in* B и др.) отличаются только размерами и высотой звука, сохраняя в основном то же устройство и те же акустические особенности.

По мере увеличения размеров и понижения диапазона тембр кларнета становится более богатым обертонами. Так например, Э. Мейер нашел в нижнем звуке басового кларнета около 50 обертонов (рис. 59). Его спектр характеризуется сильным преобладанием нечетных обертонов, при почти полном выпадении 2-го обертона; начиная с 27-го, все высшие обертоны очень слабы.

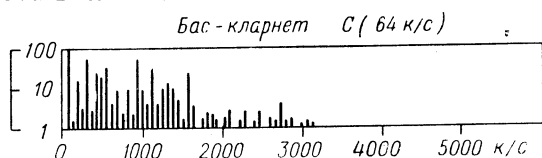


Рис. 59

§ 3. Гобой принадлежит к группе язычковых инструментов с двойным язычком и конической формой канала и является сопрановым представителем этой группы.

Начинаясь у мундштука, канал гобоя расширяется на протяжении около 0,85 его длины по прямому конусу, переходя затем в небольшой раструб. В некоторых конструкциях гобоев раструб имеет частичное сужение при выходе (рис. 60 А и Б).

Трубка гобоя имеет 15—20 боковых отверстий, прикрываемых при игре частью пальцами, часть же с помощью более или менее сложного рычажно-клапанного механизма. Для передувания и получения высших гармоник, на трубке гобоя, на расстояниях около  $1/8$  и  $1/5$  его

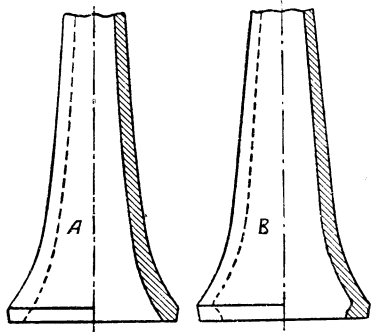


Рис. 60

полной длины, считая таковую от конца трости, имеются два «регистровых» отверстия, прикрываемых особым механизмом так называемых октавных клапанов. Кроме того, для облегчения «передувания» нескольких низких звуков, чашечка клапана  $cis^2$  имеет в центре небольшое сквозное отверстие, которое

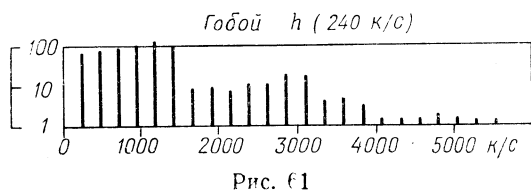
музыкант может по желанию открывать и закрывать, сдвигая вниз и вверх 2-й палец левой руки.

Коническая форма канала гобоя делает его в акустическом отношении эквивалентным открытым лабиальным трубам. Это выражается, во-первых, в том, что общая длина его приближается к половине длины волны самого низкого издаваемого им звука; во-вторых, в том, что при «передувании» на нем получается полный ряд гармоник, по порядку их номеров (1, 2, 3, 4 и т. д.), и в-третьих, отражается на спектре его тембра, в котором не замечается провалов на четных номерах частичных тонов.

Применяемый в оркестре сопрановый гобой имеет общую длину около 620—630 мм, при низшем звуке  $h$ , или около 635—640 мм, при низшем звуке  $b$ , при диаметре конической части канала от 4,5 до 19—20 мм и наибольшем диаметре на выходе из раструба около 40—42 мм.

Раструб гобоя влияет слегка понижающим образом на 1—2 его нижних звука; кроме того, он вносит в его тембр некоторую довольно сильную форманту, порядка 1 600—2 000 к/с, амплитуда которой, согласно Германн—Гольдапу, по меньшей мере вдвое больше амплитуды основного тона (в диапазоне  $f^1—f^2$ ). Применяемое некоторыми конструкторами частичное сужение раструба на выходе (см. рис. 59б), уменьшая силу форманты, способствует смягчению тембра гобоя, вообще очень резкого и выдающегося среди других оркестровых инструментов.

По исследованиям Э. Мейера (рис. 61), в тембре низшего звука  $h$  (240 к/с) найдено 23 частичных тона; первые шесть очень сильны, имея приблизительно равную амплитуду; далее идет группа обертонов со средними амплитудами (7—16), с некоторым максимумом на 12—13 частичных тонах (область, близкая к форманте); остальные частичные тоны (17—23) весьма слабы и быстро затухают.



Как и в других деревянных духовых инструментах, материал оказывает мало влияния на звук гобоя; несколько большую мягкость звука деревянных гобоев, по сравнению с металлическими, следует отнести за счет больших потерь на трение, поглощение звуковой энергии и срезывание высоких частот у стенок канала, которые здесь никогда не могут быть такими гладкими и жесткими, как у металлических инструментов.

Величина мензуры<sup>1</sup> оказывает значительное влияние на громкость и тембр звука гобоя; замечено, что широко-мензурированные гобои звучат сильнее и грубее узко-мензурированных.

Размеры и устройство язычкового мундштука (трости) мало варьируют, но они оказывают большое влияние на строй гобоя. В этом отношении чрезвычайно важен правильный подбор конструкции и размеров внутренней трубочки трости (так называемого «штифта») к типу и мензуре данного инструмента.

Язычки, являющиеся возбудителями колебаний, делаются из пластинки тростника «Арундо донакс». К верхним, свободным, сходящимся вместе краям пластинки срезаются до толщины 0,12—0,15 мм. Захватывая губами пластинку трости вблизи их основания и вдувая в щель между ними воздух, музыкант возбуждает звук, частота колебаний которого регулируется, во-первых, количеством и расположением открытых и закрытых отверстий на трубке гобоя, а во-вторых, степенью натяжения губ и силой вдувания воздуха.

Непосредственно получить передувание усилением вдувания или изменением воздействия губами на трость на гобое невозможно, или очень трудно. Только открывание соответствующего «регистрового» отверстия, создавая вблизи него условие для образования пучности, разбивает стоячую волну в канале инструмента на соответствующее число частей.

В зависимости от желаемой высоты звука, гобоист применяет различные «регистровые» отверстия, причем в современных системах гобоев нижний и верхний октавные клапаны связаны друг с другом сложным рычажным механизмом, соединенным с рычагом клапана «g<sub>1</sub>». Вследствие этого, переключение обоих октавных клапанов совершается автоматически, при нажатии только одного общего октавного рычага.

Звучащая на квинту ниже альтовая разновидность гобоя — английский рожок<sup>2</sup> — отличается в основном только большими размерами (длина канала около 900 мм) корпуса и язычка, а также внутренним профилем раструба, имеющего внизу яйцеобразное расширение, с довольно узким выходом (рис. 62). Такой своеобразный профиль раструба вносит в

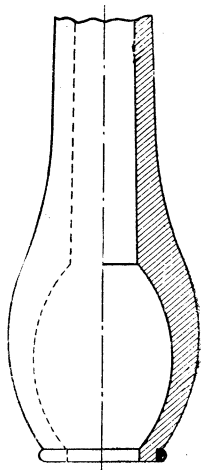


Рис. 62

<sup>1</sup> Мензурой на языке мастеров музыкальных инструментов называется отношение среднего диаметра канала к общей длине инструмента, или же величина (степень) расширения его канала.

<sup>2</sup> Название «английский рожок» неправильно. Первоначально альтовый гобой, из-за изогнутости его трубки, назывался «cor anglée»; впоследствии неграмотные переписчики и музыканты исказили его название на «cor anglais».

тембр английского рожка, по сравнению с гобоем, существенные отличия. По исследованиям Э. Мейера (рис. 63), для звука  $es_1$  (204 к/с) было найдено только 20 частичных тонов, с полным выпадением 7-го и 14-го тонов. Наиболее сильными оказались 1—5-й частичные тоны; область 6—10 тонов имеет наполовину меньшие амплитуды, а 11—12-й частичные тоны быстро убывают по силе; что же касается 13—20-й гармоник, то они вообще очень слабы, за исключением несколько более сильных 16-го и 19-го частичных тонов.

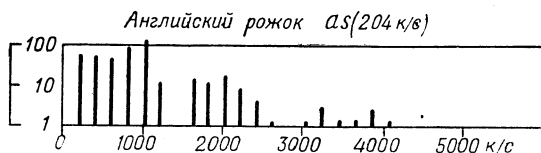


Рис. 63

§ 4. Фагот принадлежит к группе инструментов с двойным язычком и конической формой канала и является басово-баритоновым представителем этой группы. Будучи по форме канала и по акустическим свойствам весьма близким к гобою и английскому рожку, фагот отличается от последних отсутствием раструба, несколько более узкой мензурой, а также значительно большим количеством боковых отверстий (25—27).

Начинаясь у мундштука каналом с диаметром около 4,0 мм, трубка фagота на протяжении всей своей длины (2,55—2,60 м) расширяется по почти точному прямолинейному конусу до диаметра 40 мм на выходном конце. Для компактности и удобства в пользовании трубка фagота приблизительно на половине ее длины разделена на две части, соединенные U-образным коленом и идущие рядом; таким образом длина корпуса фagота уменьшается до 1,3—1,35 м. В связи с такой коленчатой формой и параллельным расположением двух каналов, фагот имеет более сложное расположение боковых отверстий и клапанного механизма, чем гобой и английский рожок.

В акустическом отношении фагот эквивалентен открытым лабиальным трубам, давая при «передувании» полный последовательный ряд гармоник и приближаясь по длине канала к длине полуволны самого нижнего звука. Кроме того, спектр его тембра, очень богатый частичными тонами, не обнаруживает провалов на четных частичных тонах.

По исследованиям Э. Мейера (рис. 64), в тембре звука С (64 к/с) найдено свыше 30 частичных тонов, с максимумом амплитуды на 7—8 частичных тонах и при постепенном убывании в обе стороны. Характерен некоторый провал на 5-м и 10-м частичных тонах, а также выпадение 16-го тона. Исследования других звуков разных высот (120, 128, 256, 390 и 512

к/с) показало, что фагот имеет довольно резко выраженную форманту в области около 450—500 к/с.

Открывая последовательно боковые отверстия и укорачивая столб воздуха, можно воспроизвести звукоряд  $B_1-f$ ; остальные более высокие звуки берутся посредством передувания. Так, например, звуки *fis—g—gis* извлекаются, как соответственно на октаву ниже лежащие тоны, но при полукрытом отвер-

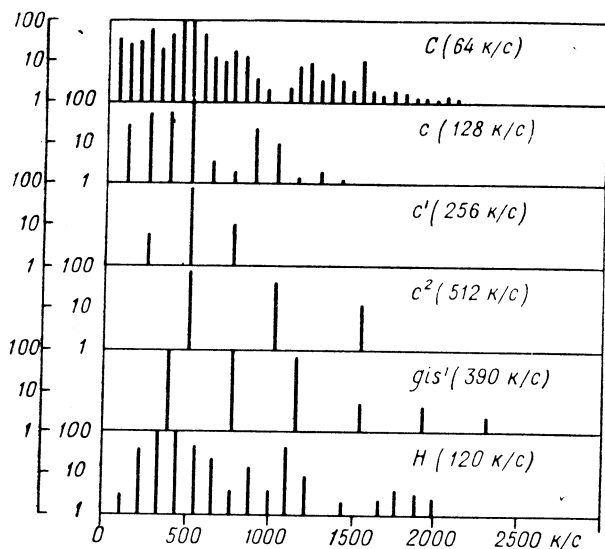


Рис. 64

сти для звука  $f$ , которое делит волну в канале фагота пополам. Звуки  $a-b-h-c^1$  берутся также на октаву ниже, но при этом открывают один из специальных «октавных» клапанов. Интересно то, что звук  $cis^1$  получается при комбинации отверстий для  $cis$ , но при более сильном нажиме губами на трость; такое непосредственное передувание оказывается возможным потому, что средний диаметр канала фагота весьма мал по сравнению с остальными коническими язычковыми оркестровыми инструментами. Благодаря этому тенденция к раздроблению столба воздуха у него больше, чем у остальных оркестровых язычковых инструментов.

Остальные более высокие звуки получаются при применении сложных аппликатур, с чередованием открытых и закрытых отверстий; при этом получается дробление столба воздуха на три и более колеблющиеся части.

Звучащий на октаву ниже фагота контрафагот имеет вдвое большую длину канала, при наибольшем диаметре у выхода около 60 мм. Будучи подобным фаготу по форме канала



и устройству язычка, контрафагот сходен с ним и в акустическом отношении.

Тембр контрафагота характеризуется наличием весьма значительного количества частичных тонов. По исследованию Э. Мейера (рис. 65), для звука  $C_1$  (32 к/с) найдено свыше 50 частичных тонов. Группа 1—20 частичных тонов имеет значительные, довольно близкие по уровню амплитуды; несколько выделяются 2—3-й и 8—11-й частичные тоны. В области 21—50 частичных тонов имеются многочисленные провалы, а также местный максимум на 34-м частичном тоне.

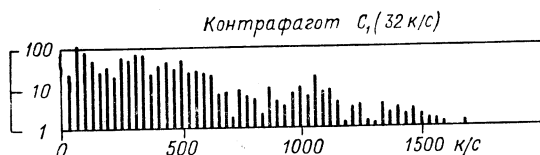


Рис. 65

§ 5. Саксофон принадлежит к группе инструментов с одиночным бьющим язычком и коническим каналом. По устройству мундштука и возбудителя колебаний (трости) саксофон весьма близок к кларнету; вследствие же коничности канала он родственен гобой и фаготу, отличаясь от последних более широкой мензурой.

По акустическим свойствам саксофон эквивалентен открытым лабиальным трубам: во-первых, его длина приближается к половине длины волны самого низкого издаваемого им звука; во-вторых, при «передувании» он дает весь ряд гармоник, и, в-третьих, в спектре его тембра нет резких провалов на четных частичных тонах.

Корпус саксофонов всегда делается из металла; благодаря некоторому участию тонких и упругих стенок в вибрации, звук саксофона, по сравнению с другими язычковыми инструментами, приобретает своеобразный оттенок, сближающий его с группой амбушюрных инструментов. Саксофон имеет 20 боковых отверстий большого диаметра, пропорционального диаметрам его канала в соответствующих местах, что способствует верности интонации и придает звукам чистоту и силу. Кроме того, для «передувания» имеются два октавных клапана, соединенных между собой автоматическим рычажным механизмом, связанным с рычагом клапана  $g^1$  и действующим подобно механизму октавных клапанов гобоя.

По исследованиям Э. Мейера (рис. 66), в спектре тембра звука  $d$  (144 к/с) альтового саксофона найдено 24 частичных тона. Область 1—6-го частичных тонов характеризуется максимальными амплитудами; выше идет постепенное медленное

убывание амплитуд, с максимумом на 13-м частичном тоне и провалами на 14, 16 и 19-м частичных тонах.

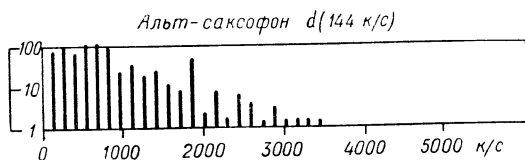


Рис. 66

Тембр звука А (106 к/с) тенорового саксофона (рис. 67) имеет до 30 частичных тонов. Преобладающими по амплитуде являются 1—8-й частичные тоны, с максимумами на 3-м и 6-м частичных тонах; далее следует область постепенно убывающих амплитуд, с вторичными максимумами на 13—14, 18, 22—23 и 25—26-м частичных тонах, с провалами на 20, 24 и 27-м частичных тонах.

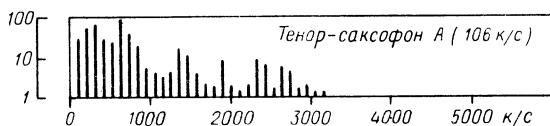


Рис. 67

Вследствие большей тонкости и гибкости язычка (трости), по сравнению с кларнетом, в звуках низкого регистра саксофона наблюдается заметная примесь негармонических ударных призвуков, придающая звуку несколько трескучий, резкий оттенок.

§ 6. С ар р ю з о ф о н по устройству, форме канала, а также типу возбудителя (двойной язычок) весьма близок к тобою и фаготу. В отличие от последних, саррюзофоны всегда делаются из металла. Мензура их несколько шире, благодаря чему их звук сильнее и несколько ярче, чем у гобоя, фагота и их разновидностей.

Применение саксофонной системы боковых отверстий, имеющих прогрессивно возрастающий диаметр, по мере удаления от мундштука и расширения канала, делает интонацию саррюзофонов точной, а звуки—чистыми и сильными.

Акустические свойства саррюзофонов одинаковы со свойствами гобоя, фагота и их разновидностей; благодаря единому принципу расчета и конструкции, саррюзофоны всех величин (от сопранино до контрабаса) представляют единую тембровую инструментальную группу.

## ОРГАН И ОРГАНОПОДОБНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

§ 1. Орган и органоподобные инструменты с акустической точки зрения обладают следующими характеристиками, отличающими их от других музыкальных инструментов:

А. Звукообразование в этих инструментах выполняется при подведении к звучащим телам механической энергии, а играющий человек только управляет распределением этой энергии и не оказывает непосредственного влияния на звуковые элементы инструмента. Соприкосновение человека с последними исключено.

Б. Звуки этих инструментов могут продолжаться сколько угодно долго, независимо от человеческого дыхания.

В. Они могут быть усилены или ослаблены во время звучания в довольно широких пределах, по желанию исполнителя, при помощи специальных регуляторов.

Г. Исполнитель имеет возможности, посредством соответствующих органов управления, в широких пределах изменять тембр получаемых звуков, при сохранении их непрерывности.

В зависимости от устройства и средств, примененных для образования звуков, органы и органоподобные инструменты разделяются на две основные группы:

- 1) духовые органы и им подобные инструменты, и
- 2) электрофонные органоподобные инструменты.

§ 2. Орган классического типа является сложным духовым клавишным инструментом, с применением механического дутья для возбуждения звука.

Механизм классического органа состоит из следующих основных отделов:

1. Силовой и воздуходувной установки, предназначенной для получения и накопления сжатого воздуха, приводящего орган в звучание. Современная конструкция состоит из мощного центробежного вентилятора, или системы нагнетающих мехов, соединенных с механическим мотором. Нагнетаемый воздух по-

ступает в запасный резервуар, где накапливается и сохраняется под необходимым для игры давлением.

2. Воздухораспределительного механизма, состоящего из многочисленных каналов, воздушных камер с клапанами (винд-лад), ручных и ножных клавиатур, регистровых рычагов и других приспособлений для управления органом, сосредоточенных в так называемом игральном столе или консоли, и системы передач (трактур) от органов управления к клапанам. В современных конструкциях органов применяют преимущественно сложную пневматическую или электропневматическую системы передачи.

3. Звучащих труб, являющихся источниками звуков, производимых органом. Смотря по устройству, способу возбуждения и материалу, органнeе трубы разделяются на следующие категории:

а) лабиальные (свистящие) трубы, составляющие основную массу регистров органа<sup>1</sup>, и

в) язычковые трубы, в подавляющем большинстве с бьющими язычками.

Органнeе трубы делаются из различного материала.

Деревянные трубы делаются главным образом лабиального и реже—язычкового типа.

Металлические трубы, изготавливаемые обычно из сплава олова со свинцом (так наз. органный металл), либо из цинка, бывают как лабиального, так и язычкового типа.

В зависимости от величины мензуры, лабиальные трубы имеют различный тембр. Различают:

а) широкие трубы (поперечник равен  $1/10$ — $1/12$  их длины), дающие звуки, бедные обертонами, имеющие спокойный, как бы матовый тембр;

б) трубы средней мензуры (поперечник равен  $1/15$ — $1/17$  длины), составляющие главную массу лабиальных труб органа, дающие более богатый обертонами и более яркий тембр и, наконец,

в) трубы узкой мензуры (поперечник равен  $1/20$ — $1/24$  длины), издающие звуки резкого, напряженного тембра, вследствие наличия в них довольно сильной группы высоких обертонов, при ослабленности низких обертонов.

В органе применяются как открытые, так и закрытые лабиальные трубы; последние, при той же величине мензуры, дают более бедный тембр, вследствие почти полного отсутствия четных гармоник. Употребление закрытых труб диктуется как соображениями экономии места, так и желательностью иметь особо спокойные и мягкие тембры, а также звуки низких частот.

<sup>1</sup> В органах немецкого типа—до 90% всего количества органнх труб; в органах французского (романского) типа—до 45—50% от общего числа труб.

Главным фактором, определяющим тембр лабиальных труб, является устройство их устья. Высота окна (т. е. расстояние от лабиума до выходной щели) определяет качество краевого тона и количество возникающих в нем обертонов. Малая высота лабиума увеличивает количество обертонов и предрасполагает к передуванию; чтобы избежать последнего, ограничивают количество подаваемого в трубу воздуха и уменьшают его давление. Вследствие этого, звук таких труб отличается небольшой силой и более нежным тембром. Наоборот—большая высота лабиума требует большего напора и количества воздуха и дает более сильный и менее богатый обертонами звук.

Исследования показали, что материал, из которого сделаны стенки труб, принимает большее или меньшее участие в колебаниях наполняющего трубы воздушного столба и в заметной степени излучает их в окружающее пространство. Поэтому тембр аналогичных по устройству и мензуре труб, сделанных из различного материала (наприм., дерево и металл), заметно неодинаков. Гораздо большее влияние на тембр имеет геометрическая форма и взаиморасположение частей, участвующих в звукообразовании (т. е. устья, щели, окна и лабиума). Кроме того, исследования показали, что звук, выходящий из устья лабиальной трубы, сравнительно беден обертонами (5—6 частичных тонов); выходя из верхнего отверстия трубы, звук приобретает более богатый тембр (напр., регистр «Principal» получает до 9—10 обертонов), но зато ослабевает в громкости.

Тембр языковых регистров органа весьма богат обертонами, которых найдено здесь до нескольких десятков (например, у регистра «Kromorne» свыше 60).

Приставка раструба к языковым трубам сильно уменьшает количество обертонов, срезывая высокие частоты. Спектр звука языковых труб характеризуется неровностью и провалами на ряде высоких обертонов. Любопытно, например, полное отсутствие 17-го обертона у регистра «trompette».

Разнообразие тембров и громкостей звука в органных трубах достигается главным образом посредством различного устройства и размеров возбудителя или устья (в лабиальных трубах), а также применения разных мензур и профилей надставок и различного напора воздуха.

Бедность тембра основной лабиальной группы труб органа не дает возможности получить яркие, производящие впечатление громкости, звуки, даже в tutti органа. Добавление более ярко и резко звучащих языковых регистров мало помогает делу.

Одним из радикальных, специфических для органа способов обогащения тембра, увеличения яркости и блеска звука и косвенного повышения его громкости в tutti является искусственное добавление обертонов, достигаемое посредством применения особых сложных регистров.

Последние можно разделить на три основные группы:

- а) одноголосные — добавление квинты (3-й обертоны),  
добавление терции (5-й обертоны),  
добавление септимы (7-й обертоны) и др.
- б) двухголосные — 3+5 обертоны (Sesquialtera),  
5+6 обертоны (Tertian),  
3+4 обертоны (Rauschquinte),  
4+8 обертоны (Doublette) и др.
- в) многоголосные — 

4+6+8 обертоны	} (Mixtur)
4+6+8+12 обертоны	
4+6+8+12+16 обертоны	
5+6+7 обертоны (Zymbel),	
4+6+8+10 обертоны (Kornett)	

Кроме того, для оживления спокойного, ровного звука органа, в особенности при игре мелодии соло, применяются регистры, дающие биения, например, «Bifara» (Piffara), состоящий из лабиальных труб с двумя окнами, из которых одно вырезано выше другого; возникающая в трубе стоячая волна образует два близких друг к другу периода, дающих колеблющийся звук, и «Unda maris», представляющий регистр лабиальных труб, настроенных на несколько колебаний ниже основной группы труб; совместное применение с последними создает биения, оживляющие звук.

Помимо того, в органе классического типа применяется еще ряд механических приспособлений, изменяющих громкость звука («тремулянты» для имитации биений, специальные заглушенные акустические камеры с дверцами в виде жалюзи, для постепенного усиления или ослабления звуков заключенных в них труб, и т. п.).

Иногда используются и разностные комбинационные тоны: например, при совместном употреблении 16' регистра и квинты 10 2/3' возникает разностный тон, имитирующий звуки 32' труб.

Звуковой объем органа, благодаря применению труб разных высот звуков (от 32' до 1'), может достигать почти 10 октав, охватывая почти весь диапазон слышимых человеком звуков (от 16 до 14 000 к/с). Длина его труб варьирует от 10,5—11 м до 10—12 мм.

§ 3. Изобретенные и усовершенствованные в XIX в. фисгармонии и гармонумы разных типов, до некоторой степени имитируя классический орган, имеют в качестве звучащих тел только металлические гибкие язычки свободного типа (см. главу VIII, § 7). Вследствие этого удалось значительно сократить объем инструментов, упростить их конструкцию и уменьшить их стоимость. Однако при этом инструменты потеряли в значительной степени те звуковые качества, которые присущи органу классического типа, а именно:

а) значительно снизилась мощность звука инструментов и амплитуда их динамических возможностей и оттенков, и

б) значительно сократились их тембровые ресурсы. В частности, на этих инструментах не удалось получить тембры, свойственные лабиальным трубам классического органа и характерные для последнего.

Механизм фисгармоний и гармониев, подобно органу, состоит из следующих основных отделов:

1. Силовая и воздухоудная установка, предназначенная для приведения инструмента в звучание. Эта установка состоит из системы качающих мехов, соединенных с запасным резервуаром для воздуха. Качающие мехи обычно приводятся в действие с помощью педалей, посредством попеременного нажатия на них ногами играющего<sup>1</sup>.

Различаются два типа этих инструментов:

Немецкий тип, где мехи накачивают сжатый воздух в запасный резервуар, подобно тому, как это происходит в классическом органе;

Американский тип, где мехи высасывают воздух из запасного резервуара, в котором, вследствие противодействия расширяющих его пружин, создается пониженное, против атмосферного, воздушное давление.

2. Воздухораспределительный механизм, в общем подобный таковому у органа, но более простого устройства. Он состоит из воздушных каналов и камер с клапанами, клавиатур и регистровых рычагов, с соответствующими внутренними передачами от органов управления к клапанам.

3. Звучащие язычки свободного (проходящего) типа, помещенные в отдельных рамочках (американский тип), или же в прорезах пластинок по несколько штук рядом (немецкий тип).

Звукообразование у немецкого типа инструментов получается при выходе сжатого воздуха из резервуара через язычки в атмосферу, а у американского типа—при всасывании воздуха из окружающей атмосферы через язычки в резервуар с разреженным воздухом. Вследствие такого коренного различия в способе приведения язычков в колебание, звуки обоих типов инструментов отличаются по характеру, а именно:

—звуки фисгармоний немецкого типа имеют значительно большую громкость, чем звуки гармониев американского типа, которые звучат значительно слабее и мягче;

—у немецкого типа инструментов возможно получение более ярких и характерных тембров, чем у американского.

Разнообразие в силе звука и в тембре в фисгармониях и гармониях достигается путем применения язычков разных размеров, формы и положения внутри инструмента, а также благодаря применению вспомогательных резонирующих камер внутри инструментов. При этом было замечено, что:

<sup>1</sup> Лишь в больших фисгармониях «органного» типа, с ножной клавиатурой для игры (педалями), качание мехов поручается помощнику или механическому мотору.

1) чем шире язычки, тем при одинаковой частоте их колебаний сила звука получается большей. Кроме того, широкие язычки, очевидно, вследствие меньшей склонности к подразделению на мелкие самостоятельно колеблющиеся участки, склонны давать более мягкие тембры, с малым количеством гармоник в спектре;

2) чем уже язычки, тем при одинаковой частоте их колебаний сила звука получается меньшей. Кроме того, узкие язычки более склонны разделяться на мелкие самостоятельно колеблющиеся участки, а потому и дают звуки более острых тембров, в спектрах которых присутствует большее число высоких гармоник;

3) чем ближе помещены язычки к периферии корпуса инструмента, в частности к его передней стороне, тем сильнее и ярче получаются звуки. Расположение язычков в глубине корпуса, или в задней его части, заметно ослабляет громкость звуков и смягчает их тембр;

4) разница в расположении язычков внутри инструмента (в горизонтальном, наклонном или вертикальном положении) оказывает безусловное влияние на свободу колебаний язычков, а следовательно и на силу и тембр их звуков;

5) форма изгибов пластинок язычков (прямые, дугообразные, в виде ложечек, с перекосом по одной стороне и т. п.) влияет на силу и тембр их звука, а также на их отзывчивость.

В фисгармониях и гармонумах не встречается необходимости применять добавочные гармонические регистры (микстуры и т. п.) для усиления яркости тембра в *tutti*, как это бывает необходимо в классическом органе, с его сравнительно бедными гармониками тембрами лабиальных труб. В то же время, фисгармонии и гармонумы не имеют остро звучащих «язычковых» тембров органа, так как бьющие язычки в них не применяются.

Звуковой объем больших инструментов этого типа может приближаться к объему классического органа, так как здесь также применимы регистры разных высот (от 32' до 2').

Акустическое влияние резонансных камер, присоединяемых к язычкам, в фисгармониях и гармонумах не велико. Их геометрические размеры, по сравнению с длинами волн издаваемых звуков, ничтожно малы; самое большее, чем они могут влиять на последние,—это усиливать некоторые высшие гармоники и увеличивать отзывчивость язычков в момент возникновения звука.

Звуковая атака (начало звука) у фисгармоний немецкого типа несколько жестче и определеннее, чем у гармонумов американского типа, где возникновение звуков более мягче и несколько запаздывает, в особенности на низких частотах.

Вследствие указанных технических и акустических особенностей фисгармонии и гармонумы не могут заменить классический орган в концертных аудиториях. Они могут выполнять



только роль суррогатных органоподобных инструментов в домашней обстановке и в качестве пособия для упражнения органистов<sup>1</sup>.

§ 4. Очень близко к классическому трубчато-язычковому органу, в отношении общего характера звука и тембров, стоят созданные в новейшее время электрические (или, как их вернее называют, электрофонные) органы. Некоторые из них представляют значительный интерес в акустическом отношении, так как они дают исполнителю возможность создавать самому разнообразнейшие тембры, как подражающие многим ранее известным нам инструментам и некоторым регистрам классического органа, так и дающие большое количество новых звуковых красок, никогда еще не воспроизводившихся ни на одном музыкальном инструменте.

В основе таких электрофонных органов лежит генерирование переменных электрических токов с частотами, соответствующими частотам основных тонов хроматической темперированной гаммы. Эти созданные в инструменте частоты являются материалом для последующего создания музыкальных звуков органоподобного (т. е. длящегося) характера, воспроизводимых при посредстве высококачественных динамических громкоговорителей, излучающих эти сложные колебания в виде звуков в аудиторию.

Впервые такой электрофонный органоподобный музыкальный инструмент был предложен и создан в США в 1904—1906 гг. инженером Т. Кэбиллом. Сложный, весьма громоздкий и дорогой «телегармониум» последнего просуществовал весьма недолго, так как он оказался очень несовершенным и неудобным в эксплуатации.

Успехи радиотехники, связанные с широким и разнообразным применением электронных ламп, позволили создать в последние десятилетия ряд более простых, компактных, сравнительно дешевых и более совершенных по характеру действия новых музыкальных инструментов органоподобного и иных типов. Эти инструменты, в зависимости от способов получения электрических колебаний, можно подразделить на три основные группы:

а) инструменты с вращающимися генераторами (альтернаторами);

б) инструменты с использованием ламповых колебательных контуров и

в) инструменты механо-электрического типа, использующие для генерации колебаний звучащие тела, применяемые в музыке.

§ 5. Основной особенностью электрофонных музыкальных инструментов с альтернаторами является возможность непо-

<sup>1</sup> Для этого строятся большие типы инструментов, с 2—3 мануалами и педальной клавиатурой органного типа.

средственного получения длящихся органоподобных звуков и легкость синтеза самых разнообразных тембров. Достигается это таким образом, что к основному колебанию, генерируемому альтернатором, в большей или меньшей степени примешивают колебания более высоких частот, соответствующие гармоникам данного основного тона. В результате смешения нескольких гармоник, на основании закона Гельмгольца, можно как имитировать тембры существующих музыкальных инструментов, так и создавать совершенно новые качества звуков.

Инструменты этого типа, носящие название электрофонных органов по преимуществу, довольно разнообразны по устройству и получили распространение, как некоторая замена сложных и дорогих трубчатых органов. Для снятия электрических колебаний в них использованы: электромагнитная индукция (орган Гаммонда), электростатический эффект (органы Комптона и Мидгли), а также фотоэлектрический способ («суперпиано» Шпильмана, «селлюлофон» Тулона, световой орган Вельте, «фото-на» Еремеева и др.).

Сравнительно сложное устройство механизма альтернаторных электрофонных органов, несмотря на ряд преимуществ их перед другими инструментами (устойчивость настройки, многообразие тембров и легкость управления ими), ограничивает их распространение. Кроме того, серьезные нарекания музыкантов вызывает жесткая атака звука у некоторых из этих инструментов, производящая впечатление щелчков и ударов в начале звуков.

§ 6. Электрические музыкальные инструменты с генерацией звуковых частот посредством ламповых колебательных контуров являются механически более простыми приборами. Однако простейшие приборы этого рода—одноголосные; для многоголосных инструментов этого рода количество колебательных контуров и сложность электрического устройства и управления ими также увеличиваются. Основным недостатком многих из этих инструментов является некоторая неустойчивость их настройки, а также ограниченное число тембров, которые можно в них осуществлять.

Из органоподобных инструментов этого рода следует упомянуть построенный во Франции орган с более чем 700 электронными лампами, а также разработанный московским изобретателем Симоновым электронный гармоний. В последнем достигнута достаточная устойчивость настройки, смягчена атака звука, а также имеется возможность изменения тембров на основе использования «формант»; кроме того, введено «двойное туше».

§ 7. В третьей группе электрофонных органоподобных инструментов в качестве генераторов колебаний музыкальных частот применены твердые упругие тела, с которых во время их колебаний снимаются соответствующие переменные токи. Так например, в электрическом органе Ранджера применены 12 хроматически настроенных камертонов, в диапазоне 32' ок-

тавы органа, возбуждаемых посредством электрического тока и непрерывно звучащих. С этих камертонов электромагнитным способом снимаются соответствующие колебания, которые затем удваиваются, учетверяются и т. д. посредством электрических удвоителей колебаний. Таким образом получается серия колебаний на весь диапазон музыкальных звуков. В процессе игры к основным колебаниям приращиваются соответствующие гармоника, и таким образом создаются некоторые органоподобные тембры.

В «Оргатроне» Эверетта, как мы уже указывали, колеблющимися телами являются язычки, подобные язычкам гармонума американского типа. Особыми иглоками с разных точек этих язычков электростатически снимаются основной тон и гармоника, которые затем смешиваются в соответствующие тембры. В отличие от других электрофонных органов, атака звука в «Оргатроне» получается очень смягченной и, пожалуй, даже слишком мягкой и запаздывающей, по сравнению с органом классического типа.

§ 8. Интересной особенностью электронного органа Гаммонда является синтез тембров из темперированных обертонов. Это осуществляется таким образом, что при нажатии каждая клавиша этого инструмента включает и посылает в дальнейшую сеть одновременно девять частот такого порядка (пример дан для клавиши с<sup>1</sup>):



Из них частота № 3 является основной для звука 8' высоты, а остальные более высокие тоны—2, 3, 4, 5, 6 и 8-й—гармониками от нее. Частоты №№ 1 и 2 являются «субгармониками» и относятся к 16' органному звуку.

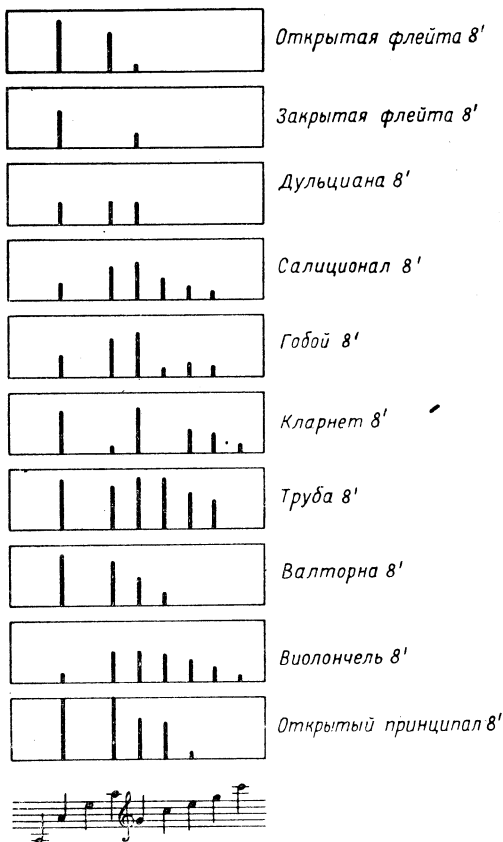
Особое устройство позволяет включать все девять частичных тонов в девяти ступенях громкости, по желанию музыканта. Таким образом, на основе формулы сочетаний и перестановок можно получить более 387 миллионов разных комбинаций, т. е. столько же разных музыкальных тембров.

Практика пользования тембровым механизмом органа Гаммонда показывает, что, несмотря на то, что 3-я и 6-я темперированные гармоника ниже чистых на — 2 цента, а 5-я гармоника выше соответствующей чистой на + 14 центов, все же наблюдается хорошее слияние их с основным тоном, при условии, если эти темперированные гармоника не слишком сильны. Здесь, повидимому, на помощь приходит «зонная» природа нашего слухового ощущения, смягчающая диссонантность сочетания не совсем кратных частичных тонов сложных звуков.

На рис. 68 приведены несколько синтетических спектров тембров, осуществляемых на органе Гаммонда, из числа многих, хорошо имитирующих «классические тембры органа и звуки некоторых оркестровых инструментов.

§ 9. Особый акустический эффект дает применяемый в некоторых моделях органа Гаммонда «хоровой регистр».

Сущность его действия состоит в наложении на основные частоты колебаний органа двух дополнительных групп частот: одной — на несколько колебаний меньшей, а другой — на несколько колебаний большей, чем соответственные основные частоты звуков органа. Таким образом, вместо чисто настроенных звуков мы услышим смесь трех звуков близких высот, наложенных друг на друга и сливающихся в слегка волнообразный, смягченный звук, похожий на звук унисона большого числа голосов (в хоре) или нескольких одинаковых инструментов (в оркестре).



приближающейся к атаке звука классического органа в достаточно реверberирующем помещении. Эти приспособления действуют таким образом, что усиленные электрические колебания подаются не непосредственно в громкоговорители, но на электромагнитную систему, раскачивающую стальную пружину или ленту, часто помещаемую в ванну с маслом определенной вязкости. Сообщенные пружине или ленте колебания, пройдя вдоль нее с некоторым смягчением, снимаются с ее другого конца пьезоэлектрическим или иным микрофоном, и, подвергшись вторичному усилению, реализуются в звуки в громкоговорителе.

Эффект, производимый этим маленьким приспособлением, приближается к действию большого объема воздуха в аудитории и сообщает звукам органа ту мягкость атаки и «воздушность», которые могут отсутствовать в условиях недостаточной реверберации в помещении.

§ 11. Особое значение в эксплуатации электрофонных музыкальных инструментов имеют механические и акустические качества громкоговорителей. Последние должны хорошо и по возможности равномерно отвечать на подводимые к ним импульсы на очень широком диапазоне частот, примерно от 32 до 8 000—10 000 к/с. Только при таких условиях можно рассчитывать на верную, не искаженную в тембровом отношении, передачу звуков музыкальных инструментов, вместе с их высокими обертонами.

В настоящее время технически еще невозможно построить такие совершенные громкоговорители; поэтому на практике звуковую передачу разделяют между двумя и более громкоговорителями, настраивая одни из них на хорошую передачу более низких частот, а другие—на хорошую передачу высоких и высших частот.

Замечено, что срезывание высоких частот в передаче мало влияет на звуки свистящих и языковых духовых инструментов; но на звуки скрипки оно влияет значительно, лишая эти звуки естественного блеска. Точно так же при этом передаются сильно искаженными звуки большинства ударных инструментов. В общем и целом, музыка, ограниченная верхней частотой в 5 000 к/с, звучит более мягко, чем естественная музыка.

Отсутствие низких частот, начиная от 150 к/с и ниже, не оказывает на тембр существенного влияния, так как недостающие низкие тоны восполняются разностными комбинационными тонами, возникающими в нашем ухе. Но на полноту звука срезывание низких частот оказывает заметное влияние, так как при слабости низких тонов музыка звучит жидко и жестко, в особенности в *pp*, которому глубокие основные тоны сообщают нужную широту и мягкость звучания. Звуки низких ударных инструментов при этом также сильно искажаются и превращаются в сухое хлопанье.

Количество и расположение громкоговорителей в аудитории имеет очень существенное значение для хорошей передачи

звуков органоподобных музыкальных инструментов. Малое количество звуковых точек неизбежно приводит к их перегрузке в *f* и *ff*, что вызывает неприятные искажения тембров. Кроме того, при одной звуковой точке в аудитории может появиться неприятный «точечный эффект» излучения звука. Вообще важно, чтобы звуковые колебания, излучаемые из громкоговорителей, прежде чем попасть в уши слушателей, могли многократно отразиться от стен, потолка и других частей аудитории и дойти таким образом до слушателей в смягченной форме.

---

## ИНСТРУМЕНТЫ С ВОРОНКООБРАЗНЫМИ МУНДШТУКАМИ

§ 1. Инструменты с воронкообразными мундштуками, изготавливаемые обычно из металла, представляют собой длинные трубки, узкие у места вдувания и постепенно расширяющиеся к выходному концу, оканчивающемуся раструбом плавного криволинейного очертания. Для игры на инструменте служит вставляемый в его устье особый наконечник — мундштук, к краям которого играющий прикладывает особым образом сложенные губы, возбуждающие колебания в столбе воздуха, наполняющем канал инструмента.

Относительно узкий и длинный, по сравнению с другими духовыми инструментами, столб воздуха амбушюрного инструмента легко делится на большое количество самостоятельно колеблющихся частей, что дает возможность исполнения на нем большого числа тонов натуральной гаммы. Так например, у большинства инструментов используются частичные тоны до 8—10-й гармоник, а у валторны даже до 16—20-й гармоники. Извлечение различных тонов натуральной гаммы достигается изменением степени натяжения губ музыканта, а также посредством увеличения или уменьшения давления, а следовательно, и скорости вдувания воздуха.

В новейшее время<sup>1</sup>, для возможности исполнения на инструментах, помимо натурального звукоряда, всех хроматических ступеней, а также игры во всех тональностях, к ним был присоединен, обычно в начальном узком участке их канала, механизм вентиля, переключающих, по желанию музыканта, ход воздуха в добавочные боковые каналы, увеличивающие начальную длину канала инструмента. В связи с включением того или иного вентиля звукоряд инструмента может быть понижен на различные интервалы, начиная от полутона до шести полутонов и более.

<sup>1</sup> Приблизительно с половины XIX в.

В некоторых инструментах (например, у цуг-тромбона) трубка инструмента имеет выдвижное колено, позволяющее плавно менять общую длину столба воздуха в широких пределах.

Канал инструмента, узкий вначале (в устье), состоит обычно из чередующихся цилиндрических и расширяющихся участков. У большинства инструментов начальная часть канала бывает коническая; далее следует средний цилиндрический участок, на котором помещается механизм клапанов с добавочными каналами<sup>1</sup>, а также приспособление для изменения основного строя инструмента в небольших пределах<sup>2</sup>; конечный участок канала инструмента расширяется вплоть до выхода, оканчиваясь широким криволинейным раструбом.

В зависимости от того, по какой кривой расширяется третий конечный участок канала инструментов с воронкообразными мундштуками, последние делятся на две основные категории:

а) инструменты с гиперболической мензурой, диаметры канала которых изменяются по формуле:  $d_x = \frac{a}{x+b} + c$

К этой группе относятся: труба, корнет, тромбон и валторна.

б) инструменты с экспоненциальной мензурой, диаметры канала которых изменяются согласно формуле:  $d_x = d_0 a^{x^3}$

К этой группе относятся инструменты типа саксофонов, т. е. флюгельгорн, альтгорн, теноргорн, баритон, эфониум и тубы (бас и контрабас).

Расширение канала по вышеприведенной формуле у этой группы продолжается почти до выхода, однако конечная часть канала, представляющая раструб, рассчитывается по гиперболической формуле; таким образом, раструб у них также представляет гиперболоид развертывания, плавно переходящий в экспоненциальную кривую.

В зависимости от способа расчета канала, относительной длины цилиндрического и нецилиндрического его участков, а также от внутреннего профиля мундштука, создается тот или иной тип тембра инструмента. В основном, тембры инструментов гиперболической группы отличаются большей яркостью и своеобразием, в то время как в семействе саксофонов мы имеем более полный и мягкий звук, тембровая характеристика которого мало изменяется при переходе от одного члена семейства к другому.

§ 2. В акустическом отношении все инструменты с воронкообразными мундштуками эквивалентны открытым лабиальным трубам; они дают при передувании полный ряд гармоник и имеют длину канала, приблизительно равную половине длины волны их основного тона.

<sup>1</sup> Комплекс механизма клапанов+добавочных каналов+механизма для управления клапанами носит название «голосовой машины».

<sup>2</sup> Так называемый «крон общего строя».

<sup>3</sup> а, b и с—параметры (постоянные), определяющие профиль канала и степень его расширения; в зависимости от типа и величины инструмента они варьируют в некоторых пределах.  $d_0$ —диаметр канала в точке перехода цилиндрической части в нецилиндрическую (экспоненциальную).



Более точный расчет длины канала инструментов с воронкообразными мундштуками получается по следующей эмпирической формуле, дающей хорошую степень приближения к желаемой высоте звука инструмента:

$$L = 0,5\lambda - \left( \frac{D + D_1}{2} + 1 \right),$$

где  $\lambda$  — длина волны основного тона инструмента,

$D$  — диаметр раструба на выходе,

$D_1$  — диаметр раструба на глубине  $\frac{D}{2}$  от выхода, и

$1$  — длина выступающей из устья инструмента части мундштука.

§ 3. В большинстве современных хроматических инструментов применяется трехвентильная голосовая машина. При включении первого вентиля она увеличивает длину канала инструмента приблизительно на  $1/8$ , понижая звукоряд инструмента на целый тон; при включении второго вентиля она увеличивает длину инструмента приблизительно на  $1/15$  и понижает звук на полтона; наконец, при включении третьего вентиля она увеличивает длину инструмента приблизительно на  $1/5$  и понижает звук на малую терцию. Применяя одновременное включение двух или трех вентилях, можно получить дальнейшее увеличение длины канала и дальнейшее хроматическое понижение звукоряда инструмента, вплоть до почти полных трех тонов (т. е. увеличенной кварты).

Теоретическое исследование и практические наблюдения показывают, что если мы рассчитаем длины голосовых каналов голосовой машины так, чтобы они понижали звуки инструмента точно на  $1$ ,  $1/2$  и  $1/2$  тона (т. е. на 200, 100 и 300 центов), то при совместном употреблении вентилях длина арифметически суммируемых голосовых каналов окажется недостаточной для получения дальнейшего хроматического понижения звука на 400, 500 и 600 центов. Все взятые в комбинациях вентилях звуки будут пониженными лишь на следующее число центов:

при комбинации 1 и 2 вентилях — на 289 центов  
 при комбинации 2 и 3 вентилях — на 384 цента  
 при комбинации 1 и 3 вентилях — на 470 центов  
 при комбинации 1, 2 и 3 вентилях — на 547 центов

Таким образом, сложение действия всех трех вентилях даст, вместо трех полных тонов, только

$$1 + 1/2 + 1/2 = 2^{3/4} \text{ тона!}$$

С целью некоторой компенсации этого естественного недостатка трехвентильной голосовой машины, применяют небольшое увеличение длин ее голосовых каналов, чтобы получить меньшее отклонение от нормы в сложных комбинациях вентилях. Одним из наиболее удачных компромиссных решений этого вопроса является применение голосовых каналов, дающих понижение на 205, 105 и 320 центов. В комбинациях они дадут следующие отклонения от нормальных темперированных интервалов:

1+2 вентиля — понижение на 299 центов  
 2+3 вентиля — понижение на 408 центов  
 1+3 вентиля — понижение на 492 цента, и  
 1+2+3 вентиля — понижение на 572 цента.

Таким образом, хроматический звукоярд инструмента значительно выравнивается: все интервалы, за исключением малой терции, берущейся на 3-м вентиле (мало употребительной) и увеличенной кварты, берущейся 1+2+3 вентилями, отклоняются от нормы меньше чем на полкоммы, и потому практически могут считаться вполне удовлетворительными. Несколько повышенный нижний звук увеличенной кварты может быть в известной степени выравнен посредством некоторого ослабления губных мышц. В первом же варианте построения голосовой машины отклонение этого звука на  $1/4$  тона такому выравниванию не поддается.

В инструментах низких строев (эвфониум, бас и контрабас) встречается необходимость получения некоторых добавочных тонов в интервале между основным тоном и увеличенной квартой от 2-го частичного тона. Для этого применяется четвертый вентиль, с каналом, понижающим звук инструмента на чистую кварту ( $2\frac{1}{2}$  тона).

Комбинируя четвертый вентиль с остальными, можно получить еще четыре добавочных звука; однако интонация их, вследствие еще сильнее проявляющегося противоречия между арифметическим сложением длин каналов и требуемыми удлинениями столба воздуха в геометрической прогрессии, получается не вполне удовлетворительной. В общем, при этом получаются следующие дополнительные звуки:

- 4 вентиль — чистая кварта (500 ц)
- 2+4 вентили — повыш. увелич. кварта (579 ц)
- 1+4 вентили — повыш. ч. квинта (662 ц)
- 1+2+4 вентили — пониж. ч. квинта (728 ц)
- 2+3+4 вентили — пониж. мал. секста (814 ц)
- 1+3+4 вентили — повыш. бол. секста (881 ц)

Две комбинации (3+4 и 1+2+3+4 вентили) дают звуки, лежащие между применяемыми в музыке ступенями, а потому не употребительны.

С целью устранения вышеописанных акустических дефектов, некоторые иностранные фабрики применяют систему шести независимых вентилях, дающих каждый в отдельности понижение на верные интервалы и не употребляемые в комбинациях. Английская фабрика Boosey and Hawkes применяет особую систему вентилях с добавочными компенсационными каналами, включающимися только при комбинациях вентилях и дополняющими недостающую суммарную длину каналов. Однако все эти системы очень усложняют конструкцию инструментов и значительно увеличивают их объем, вес и стоимость, почему и не находят широкого распространения, несмотря на очевидные акустические преимущества перед обыкновенными трех- и четырехвентильными системами.

§ 4. Мундштук является одним из важнейших элементов «амбушюрного» инструмента, определяя в значительной степени условия звукообразования и формирования тембра инструмента. Современный мундштук в основном состоит из двух отделов: чашки и выходного канала, между которыми находится самое узкое место канала — устье. Чашка мундштука имеет широкие, слегка закругленные или плоские края, на которые музыкант опирает губы во время игры. Нижний конец мундштука обточен снаружи в виде конуса, которым он плотно вставляется в носок инструмента.

Размеры и профиль чашки мундштука являются важными факторами, определяющими процесс звукообразования. Согласно Ричардсону, устье мундштука является местом, где возникают «краевые» тоны и вихревые движения. Поэтому на мундштук «амбушюрного» инструмента распространяются все формулы, определяющие процесс возникновения «краевых» тонов (см. главу VIII этого отдела).

Наибольший диаметр чашки мундштука (D) приблизительно обратно пропорционален квадратному корню из числа колебаний основного тона инструмента. Так например, средняя величина D для сопрановой трубы in B равна 16,5 мм, а для контрабасовой тубы in B, основной тон которой на две октавы ниже,  $D=32-33$  мм.

Что касается диаметра устья (d), то почти для всех видов инструментов он равен около 0,23 D, каковая величина найдена опытным путем, так как при этом получается наилучшее качество звука. Только для валторны величина d несколько больше, составляя около 0,27D.

Глубина чашки мундштука (h) варьирует у разных инструментов. В среднем она равна:

для саксорнов—около 1,15 D  
для трубы — около 0,9 D  
для корнета — около 1,0 D  
для тромбона — около 1,1 D  
для валторны — около 2,0 D

Абсолютная величина глубины чашки определяет большую или меньшую легкость образования «краевых» тонов той или другой высоты: чем меньше h, тем легче извлекать высокие звуки, и наоборот.

Выгодность применения больших D для мундштуков низко звучащих инструментов оправдывается тем, что при увеличении D увеличивается площадь, объем и масса действующей части губ играющего, вследствие чего, при сохранении одинаковой степени их натяжения, частота их колебаний понижается.

Если предположить, что масса губ человека на единицу их действующей площади колеблется в узких пределах (т. е. приблизительно постоянна), то можно считать, что для нормально рассчитанных мундштуков произведение действующей массы губ на частоту колебаний основного тона инструмента должно оставаться постоянным, независимо от размеров инструмента и мундштука, т. е.

$$Mf = \text{const.}$$

Механизм звукообразования в мундштуке «амбушюрного» инструмента может быть объяснен следующим образом.

Натянутые мускулатурой лица играющего губы образуют сомкнутую щель. Продуваемый сквозь нее воздух приводит края губ в вибрацию в плоскости, перпендикулярной к направлению потока. Вследствие этого вхождение воздуха в чашку мундштука происходит не непрерывной струей, а периодическими толчками. При проходе воздуха с некоторой средней скоростью через устье мундштука, в струе возникают вихревые движения (рис. 42), создающие попеременные сгущения и разрежения воздуха, в связи с чем в канале инструмента возникает стоячая волна, соответствующая основному тону или одной из его гармоник.

Пользуясь приведенной в § 2 главы VIII этого отдела формулой «краевого» тона, мы можем вывести, что скорость истечения воздуха в

чашке мундштука прямо пропорциональна произведению глубины чашки на число колебаний полученного звука, т. е.  $V = a/h$ , где  $a$  — некоторый коэффициент, зависящий от природы данного газа (воздуха).

Таким образом, увеличивая или уменьшая  $V$  музыкант может изменять частоту «краевого» тона, которая окончательно регулируется резонансной надставкой, т. е. объемом воздуха в канале инструмента.

В свою очередь,  $V$  зависит от давления воздуха в дыхательных путях и во рту играющего. Теоретически, избыток давления воздуха в последних над атмосферным давлением прямо пропорционален квадрату скорости вдвухания. Отсюда ясно, что, желая получить более высокий звук, музыкант должен усилить давление воздуха в своих дыхательных путях, для того, чтобы повысить  $V$ . Если он, например, желает повысить звук на октаву, то он должен увеличить давление воздуха в своих дыхательных путях в четыре раза, а на всем игровом диапазоне инструмента, который доходит до  $2\frac{1}{3}$ — $2\frac{1}{2}$  октав, он должен изменять давление воздуха примерно в 20—25 раз<sup>1</sup>.

Одновременно с этим музыкант должен усиливать натяжение губ, чтобы повысить частоту их колебаний и привести ее в соответствие с высотой желаемого звука, а вместе с тем и усилить сопротивляемость губной щели раскрытию под усилившимся давлением воздуха.

Беря произведение частоты колебаний звука инструмента на глубину чашки его мундштука, мы получаем характеристику величины  $V$ , а беря квадрат полученной условной скорости, мы получаем теоретическую величину, пропорциональную потребному давлению воздуха. Эти две величины, взятые для крайних значений частот (т. е. для самого низкого и самого высокого звука в диапазоне данного инструмента), дают объективную характеристику игровых свойств данного мундштука и позволяют сравнивать друг с другом разные типы и модели мундштуков.

Для полноты характеристики мундштуков целесообразно добавить сюда еще две величины, также объективно характеризующие игровые качества мундштуков: 1) теоретическую величину расхода воздуха в единицу времени, определяемую произведением площади устья мундштука на скорость вдвухания и 2) коэффициент натяжения губ музыканта, пропорциональный произведению  $Df$ . Беря максимальные и минимальные значения этих величин для крайних звуков диапазона данного инструмента, мы получаем таким образом четыре пары объективных характеристик игровых качеств мундштука.

Практика показывает, что полученные теоретические характеристики весьма хорошо согласуются с субъективными ощущениями музыкантов.

<sup>1</sup> Бартон и Лас, измеряя величину давления воздуха во рту музыканта при помощи манометра, нашли, что:

а) давление возрастает пропорционально логарифму числа колебаний, если сила звука остается постоянной, и

б) при постоянной высоте звука, вместе с его усилением растет и давление воздуха.

Стон, на основании подобных же опытов, нашел следующие колебания давления во рту музыканта для различных звуков духовых инструментов (в сантиметрах водяного столба):

корнет . . . . .	25,4 — 86,2 см
труба . . . . .	30,5 — 84,0 см
валторна . . . . .	12,7 — 68,5 см
туба . . . . .	7,6 — 101,6 см.
баритон . . . . .	7,6 — 91,4 см

Отсюда можно видеть, что максимальная величина давления во рту музыканта может достигать 0,1 атмосфер.

Профиль чашки мундштука (рис. 69), т. е. относительные величины радиусов образующих его дуг ( $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ ), определяет большую или меньшую степень его внутренней обтекаемости. В особенности большое влияние на последнюю оказывает величина  $R_3$ , т. е. радиус глубокой части чашки, при переходе ее в устье.

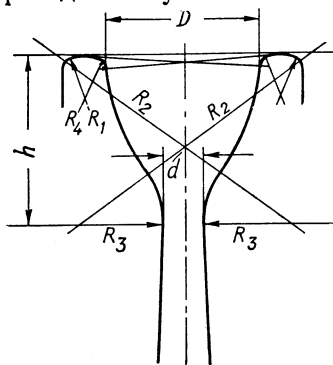


Рис. 69

Наблюдения показывают, что чем больше относительная величина  $R_3$ , тем более обтекаемой получается форма чашки и устья, и тем полнее и мягче становится тембр звука инструмента. И наоборот, чем меньше относительная величина  $R_3$ , тем менее обтекаемой становится чашка мундштука, а получаемый звук приобретает яркий, резкий и даже крикливый тембр.

В первом случае, для которого наиболее типичным является глубокий воронкообразный мундштук валторны, в возникающей звуковой волне рождаются преимущественно обертоны низких номеров, интенсивность которых, по мере увеличения порядкового номера, постепенно убывает. Во втором случае, для которого типичен мелкий, плохо обтекаемый, чашевидный мундштук трубы, в возникающей звуковой волне наблюдается много сильных гармоник высоких номеров, за счет ослабления низких гармоник. Инструменты типа саксгорнов по степени обтекаемости мундштуков и по характеру даваемого ими тембра занимают промежуточное положение между двумя крайними указанными типами; степень обтекаемости мундштука тромбона близка к мундштуку трубы, но несколько более последнего; степень обтекаемости мундштука корнета находится приблизительно по середине между таковой у мундштуков трубы и саксгорнов.

Преимущественное влияние формы чашки мундштука и степени его внутренней обтекаемости на образование тембра инструмента доказываются опытами применения для одного и того же инструмента мундштуков различных типов. Ставя глубокий мундштук валторны на трубу, мы получаем мягкий, даже тусклый тембр звука; наоборот, ставя мундштук трубы на валторну, мы получаем резкий, острый и даже крикливый тембр. Вставляя в контрабасовую трубу мелкий и небольшой по диаметру мундштук трубы, мы можем извлечь из нее звуки второй и даже третьей октавы, при одновременном увеличении резкости тембра и при невозможности извлечь звуки низкой половины диапазона этого инструмента. Наоборот, применяя большой и глубокий мундштук трубы к трубе, мы сможем с большим трудом извлечь из нее лишь несколько наиболее низких звуков, при смягченном и несколько заглушенном тембре; получение звуков верхней половины диапазона трубы с таким мундштуком окажется невозможным.

Правильный подбор величины и формы мундштука для данного типа инструмента является поэтому весьма важным.

Помимо мундштука, форма чашки которого является главным из факторов, определяющих и формирующих тембр «амбушюрного» инструмента, значительную роль в образовании его тембра играет профиль раструба, колебание воздуха в котором привносит в тембр инструмента некоторую форманту.

Правильность этого была нами однажды проверена на опыте с валторной, у которой чашка раструба была съемной. Отвинчивая и снимая ее, мы получили звук почти нормальной высоты<sup>1</sup>, но тембр его резко изменился, став тупым, лишенным того приятного своеобразия, которое характеризует звуки этого инструмента, и напомнил звуки сигнального военного или охотничьего рожка, у которого раструб обычно почти лишен разводки и переход в атмосферу совершается довольно внезапно.

§ 5. Труба является сопрановым типом инструментов с воронкообразными мундштуками, с гиперболической мензурой.

Чаще всего употребляемая труба in B имеет в развернутом виде длину канала около 1,31—1,315 м, при диаметре цилиндрической части около 11—11,5 мм и наибольшем диаметре раструба на выходе 120—125 мм. Протяженность ее среднего цилиндрического участка составляет 0,27—0,4 ее общей длины.

Мундштук трубы (рис. 70) имеет небольшую, сравнительно мелкую чашечку, по форме приближающуюся к полушару, с резко выраженным переходом в устье. Средний диаметр чашки  $D = 16,5$  мм.

Для хроматического изменения высоты звуков применяется трехвентильная голосовая машина нормального типа (см. § 3 этой главы).

Звук трубы, яркий и блестящий, характеризуется, согласно исследованиям Э. Мейера, большим количеством обертонов (свыше 25), амплитуда которых достигает максимума в области 3—8-й гармоник, медленно убывая в обе стороны (рис. 71).

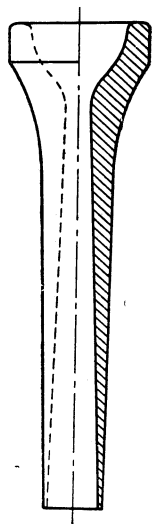


Рис. 70

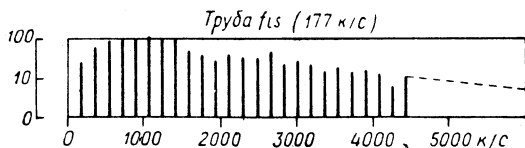


Рис. 71

<sup>1</sup> Это весьма хорошо согласуется с приведенной нами в § 2 этой главы основной формулой для расчета практической длины инструмента.

Германн-Гольдап, исследуя звуки трубы в диапазоне  $b$ — $b^{\sharp}$  нашел у нее широкую область сильных преобладающих частот (форманты), простирающуюся от  $b$  до  $c^{\sharp}$ . Амплитуда этих частот была равна от 3,3 до 8,0 амплитуд от основного тона.

Уровень громкости трубы весьма значителен и доходит в  $ff$  до 90 дб.

§ 6. Тромбон принадлежит к тенорово-баритоновому типу инструментов с гиперболической мензурой. В этом отношении он родственен трубе, отличаясь от последней значительным протяжением цилиндрического участка (до 0,7 от общей длины). Современный теноровый тромбон in B имеет в развернутом виде длину канала около 2,7 м, при диаметре цилиндрической части около 13—14 мм, и при наибольшем диаметре раструба на выходе около 200—210 мм.

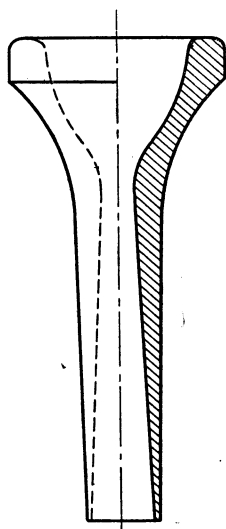


Рис. 72

Мундштук тромбона имеет чашку среднего диаметра ( $D=25,0$  мм), пропорционально несколько более глубокую, чем у мундштука трубы, но также приближающуюся к форме сферического котелка (рис. 72). Переход из чашки в устье довольно резко выражен.

Для изменения высоты звуков в тромбоне применяется выдвижное колено (кулиса, цуг). Выдвигая его на различную длину, музыкант может изменять длину канала тромбона в очень широких пределах. Благодаря такому устройству тромбон, в противоположность остальным хроматическим (вентильным) амбушюрным инструментам, является инструментом со свободной, непрерывно изменяющейся интонацией и допускает исполнение глissандо и вибрато.

Другая, также употребляемая в современном оркестре, разновидность — тенор-басовый тромбон, устроенный аналогично предыдущему, имеет добавочный канал длиной около 0,975 м, который по желанию играющего может быть включен посредством особого «кварт-вентилия». При этом основная длина канала тромбона увеличивается до 3,675 м, а его основной строй и все производные звуки понижаются на кварту. Для достижения более мощного звука и более фундаментального тембра диаметр цилиндрической части этого типа тромбона делается несколько большим (около 13,5—15 мм), а также и увеличивается диаметр раструба на выходе (до 230—240 мм).

Тембр тромбона, определяемый формой его мундштука, гиперболической формой раструба и узостью и протяженностью его цилиндрической трубки, характеризуется весьма значи-

тельным количеством гармоник (до 40). По исследованию Э. Мейера, в основном (педальном) тоне  $B_1$  амплитуды 1—20-й гармоник приблизительно одинаковы, с небольшими провалами на 3, 6 и 12-й гармониках, выше же они быстро убывают (рис. 73).

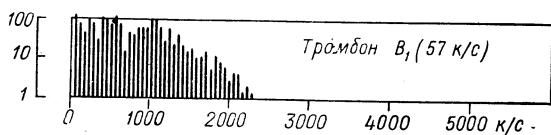


Рис. 73

Германи-Гольдап, исследуя звуки тромбона в диапазоне  $g—a$  и  $d^1—f^1$ , нашел в его тембре довольно сильную форманту, с частотой около 465—590 к/с ( $b^1—d^2$ ). Амплитуда этой форманты составила от 1,14 до 1,75 от амплитуды основного тона.

Уровень громкости звука тромбона весьма значителен, доходя в  $ff$  до 90 дБ.

§ 7. В а л т о р н а принадлежит к альтово-теноровому типу инструментов с гиперболической мензурой, хотя на ней возможно извлечение и более низких звуков баритонового и басового регистра (педальные звуки). От других оркестровых инструментов с воронкообразными мундштуками валторна отличается весьма длинной (около 3,65 м) и сравнительно узкой трубкой, с очень широко развернутым раструбом. Диаметр цилиндрической части ее канала всего лишь около 12 мм, при длине его около 0,45 общей длины инструмента, а диаметр раструба на выходе — около 305—310 мм.

Мундштук валторны имеет глубокую конусообразную или приближающуюся к профилю шейки бутылки форму, с весьма плавным и постепенным переходом в устье (рис. 74). По диаметру чашки ( $D=17—17,5$  мм) он близок к мундштуку трубы, по глубине же приближается к мундштуку тубы.

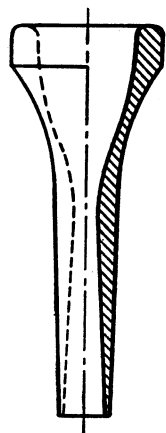


Рис. 74

Узкий и длинный столб воздуха, заключенный в канале валторны, легко разделяется на большое число колеблющихся частей, благодаря чему на ней можно извлекать большое число тонов натурального звукоряда (до 16—20-й гармоник). Возможность получения столь высоких номеров гармоник облегчается малым диаметром чашки мундштука; последний делает затруднительным извлечение низких (педальных) тонов, воспроизведение которых требует от музыканта особой тренировки губного аппарата.



Обыкновенная хроматическая валторна in F имеет для изменения высоты звуков обычную трехвентильную голосовую машину нормального типа. В более усовершенствованной и универсальной двойной валторне in F—B имеется дополнительный вентиль, уменьшающий, посредством выключения части основного канала, общую длину его до 2,675 м и изменяющий одновременно ход воздуха в вентилях и каналах голосовой машины. Последние имеют два ряда голосовых каналов, так что при действии четвертого вентиля воздух идет по второму ряду более коротких голосовых каналов, соответствующих строю B. Валторна звучит тогда на кварту выше ее обычного строя.

Тембр валторны, благодаря глубокому, хорошо обтекаемому мундштуку, очень мягок и характеризуется, согласно Э. Мейеру, исследовавшему ее 2-й натуральный тон, небольшим числом гармоник (12), имеющих максимум амплитуды на 3—4-й гармониках и быстро убывающих в обе стороны (рис. 75).

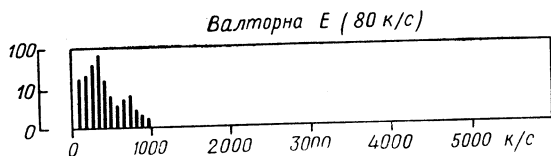


Рис. 75

Германн-Гольдап, исследуя звук  $C_1$ , нашел в нем довольно сильную форманту в области 465—1 000 к/с ( $b-c$ ). Амплитуда ее составляла 1,0—1,75 от амплитуды основного тона.

Уровень громкости звука валторны—умеренный, доходя в *ff* только до 85 дБ; при этом, однако, приходят в колебание относительно тонкие стенки инструмента и звук приобретает резкий, звенящий оттенок.

Особый, специфический для валторны прием игры заключается во введении кисти правой руки в глубину раструба. При этом рука играет роль сурдины, сильно заглушая колебания и понижая общую высоту звука примерно на полтона. Тембр инструмента при этом также сильно изменяется, характеризуясь значительным ослаблением основного тона и срезыванием ряда высоких гармоник.

§ 8. Туба является басовым или контрабасовым типом инструментов семейства саксгорнов, т. е. имеющих экспоненциальную мензуру. Чаще всего применяемая в современном оркестре контрабасовая туба in B имеет длину канала в развернутом виде около 5,48—5,5 м; при диаметре цилиндрической части  $d=20-21$  мм и при наибольшем диаметре раструба на выходе около 400—420 мм. От других амбушюрных инстру-

ментов современного оркестра туба отличается незначительной относительной длиной среднего цилиндрического участка (менее 0,1 длины всего канала).

Мундштук тубы имеет чашку в форме широкой округленной рюмки умеренной глубины.  $D$  чашки=32—33 мм. Переход из чашки в устье более плавный, чем у мундштуков трубы и тромбона (рис. 76).

Для изменения высоты звуков в тубе предпочтительно применяется четырехвентильная голосовая машина, а в некоторых новейших французских типах употребляются 5 и даже 6 вентиляй; это вызывается тем, что при игре басов встречается необходимость в более верной интонации и часто требуется извлечение некоторых низких звуков в интервале между 1 и 2-й гармониками.

Натуральный звукоряд тубы представляет любопытную акустическую особенность: на ней довольно легко извлекается, как достаточно определенный и устойчивый тон, звук, лежащий между основным тоном и его второй гармоникой, на квинту ниже последней:

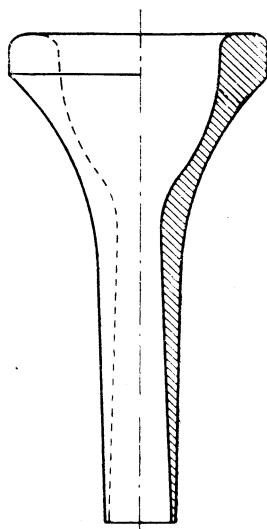


Рис. 76



От этого добавочного тона, посредством применения вентиляй, можно получать производные хроматические звуки почти так же хорошо, как и от остальных натуральных звуков звукоряда тубы, чем некоторые музыканты и пользуются для извлечения низких тонов контр- и субконтротавы.

Эта акустическая особенность, кроме тубы, свойственна еще баритону—инструменту из того же семейства саксгорнов, но звучащему на октаву выше тубы *in B*. Извлечение этого добавочного натурального звука невозможно как у инструментов гиперболического типа мензуры, так и у меньших представителей семейства саксгорнов (т. е. от теноргорна и выше).

Звук тубы характеризуется густотой, полнотой и значительной мягкостью, хотя в последнем отношении он заметно уступает звуку валторны. Исследуя ее тембр, Э. Мейер нашел для звуков  $E_1$ — $F_1$  наличие только 13—14 обертонов (рис. 77).

Максимальную амплитуду имеет 3-я гармоника, в то время как амплитуда основного тона бывает иногда несколько понижена. Преобладающими являются 2—8-я гармоники, при небольшом понижении силы четных гармоник; амплитуды 9-й

и высших гармоник резко убывают до нуля. В этом отношении спектр звука трубы близок к спектру звука валторны, отличаясь от последнего большей силой 7—10-й гармоник.

Уровень громкости звука трубы довольно значителен, доходя в *ff* примерно до 88 дб.

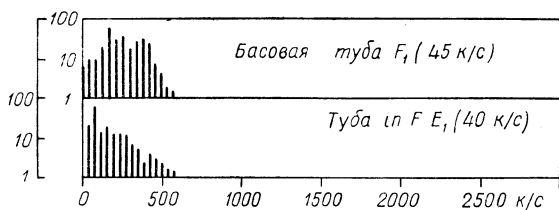


Рис. 77

§ 9. Остальные члены семейства саксгорнов (сопрановый флюгельгорн, альтгорн, теноргорн и баритон), применяющиеся преимущественно в духовых оркестрах («банда»), сходны с вышеописанными трубами как по строению, так и по характеру звука. Интересно отметить, что величина параметра «а» в формуле, характеризующей расширение их канала по экспоненциальному закону, прогрессивно увеличивается, по мере уменьшения инструмента и укорочения его канала. Это изменение степени расширения канала является необходимым для сохранения сходства тембра инструментов этого семейства.

Тембр звука всех этих инструментов характеризуется достаточной мягкостью и полнотой, возрастающей соответственно увеличению (т. е. расширению) мензуры инструментов. Сравнение тембров трех построенных в унисон, но различно рассчитанных сопрановых инструментов—трубы, корнета и флюгельгорна — показывает, что соответственно постепенному расширению средней мензуры этих инструментов убывает блеск и резкость в звуке и возрастает мягкость и глубина. То же самое мы наблюдаем в трех других звучащих в унисон, но различно мензурированных инструментах — тромбоне, теноргорне и баритоне. Здесь также расширение мензуры влечет за собой постепенное смягчение и углубление тембра. В особенности большую глубину и полноту звука имеет широкая разновидность баритона—э в ф о н и у м, применяемая в больших духовых оркестрах для исполнения высокой басовой партии и называемая, вследствие особой густоты и сочности звука, «малым басом» оркестра.

§ 10. Закономерности в изменении тембра музыкальных инструментов. Исследования Б. Янковского, проведенные им в 1930-х гг. на большом количестве осциллограмм разнообразных музыкальных инструментов, показали, что в отношении изменения тембра музыкальных ин-

струментов наблюдаются определенные, устойчивые закономерности.

Так например, установлено, что тембр звука каждого музыкального инструмента является наиболее сложным и богатым для его нижних звуков; по мере повышения звуков, количество обертонов в их спектрах постепенно убывает, начиная с высших номеров гармоник. У самых высоких звуков, кроме основного тона, в спектре остаются иногда только одна-две ближайшие гармоники.

Далее, может считаться вполне доказанным, что сопрановые инструменты имеют более простые и бедные спектры звуков, чем аналогичные им инструменты более низкой тесситуры. Наиболее богатые гармониками спектры наблюдаются у басовых инструментов.

Эти положения относятся к музыкальным инструментам всех оркестровых групп, всех родов звучащих тел и разных способов звуковозбуждения. Обеднение тембров инструментов, по мере повышения звуков, может быть объяснено следующими физическими причинами:

а) у инструментов с твердыми звучащими телами (пластинки, бруски, перепонки, струны и т. д.) отношение длины к поперечнику, по мере повышения звуков, уменьшается, что вызывает уменьшение гибкости и одновременное увеличение жесткости этих звучащих тел. А это, в свою очередь, ведет к тому, что способность таких относительно коротких и толстых, а потому и более жестких тел к разделению на самостоятельно и одновременно колеблющиеся участки уменьшается, что и вызывает сокращение числа гармоник в их спектрах, т. е. обеднение тембра;

б) в духовых инструментах, где звучащими телами являются столбы воздуха, сокращение длины последних, по мере повышения звука, приводит также к неблагоприятному для деления воздушного столба на участки и для возникновения гармоник соотношению длины и поперечника, что в конечном итоге также приводит к обеднению тембра звуков этих инструментов, по мере их повышения.

Указанные общие положения хорошо иллюстрируются спектрами звуков различных музыкальных инструментов, приведенными во втором разделе настоящего руководства.

---

## Глава двенадцатая

### ГОЛОСОВОЙ АППАРАТ ЧЕЛОВЕКА

§ 1. Голосовой аппарат человека состоит из трех основных частей:

- 1) легких с дыхательными путями,
- 2) гортани с голосовыми связками,
- 3) резонаторных полостей: глотки, рта, носоглотки и полости носа (надставная труба).

Легкие представляют собой скопление микроскопических полостей—альвеол, расширяющихся и наполняющихся воздухом при вдыхании. Эти полости связываются мельчайшими каналами, которые, постепенно расширяясь, образуют систему бронхов. Бронхи правого и левого легкого соединяются в трахею, состоящую из 18—20 хрящевых колец, соединенных перепончатыми связками, и заканчивающуюся гортанью. При вдохе грудная клетка, посредством вдыхательных мышц, расширяется, опускается грудобрюшная преграда и легкие заполняются воздухом. При спокойном выдохе происходит расслабление вдыхательных мышц, грудь опускается, и воздух удаляется из легких. При активном выдохе грудная клетка дополнительно опускается, благодаря сокращению выдыхательных мышц, и грудобрюшная преграда поднимается. Постепенное расслабление и поднятие вверх грудобрюшной преграды (диафрагмы) является очень важным фактором при активном выдохе. Этот тип дыхания носит название абдоминального, и именно данный тип дыхания особенно существенен при пении. В нормальном состоянии дыхание происходит бессознательно, но при желании мы можем управлять им по своему усмотрению.

Количество воздуха, которое человек может выдохнуть после глубокого вдоха, составляет 3 500—4 500 кубических сантиметров. При спокойном дыхании вдыхается и выдыхается обычно 500 см<sup>3</sup>. Расход воздуха при пении составляет 50—100 см<sup>3</sup> в секунду, у хороших певцов—еще меньше. При обыч-

ном, не поставленном голосе расход воздуха возрастает с увеличением силы воспроизводимого звука так:

при piano 100 см<sup>3</sup>/сек.  
при mezzo-forte 200 см<sup>3</sup>/сек.  
при forte 300 см<sup>3</sup>/сек.

У певцов получается иная картина:

при piano 400 см<sup>3</sup>/сек.  
при mezzo-forte 100 см<sup>3</sup>/сек.  
при forte 200 см<sup>3</sup>/сек.

Гортань представляет собой полость, покрытую с внутренней стороны слизистой оболочкой и состоящую из четырех хрящей: щитовидного, перстневидного и двух черпаловидных. Хрящи соединены между собой связками и снабжены мышцами; с возрастом хрящи постепенно окостеневают. Внутренняя стенка гортани, являющаяся продолжением дыхательного горла, кверху все время суживается, образуя так называемый эластический конус, заканчивающийся узкой щелью, которая называется голосовой щелью. В спокойном состоянии голосовая щель имеет вид треугольника, при глубоком дыхании она расширяется. Вид на голосовую щель показан на рис. 78.

Голосовая щель образуется краями голосовых связок или, по терминологии Музехольда, голосовых губ, состоящих из очень эластичной ткани. С передней стороны голосовые связки прикреплены к щитовидному хрящу, с противоположного конца — одна связка сращена с голосовым отростком одного черпаловидного хряща, другая — с голосовым отростком другого черпаловидного хряща. Когда черпаловидные хрящи, посредством соответствующих мышц, поворачиваются вокруг своей оси, удаляясь или приближаясь друг к другу, — голосовые связки более или менее натягиваются и голосовая щель становится шире или уже. Натяжение голосовых связок происходит посредством сокращения мышц, лежащих спереди между щитовидным и перстневидным хрящами.

Выше голосовых связок находятся мешковидные углубления, которые называются морганиевыми желудочками; верхние края морганиевых желудочков образуют так называемые ложные голосовые связки, между которыми находится щель, наподобие голосовой щели. Общие места прикрепления ложных и истинных голосовых связок способствуют тому, что лож-

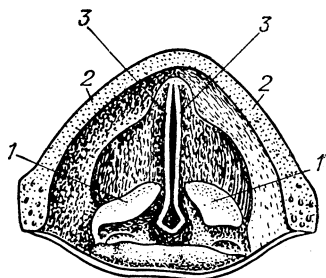


Рис. 78

1 черпаловидные хрящи, 2 сечение щитовидного хряща, 3 голосовые связки

ные связки двигаются подобно истинным при голосообразовании и дыхании, но располагаются на значительно большем расстоянии друг от друга, равно примерно 6—7 мм, и поэтому не препятствуют наблюдению истинных голосовых связок из полости рта. По последним исследованиям морганиевы желудочки могут служить резонатором для высоких частичных тонов голоса (формант). Для предохранения гортани от попадания пищи при глотании вход в гортань закрывается надгортанником — треугольной пластиной с хрящевой основой. Разрез гортани показан на рис. 79.

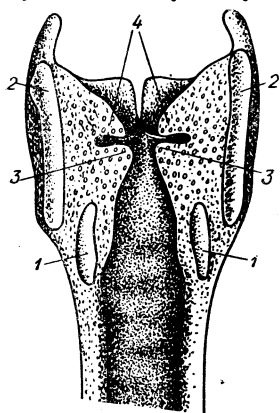


Рис. 79

1 сечение перстневидного хряща, 2 сечение щитовидного хряща, 3 голосовые связки, 4 ложные голосовые связки

Рот представляет собой полость, ограниченную мягкими поверхностями (нёбо, язык, боковые стенки), с большим отверстием во внешнее пространство. Благодаря подвижности нижней челюсти и языка полость рта может в довольно больших пределах менять свою форму и объем. Полость носа ограничена, главным образом, хрящевыми образованиями; через носоглотку она связывается с полостью рта.

§ 2. Функции частей голосового аппарата сводятся к следующему: легкие исполняют роль мехов, нагнетающих воздух в дыхательное горло, голосовые

связки являются возбудителями колебаний, а полости глотки, рта и носа — резонаторами.

Обычное сравнение голосового аппарата с язычковыми инструментами очень не точно. Голосовые связки могут удлиняться, укорачиваться, утолщаться, работая краями или всей своей массой. Смыкаясь и размыкаясь, они прерывают струю воздуха, подаваемую легкими через дыхательное горло в гортань. Эти быстрые прерывания струи воздуха создают периодические воздушные толчки, возбуждающие надгортанное пространство и порождающие звук.

Высота звука человеческого голоса зависит от длины голосовых связок, от их натяжения (внешнего и внутреннего) и от их упругости. Внешнее натяжение происходит вследствие сокращения мышц гортани, растягивающих голосовые связки и этим увеличивающих их натяжение. Внутреннее натяжение происходит за счет сокращения самих связок, что осуществляется при помощи особого так называемого голосового мускула, заложенного в каждой связке. Голосовой мускул отличается от всех других тем, что в нем начинается и оканчивается большое число волокон, идущих в самых разнообразных направлениях; благодаря этому он способен при сокраще-

нии многообразно менять свою форму и соответственно менять длину, толщину и ширину голосовых связок. Изменение натяжения голосовых связок внутренним и внешним образом и незначительная, но все же очень существенная, возможность изменять их длину позволяют воспроизводить то большое количество звуков, которое укладывается в диапазоне человеческого голоса.

Исследования Феррейна и Иоганна Мюллера, произведенные с мертвой человеческой гортанью, показали, что число колебаний голосовых связок, при изменении их натяжения и длины, примерно подчиняется законам колебания струн. Для голосовых связок невозможно установить строго математические соотношения между их физическими свойствами и частотой, потому что они состоят из очень неоднородной ткани. Но все же можно установить какую-то примерную зависимость. Феррейн показал, что число колебаний связок обратно пропорционально их длине. Мертвые голосовые связки, при укорачивании их наполовину, дают октаву и т. д. Иоганн Мюллер, изменяя натяжение голосовых связок, установил, что числа их колебаний изменяются в квадратной зависимости при изменении их натяжения. Правда, звуки, издаваемые голосовыми связками, были ниже теоретически вычисленных, но сохранялось то же соотношение между частотой и натяжением, какое имеется для струн. Сравнивая таким образом голосовые связки и струну, не надо забывать, что в живой человеческой гортани процесс значительно усложняется, так как изменение высоты звука происходит за счет комбинированных действий внешне-го и внутреннего натяжения и изменения длины связок.

Длина голосовых связок у мужчин 20—25 мм, у женщин — 15—20 мм. Этим объясняется то, что женские голоса звучат вообще выше мужских. Низкие голоса обычно имеют более длинные голосовые связки, высокие — более короткие. Из этого правила имеются исключения: Собинов и Карузо имели слишком длинные голосовые связки, необычные для теноров.

Человеческий голос может изменять высоту при пении примерно в пределах двух октав и больше. Ниже приведены диапазоны певческих голосов, причем взяты средние величины, которые могут быть перекрыты отдельными певцами.

Бас	от <i>E</i> (большой октавы)	до <i>f</i> <sup>1</sup> (1-й октавы)
Баритон	от <i>A</i> (большой октавы)	до <i>gis</i> <sup>1</sup> (1-й октавы)
Тенор	от <i>c</i> (малой октавы)	до <i>c</i> <sup>2</sup> (2-й октавы)
Контральто	от <i>f</i> (малой октавы)	до <i>g</i> <sup>2</sup> (2-й октавы)
Меццо-сопрано	от <i>as</i> (малой октавы)	до <i>b</i> <sup>2</sup> (2-й октавы)
Сопрано	от <i>c</i> <sup>1</sup> (1-й октавы)	до <i>c</i> <sup>3</sup> (3-й октавы)
Колоратурное сопрано	от <i>c</i> <sup>1</sup> (1-й октавы)	до <i>e</i> <sup>3</sup> (3-й октавы)

§ 3. Исследование механики голосовых связок, особенно стробоскопические и ларингоскопические работы Музехольда,



показали, что голосовые связки могут совершать два вида резко отличающихся друг от друга колебаний, соответствующих грудному голосу (грудному регистру) и фальцету. При грудном голосе связки колеблются целиком, всей своей массой; они очень плотно примыкают друг к другу, пока сила воздушного давления снизу не раздвинет их на один момент, после чего связки опять плотно смыкаются, и т. д. Длительность их смыкания значительно превосходит время их размыкания. При более тихом звуке они смыкаются менее плотно. Эти периодические резкие толчки воздуха приводят в звуковые колебания надгортанное пространство и дают очень полный звук, богатый обертонами, амплитуда которых слабо убывает с увеличением высоты обертонов, что придает тембру голоса «металлический» оттенок. При таком звуке передняя грудная стенка приходит в сильное сотрясение, осязаемое рукой, поэтому данный тип голоса называется грудным.

В фальцетном регистре связки колеблются иначе: они не имеют такой упругости, сильно натягиваются, образуют плоские утонченные края. В колебаниях принимают участие только самые края связок, между которыми все время имеется щель. Гортань при фальцете, даже в моменты наибольшего сближения связок, не замыкается, голосовая щель только суживается и расширяется, поэтому происходит лишь усиление и ослабление струн воздуха, а не полное ее прерывание, как при грудном звуке. Фальцетный регистр не богат обертонами; колебание грудной клетки при этом отсутствует. Схема работы голосовых связок при грудной и фальцетном регистрах показана на рис. 80. Повидимому, при грудном регистре голосовые связки колеблются в направлении, перпендикулярном к струе воздуха, проходящей через голосовую щель. При фальцете колебания связок происходят почти в направлении струи воздуха.

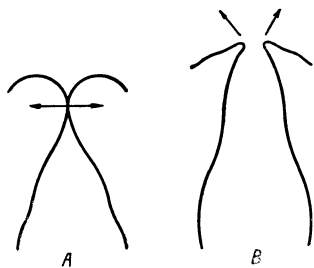


Рис. 80

Характерное для фальцета раскрытие голосовой щели наблюдается вплоть до самых высоких звуков. При повышении звука голосовая щель укорачивается и подвигается к передней половине голосовых связок. При этом задняя половина связок остается плотно сжатой и в колебаниях не участвует. Такие частичные колебания связок возможны благодаря особому строению голосового мускула, что было описано выше.

Оба регистра зависят от распределения усилий механизма, натягивающего голосовые связки. При грудном регистре происходит и внешнее и, главным образом, внутреннее натяжение

связок; при фальцетных звуках преобладает работа мускулов, внешне натягивающих связки.

Певцы очень редко пользуются только грудным или только фальцетным регистром и избегают быстрых переходов от одного к другому.

Одним из средств незаметного перехода от грудного регистра к фальцетному служит механизм смешанного голоса, когда характерное для грудного регистра напряжение голосового мускула начинает постепенно ослабевать, не доходя до своего предела, и заменяется постепенно увеличивающимся напряжением внешних растягивателей голосовых связок. Протяжение этого среднего регистра различно для разных голосов. Другим средством является так называемое «прикрытие» звука, при помощи которого избегают неприятно крикливого характера высоких тонов. Анатомически, при «открытых» звуках, надгортанное пространство уменьшается, так как надгортанник нависает и прикрывает переднюю часть голосовых связок; при «закрытых» — надгортанник поднимается, и голосовые связки при помощи ларингоскопа видны во всю длину. По всей видимости, это положение надгортанника и влияет на изменение тембра звука при его «прикрытии». Как показал Музехольд, при «открытом» звуке сильно выделяется 2-я гармоника, тембр имеет «металлический» характер, при «закрытом» — усиливается основной тон, тембр более матовый и мягкий. Различие в тембре ощущается на слух и подтверждается анализом.

Переход голосового аппарата от дыхательного состояния к голосовому называется атакой звука. Атака оказывает существенное влияние на звук при его зарождении. Обычно различают твердую и мягкую атаку. Если голосовые связки плотно замыкаются еще перед возникновением звука и струя воздуха прорывается через плотно сомкнутые связки, то такое звукообразование соответствует твердой атаке. При мягкой атаке голосовые связки сближаются лишь настолько, насколько это необходимо для звукообразования. Мягкая атака применяется преимущественно в пении при звуках, начинающихся piano.

§ 4. После атаки голосовые связки начинают совершать колебания, порождающие звук человеческого голоса. Вследствие последующего прохождения звуковых колебаний через резонансные полости (глотка, рот, носоглотка, нос) спектр звука, под влиянием последних, сильно меняется. Перейдем теперь к разбору влияния резонансных полостей, начав с менее существенных.

Глотка является важным резонатором, в котором образуется нижняя форманта голоса, от которой зависит полнота и округлость звучания.

Полость носоглотки служит своего рода фильтром, поглощающим звуки, соответствующие настройке полости. (Ее действие можно сравнить с действием интерференционного аппарата Штумпфа, представляющего собой трубу, по которой проходит звук. На пути звука имеются боковые ответвления — трубки разной длины с закрытым концом, которые поглощают тоны, соответствующие их настройке.) Этим в широкой мере пользуются певцы для придания звуку голоса определенной окраски.

Полость носа оказывает существенное влияние на тембр воспроизводимого звука. Если нёбная занавеска открыта и ток воздуха в сильной мере попадает в нос, то звук приобретает очень характерный гнусавый оттенок. Этим же пользуются для воспроизведения некоторых согласных (м, н, б, д, г). Несомненно, полость носа оказывает влияние на тембр звука и при закрытой нёбной занавеске, так как связь с полостью рта остается довольно значительной.

Другие воздушные полости — лобные пазухи, гайморовы полости — не оказывают существенного влияния на тембр звука. Хотя они и соединены с основными резонаторами узкими каналами, но обычно каналы заполнены слизью. Только через костную проводимость эти внутренние полости могут быть приведены в колебание, но отсутствие выходного отверстия не позволяет им оказывать существенное влияние на окраску звука.

Основными резонаторами являются полости глотки и рта. Форма и объем полости рта и глотки при воспроизведении различных гласных меняются в довольно больших пределах. Наибольший объем полости рта приходится на гласную «а». Затем по величине объема рта гласные распределяются таким образом:

а, о, у, э, и.

Как известно, определенный объем воздуха, заключенный в какой-либо полости, настроен на звук определенной высоты; но его собственный тон зависит не только от объема, но и от выходного отверстия полости, причем с увеличением отверстия звук повышается. По величине ротового отверстия гласные располагаются в таком порядке, начиная с наименьшей:

у, о, и, э, а.

Ясно, что ротовая полость при воспроизведении разных гласных имеет определенный объем и определенное выходное отверстие и, следовательно, имеет собственный тон или настройку, характерную для каждой гласной. Изменение формы полости рта и положение губ при произношении различных

гласных указаны на рис. 81. Принимая во внимание объем полости рта и величину выходного отверстия, гласные по высо-

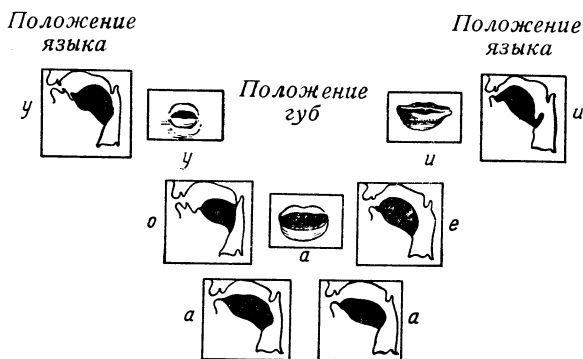


Рис. 81

те собственного тона резонатора располагаются в следующем порядке, начиная с самого низкого:

у, о, а, э, и.

Для гласной «у» собственный тон самый низкий, для «и» — самый высокий. Следовательно, каждая гласная характеризуется определенной областью частот, которые попадают в резонанс с собственным тоном ротовой полости. Эти области усиления частичных тонов, характерные для каждой гласной, названы физиологом Германом формантами. Форманты гласных можно исследовать ухом при помощи резонаторов Гельмгольца. Сам Гельмгольц при анализе гласных пользовался именно этим способом. Однако более точные данные дают анализы кривых гласных, записанных на осциллографе.

Гельмгольц в своих исследованиях физической природы гласных утверждает, что при прохождении через ротовую полость в звуке гласных усиливаются те обертоны, которые лежат близко к собственной частоте полости рта, причем эти форманты каждой гласной являются гармоническими обертонами от основного тона, даваемого связками. Число колебаний усиленных частичных тонов в целое число раз больше числа колебаний основного тона.

Герман несколько иначе объясняет механизм возникновения гласных. Он считает, что толчок воздуха, даваемый голосовыми связками, возбуждает колебания резонатора, частота которых соответствует его собственному тону. Эти колебания постепенно затухают, пока следующий толчок воздуха не возбудит такие же колебания резонатора. Кривая гласной в таком случае должна представлять собой ряд затухающих импульсов с периодом собственного тона резонатора, которые

следуют друг за другом с частотою, даваемой голосовыми связками. Таким образом, форманты, по Герману, не обязательно должны быть гармоническими обертонами от основного тона связок. Действительно, в звуке гласных имеются отдельные серии затухающих колебаний, которые следуют через одинаковые промежутки времени, соответствующие периоду основного тона связок. Эти колебания как будто не имеют гармонического обертонового соотношения с основным тоном, но наше ухо разлагает звук на простейшие синусоидальные колебания, и такие затухающие импульсы, кажущиеся негармоническими, если их взять изолированно, будут разложены нашим ухом на гармоники от основного тона, вне зависимости от частоты форманты.

Таким образом, взгляд Гельмгольца является более широким и охватывающим тот частный случай, который берет Герман. По существу же, в физическом смысле обе теории друг другу не противоречат.

Еще Гельмгольц установил, что для гласных «у», «о», «а» ротовая полость представляет собой однополостный резонатор, при гласных «е», «и» — резонатор двойной (две форманты). Работы Крендалла и Педжета показали, что все гласные имеют по две форманты. Новейшие исследования звуков русской речи, проведенные Л. Л. Мясниковым в ИРПА (Институт радиовещательного приема и акустики), показали, что середина формантной области в звуке «а» лежит в полосе 850—1 150 колебаний в секунду (плюс слабовыраженная формантная область около 3 000 к/с); для звука «о» имеется одна формантная область с серединой 550—850 к/с, для русского «у» имеются три формантные области — около 550, 1 900 и 2 900 к/с; для звука «и» наблюдаются четыре формантные области; для «ы» — одна, для «э» — три.

При произношении каждой гласной полость рта делится на два связанных резонатора: заднего — полость глотки, и переднего — полость рта. Оба резонатора разделены узкой воздушной прослойкой, образующейся между поднятым вверх корнем языка и нёбом. Для гласных «у», «о», «а» — передняя полость больше задней, для «е», «и» — задняя больше передней. Следовательно, для гласных «у», «о», «а» наиболее характерной является низкая форманта, для гласных «е», «и» — высокая.

Базируясь на том, что гласные характеризуются областью усиления гармонических обертонов, Гельмгольц построил аппарат для воспроизведения гласных. Аппарат его представляет собой набор камертонов с резонаторами, настроенными на определенные гармоники. Подбирая силу гармоник, путем регулирования отверстий резонаторов, можно получить гласные «а», «о», «у», «е». Позднее был сконструирован прибор для воспроизведения гласных, который состоит из набора органных труб, настроенных также по определенным гармониче-

ским обертонам от основного низкого звука. Этот прибор служит также одним из доказательств того, что форманты являются усилением гармонических обертонов от основного звука гласной.

§ 5. Согласные звуки значительно сложнее гласных по своей структуре и еще мало изучены. Все согласные можно разделить, во-первых, на длинные («ш», «с» и др.) и короткие («п», «т», «к» и др.) и, во-вторых, на согласные, которые произносятся с участием голосовых связок и без участия голосовых связок. На таблице приведены согласные, из которых каждая пара произносится одним способом, но звуки в правом столбце воспроизводятся без участия голосовых связок, а в левом—с участием связок:

б	п	г	к
ж	ш	д	т
з	с	в	ф

Ряд согласных, и длинных и коротких, образуется исключительно в полости рта, благодаря пропусканию струи воздуха в щель между поднятым концом языка и нёбом, в случае согласной «ш», или между концом языка и зубами в случае согласной «с» и т. д. Ряд согласных воспроизводится посредством быстрого прорыва воздуха, либо при раскрытии губ, в случае согласной «п», либо при отталкивании конца языка от нёба, в случае согласной «т» и т. д.

При записи на осциллографе почти все согласные дают непериодические кривые, показывающие присутствие характерных для согласных шумов. По существу, согласные являются своего рода шумами, с которых начинаются гласные и которыми они заканчиваются. Но некоторые из них, например, «л», «м», «н», воспроизводящиеся с участием резонанса полости носа, дают почти периодические кривые, с периодом, соответствующим периоду колебания голосовых связок. Эти звуки можно назвать полугласными; они, как и гласные, имеют характерные резонансные области (форманты).

В кривых других согласных в некоторых частях есть периодичность, но для них особенно характерны колебания высокой частоты, не гармонические по отношению к основному тону. Так, согласная «ш» имеет высокий характерный призыв в области около 2 000 к/с и выше до 4 000 к/с. Согласная «с» имеет еще более высокие признаки—до 6 000 к/с, а иногда до 8 000 к/с. Для согласной «р» характерны биения, с частотой около 20 в секунду, и форманта в области от 900 до 1 800 к/с. Новейшие исследования, произведенные в ИРПА Л. Л. Мясниковым, показали, что некоторые согласные охватывают сплошную область спектра вплоть до ультразвуковых частот (100 000 к/с и даже выше).

Спектры для согласных, имеющих устойчивый звук (в, з,

ж), показывают наличие у них гармонических обертонов и характерных формант, не зависящих от высоты основного звука. В то же время в звуке этих согласных присутствует ясно выраженный шум, который для «в» имеет резко выраженную область около 7 000 к/с, для «з», «ж» занимает широкую область частот.

Переход от согласных звуков к гласным осуществляется почти мгновенно. Как показал Бакгауз, момент формирования звука является очень существенной особенностью тембра всех музыкальных инструментов, но момент установления гласных занимает настолько незначительное время, что не оказывает существенного влияния на их тембр.

§ 6. Исследования певческих голосов показали, что певческие звуки голоса обладают следующими особенностями:

1. Наличие вибрато в голосе, с частотой около 6 раз в секунду. Меньшее число вибрато создает впечатление неприятного качания голоса; большее придает голосу тремолирующий характер и также производит неудовлетворительное впечатление.

Для качества певческого голоса очень существенным является периодичность вибрато, чем обычно отличаются хорошие голоса. Вибрато имеет большое тембровое значение.

За период вибрато спектр гласной меняется в довольно больших пределах, так как, вследствие изменений высоты звука за период вибрато, максимум энергии переходит с одной гармоники на другую и обратно.

Необходимо отметить, что тембр голоса меняется и при изменении высоты звука и при изменении его интенсивности. В частности при увеличении громкости звука увеличивается значение высоких гармоник.

2. Наличие низкой форманты в области 500 к/с является необходимым условием всякого певческого голоса при пении любых гласных. Эта форманта особенно характерна для хорошего певческого голоса, поэтому поставленные голоса имеют сходный «певческий» тембр для всех голосов и на всех гласных.

3. Наличие высокой «певческой форманты» в области около 2 800 к/с для мужских и около 3 200 к/с для женских голосов. Эта форманта определяет «металлический» оттенок голоса и придает ему блеск. У плохих голосов она обычно лежит выше, достигая в некоторых случаях 6 000 к/с, что придает голосу неприятную крикливость. Наличие этой форманты объясняют резонансом гортани, которая представляет собой закрытую трубу, длиной около 3 см, настроенную на звук в 2 800 к/с.

4. Наличие значительной силы звука, превышающей нормальную, что объясняют шириной раскрытия глотки. Замечено, что с повышением звука сила его увеличивается.

Надо отметить, что в кривых певческого голоса замечается усиление отдельных гармоник, в кривых не-певческого голоса максимум энергии охватывает широкую область частот.

Разговорная речь, в отличие от пения, ведется обычно в таком регистре, где происходит наименьшее напряжение голосовых связок и мышц, участвующих в голосообразовании. При пении голос обычно движется по известным интервалам в разных направлениях, и отдельные звуки имеют строго определенные длительности; поэтому голосовые связки, удерживая данную высоту звука, сохраняют определенную форму и характер колебаний. В разговорной речи колебания голосовых связок не остаются равномерными, так как интонации человеческого голоса непрерывно меняются, причем эти изменения за непродолжительные промежутки времени иногда достигают целой октавы.

Исследование физической природы речи очень важно для некоторых отраслей техники, особенно для передачи звука посредством радио, телефона и т. д.

---



АКУСТИКА МУЗЫКАЛЬНЫХ СИСТЕМ  
И СТРОЕВ

## Глава первая

## МУЗЫКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

§ 1. Из огромного количества звуков, которое способно воспринимать нормальное человеческое ухо, только те звуки нашли применение в музыкальном искусстве, частоты которых находятся в пределах от 16 до 4 300 гц (приблизительно). Но не все звуки и этого диапазона применяются в конкретных музыкальных произведениях, а только те из них, между которыми существуют определенные высотные (частотные) соотношения.

Исследование произведений музыкального творчества как народного, так и профессионального, а также знакомство с теоретическими работами ученых различных исторических эпох показывают, что вопрос о высотных (частотных) соотношениях между звуками разрешался двумя путями:

- 1) путем слухового и
- 2) путем теоретического отбора звуков.

Оба пути привели музыкальное искусство к звуковым системам, т. е. к таким организациям звуков, в основе которых лежит какой-либо слуховой или теоретический принцип звуковысотного отбора. Звуковые системы, в основе которых лежит слуховой принцип звуковысотного отбора, суть системы музыкальные. Звуковые системы, в основе которых лежит теоретический принцип звуковысотного отбора, суть системы теоретические (звуковые). Примером может служить четвертитонная система. В тех случаях, когда теоретическая система получала математическое выражение, она стала называться строем.

Поскольку теоретические системы часто создавались в полном отрыве от музыкальной практики и поскольку многие из них оказались в противоречии с нею, постольку при изучении вопроса о происхождении и развитии звуковых систем знакомство с музыкальными системами должно предшествовать знакомству с системами теоретическими, в частности, со строями. Не следует, однако, думать, что музыкальное искус-



Согласно второй гипотезе формирование музыкальных систем происходило путем слухового отбора звуков, находящихся в простейших интервальных отношениях. Если исключить интервал октавы как относительное тождество, то простейшие интервальные отношения между звуками будут иметь место в квинте и в кварте. Указанная гипотеза исходит из того факта, что интервалы квинты и кварты легче всего получаются на примитивных музыкальных инструментах первобытного человека. Таким образом, согласно второй гипотезе простейшими музыкальными системами следует считать:



Эти системы, развиваясь указанным выше путем, превратились, вероятно, сначала в системы:



затем в системы:



затем в системы:



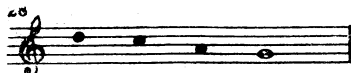
наконец, в систему:



Если, исходя из рассмотренных выше гипотез, обратиться к произведениям народного музыкального творчества, то нетрудно убедиться, что ни первая, ни вторая гипотезы не могут объяснить всех народных музыкальных систем. Действительно, первая гипотеза, объясняющая вполне удовлетворительно формирование систем:



бессильна объяснить систему:



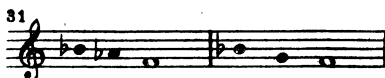
в которой имеется скачок на м. терцию ( $a^1-c^2$ ). Наоборот, вторая гипотеза, вполне удовлетворительно объясняющая формирование последней системы, может объяснить систему:



только при помощи воображаемых звуков  $c^1(c^2)$  и  $d^1(d^2)$ .

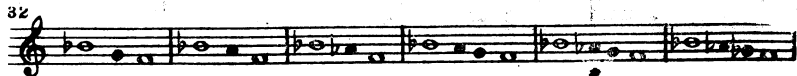


Далее, ни первая, ни вторая гипотеза не могут объяснить сравнительно простых музыкальных систем:

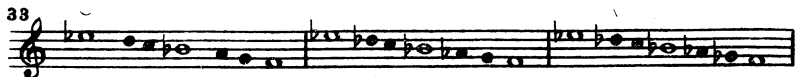


которые встречаются в русских народных песнях.

Некоторые ученые, занимавшиеся исследованием русской народной песни (Сокальский и др.), выдвигали третью гипотезу. Согласно этой гипотезе формирование музыкальных систем происходило путем заполнения кварты одним и двумя звуками, находящимися со звуками кварты в интервальных отношениях б. или м. секунды:



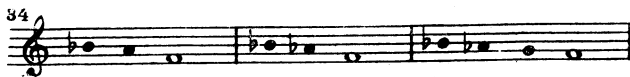
Эти системы, соединяясь, образовали более сложные музыкальные системы:



Нетрудно убедиться, что в последней гипотезе объединяются вокальная и инструментальная гипотезы формирования музыкальных систем.

§ 2. Даже беглое знакомство с тремя вышеупомянутыми гипотезами убеждает нас в том, что они совершенно игнорируют б. и м. терции как интервалы основные.

Во всех трех гипотезах б. и м. терции получаются как интервалы производные, образовавшиеся путем секундowych и квартоквинтовых ходов. Между тем изучение произведений народного музыкального творчества показывает, что целый ряд даже простых музыкальных систем, например:



имеют ясно выраженный минорный и мажорный характер, объяснить который можно только наличием в них м. и б. терций как основных интервалов. У некоторых народов (например, у эскимосов и североамериканских индейцев) существуют песни, целиком построенные на основе мажорного или минорного трезвучия или малого септаккорда (представляющего соединение этих трезвучий).

Эти факты доказывают, что в процессе образования музыкальных систем роль б. и м. терций была весьма велика и что в число основных интервалов следует включить б. и м. терции. В каком порядке происходило осознание интервалов первобытным человеком, сказать трудно. Можно, однако, утверждать, что интервалами, освоенными в первую очередь, были секунды, терции и кварта. Квинта была освоена позже.

Если исходить из весьма вероятного предположения, что вокальная музыка возникла раньше инструментальной (голосовой аппарат дан человеку самой природой, а музыкальные инструменты изобретены человеком), а также основываться на том факте, что некоторые народы не имеют инструментальной музыки, то можно считать простейшими те двухзвучные музыкальные системы, между звуками которых имеются интервальные соотношения м. и б. секунды, м. и б. терции и квалты, т. е. системы:



Изучая эти системы с точки зрения акустического родства звуков, нетрудно убедиться, что первые четыре системы образованы звуками, не связанными между собой<sup>1</sup>. Эти системы сформировались по принципу звуковысотной близости. Остальные шесть систем образованы звуками, находящимися в непосредственном акустическом родстве (терцовые и квартовые соотношения между звуками).

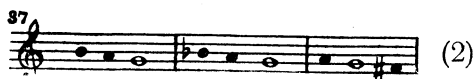
§ 3. Исследуем теперь с точки зрения родства звуков трехзвучные музыкальные системы.

В системах:



имеются только звуки, связанные непосредственным родством.

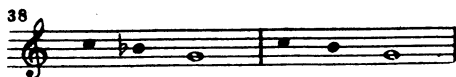
В системах:



<sup>1</sup> См. отдел 1, глава V, § 2.

имеются звуки, как связанные непосредственным родством ( $g^1-h^1$ ,  $g^1-b^1$ ,  $fis^1-a^1$ ), так и не связанные ( $g^1-a^1$ ,  $a^1-h^1$ ,  $a^1-b^1$ ,  $fis^1-g^1$ ).

В системах:



имеются звуки, связанные как непосредственным родством ( $g^1-b^1$ ,  $g^1-c^2$ ,  $g^1-h^1$ ), так и родством опосредствованным ( $b^1-c^2$ ,  $h^1-c^2$ ). Однако между музыкальными системами (2) и (3) существует глубокая принципиальная разница. В системах (3) звуки находятся или в непосредственном или в опосредствованном родстве, а в системах (2) имеются звуки, не связанные между собой. Но, если прибавить к системе:



звук  $c^2$ , то в образовавшейся четырехзвуковой системе:

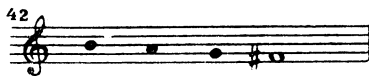


все звуки будут находиться между собой или в непосредственном или в опосредствованном родстве.

Если прибавить к системе:



звук  $h^1$ , то в образовавшейся четырехзвуковой системе:



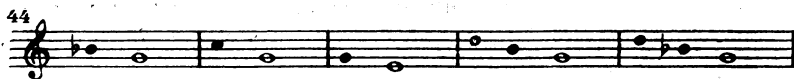
все звуки будут находиться между собой или в непосредственном или в опосредствованном родстве.

§ 4. Из всего вышесказанного следует, что простейшие (двух- и трехзвуковые) системы можно разделить на четыре типа:

1. Двухзвуковые системы, сформировавшиеся по принципу высотной близости звуков, например;



2. Двух- и трехзвуковые системы, сформировавшиеся по принципу родства звуков, например:



3. Трехзвучные системы, сформировавшиеся по обоим принципам и заключающие в себе не связанные звуки, например:



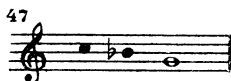
4. Трехзвучные системы, сформировавшиеся по обоим принципам и заключающие в себе звуки, связанные как непосредственным, так и опосредствованным родством, например:



§ 5. Если исследовать произведения народного музыкального творчества, то нетрудно убедиться, что музыкальные системы четвертого типа могут быть не только трехзвучными, но и четырех-, пяти-, шести- и семизвучными и что эти системы являются наиболее распространенными.

Рассмотрим некоторые из них.

Трехзвучная система:



заключает в себе один интервал  $b^1 - c^2$ , звуки которого связаны между собой опосредствованным родством :



Четырехзвучная система:



заключает в себе два интервала  $g^1 - a^1$  и  $c^2 - d^2$ , звуки которых связаны между собой опосредствованным родством:



### Четырехзвуковая система:



заключает в себе три интервала  $g^1-a^1$ ,  $a^1-b^1$  и  $b^1-c^2$ , звуки которых связаны между собой опосредственным родством:



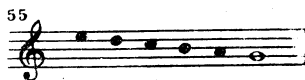
### Пятизвуковая система:



заключает в себе три интервала  $b^1-c^2$ ,  $c^2-d^2$  и  $g^1-f^2$ , звуки которых связаны между собой опосредствованным родством:



### Шестизвуковая система:



заключает в себе пять интервалов  $g^1-a^1$ ,  $a^1-h^1$ ,  $h^1-c^2$ ,  $c^2-d^2$  и  $d^2-e^2$ , звуки которых связаны между собой опосредствованным родством:



### Семизвуковая система:



заключает в себе восемь интервалов  $g^1-a^1$ ,  $a^1-h^1$ ,  $h^1-c^2$ ,  $c^2-d^2$ ,  $d^2-e^2$ ,  $e^2-fis^1$ ,  $g^1-fis^1$  и  $c^2-fis^1$ , звуки которых связаны между собой опосредствованным родством:





Если принять во внимание, что рассмотренная нами пятизвучная система есть общеизвестный пятиступенный лад, а семизвучная система есть общеизвестный семиступенный диатонический мажорный лад, то мы вправе утверждать, что лад представляет собой музыкальную систему, в состав которой входят интервалы, образованные звуками, находящимися в непосредственном или в опосредствованном родстве.

Таким образом, музыкальные системы:



не являются ладами, музыкальная система:



не лад, а часть 12-звучной равномерно темперированной системы (строя) <sup>1</sup>.

§ 6. Выяснив те акустические требования, которым должна удовлетворять музыкальная система, называемая ладом, попытаемся представить себе дальнейший процесс формирования ладов.

Так как простейшими ладами являются трехзвучные музыкальные системы:



и так как шесть исследованных нами ладов суть соединения простейших ладов, то можно предположить, что всякий сложный лад представляет собой музыкальную систему, образовавшуюся из простейших трехзвучных ладов.

Действительно, лад:

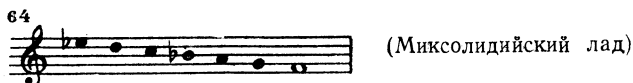
<sup>1</sup> См. стр. 210, глава IV



можно рассматривать, как соединение простейших ладов:



Лад:



можно рассматривать, как соединение простейших ладов:



Однако, если подвергнуть аналогичному анализу общеизвестный диатонический мажор:



то нетрудно убедиться, что этот лад нельзя рассматривать как соединение простейших ладов, так как тетрахорд:

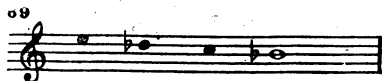


вследствие наличия в нем увеличенной кварты  $b^1 - e^2$  не разлагается на простейшие лады.

Ту же картину дает так называемый гармонический минор:



в состав которого входит тетрахорд:



не разлагающийся на простейшие лады.

Акустический анализ ладов, встречающихся в народной и профессиональной музыке, приводит нас к весьма интересным и важным выводам. На основании этого анализа мы можем утверждать, что:

- 1) простейшими ладами являются лады трехзвучные;
- 2) пятизвучные лады («пентатоника») суть лады относительно сложные, и им предшествовали лады четырехзвучные («тетратоника») и трехзвучные («тритоника»);
- 3) все рассмотренные нами лады, кроме диатонического мажорного и гармонического минорного, повидимому, образовались путем соединения трихордных ладов (в пределах кварты);
- 4) появление в музыкальном искусстве диатонического мажорного и гармонического минорного лада отмечает новую музыкальную эпоху (появление в ладах целотонного тетрахорда).

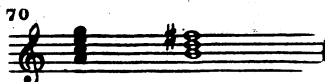
§ 7. На стр. 188 нами была приведена схема, из которой видно, что во всех интервалах *G-dur* звуки связаны между собой или непосредственным или опосредствованным родством.

Изучая эту схему, можно убедиться, что звуки интервалов этого лада связаны квартоквинтовым, квартотерцовым, квартовым и терцовым родством.

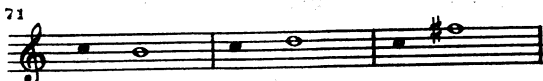
Так как трезвучие  $g^1-h^1-d^2$  осуществляет опосредствованное родство звуков в интервалах *G-dur* наиболее совершенно и так как по общепринятой терминологии оно является тоническим трезвучием этого лада, то мы имеем право предположить, что тоническое трезвучие всякого лада должно обладать этим свойством. Если переместить звуки *G-dur* так, чтобы звукоряд начинался с  $e^1$ , то *G-dur* превратится в натуральный *e-moll*. Трезвучие  $e^1-g^1-h^1$  осуществляет опосредствованное родство между звуками интервалов этого лада так же совершенно, как трезвучие  $g^1-h^1-d^2$  в *G-dur*, поэтому указанное выше предположение подтверждается. Начиная звукоряд со звуков  $a^1$ ,  $h^1$ ,  $c^2$ ,  $d^2$  и  $fis^1$ , мы получаем ряд ладов с соответствующими тоническими трезвучиями. Спрашивается,

осуществляют ли тонические трезвучия опосредствованное родство между звуками интервалов, входящих в состав этих ладов? Трезвучие  $fis^1—a^1—c^2$ , как уменьшенное, не может в данном случае рассматриваться как тоника лада, трезвучия же  $h^1—d^2—fis^2$  и  $c^2—e^2—g^2$  не осуществляют опосредствованное родство между звуками некоторых интервалов.

Действительно, из схемы:



видно, что звуки следующих интервалов:

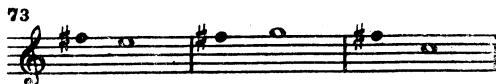


не связаны между собой ни непосредственным, ни опосредствованным родством.

Из схемы:



видно, что звуки следующих интервалов:



также не связаны между собой ни непосредственным, ни опосредствованным родством.

Таким образом, в натуральном *G-dur* имеются четыре трезвучия, которые осуществляют опосредствованное родство между звуками всех интервалов этого лада:

$$\begin{array}{ll} g^1—h^1—d^2, & a^1—c^2—e^2 \\ d^1—fis^1—a^1 & e^1—g^1—h^1 \end{array}$$

Почему же главным трезвучием этого лада музыкальная практика признала трезвучие  $g^1—h^1—d^2$ ?

Если мы рассмотрим, как трезвучие  $g^1—h^1—d^2$  осуществляет опосредствованное родство между звуками интервалов этого лада:



то убедимся, что это родство является квартоквинтовым (2, 5 и 7) и квартотерцовым (1, 3, 4, 6 и 8).

Если мы рассмотрим, как трезвучие  $a^1-c^2-e^2$  осуществляет опосредствованное родство между звуками интервалов этого лада,



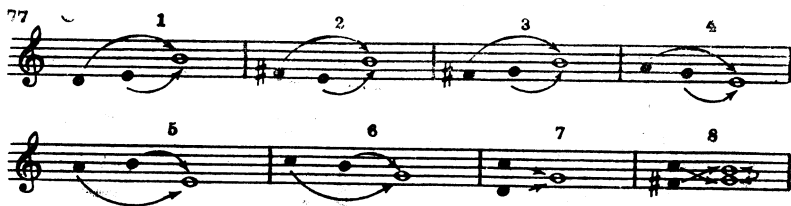
то убедимся, что это родство является квартоквинтовым (2, 5), квартотерцовым (1, 3, 4, 6, 7) и терцовым (8).

Если мы рассмотрим, как трезвучие  $d^1-fis^1-a^1$  осуществляет опосредствованное родство между звуками интервалов этого лада:



то убедимся, что это родство является квартоквинтовым (2, 5), квартотерцовым (1, 3, 4, 6, 7) и терцовым (8).

Если мы рассмотрим, наконец, как трезвучие  $e^1-g^1-h^1$  осуществляет опосредствованное родство между звуками интервалов этого лада:



то убедимся, что это родство является квартоквинтовым (2, 5, 7) и квартотерцовым (1, 3, 4, 6, 8).

Из всего вышеизложенного следует, что из четырех трезвучий натурального *G-dur*, осуществляющих опосредствованное родство между звуками интервалов этого лада, трезвучия  $g^1-h^1-d^2$  и  $e^1-g^1-h^1$  осуществляют это родство более совершенно, чем трезвучия  $a^1-c^2-e^2$  и  $d^1-fis^1-a^1$ , так как, если последние принять за тонические трезвучия, то будет иметь

место терцовое опосредствованное родство (относительно слабое родство).

Таким образом, музыкальное искусство по признаку акустического родства должно считать тоническим не всякие трезвучия, а только те из них, которые осуществляют это родство наиболее совершенно.

Так как в натуральном *G-dur* имеются два трезвучия, осуществляющие акустическое родство одинаково совершенно ( $g^1-h^1-d^2$  и  $e^1-g^1-h^1$ , то мы имеем право сделать вывод, что натуральный *G-dur* заключает в себе натуральный *e-moll* и обратно («переменный лад»).

Из семи так называемых церковных ладов только два (ионийский и эолийский) имеют в качестве тонических трезвучия, осуществляющие опосредствованное родство наиболее совершенно. Тонические трезвучия дорийского и миксолидийского ладов осуществляют опосредствованное родство между звуками менее совершенно. Что же касается до фригийского, лидийского и локрийского ладов, то их тонические трезвучия, как указано было выше, не осуществляют опосредствованного родства между звуками некоторых интервалов. Правильность установленного нами взгляда на тоническое трезвучие подтверждается тем, что по мере развития гармонического сознания все церковные лады постепенно превратились в натуральный мажор и натуральный минор.

§ 8. Так как натуральный мажор и натуральный минор имеют по два трезвучия, осуществляющих опосредствованное родство наиболее совершенно, и так как поэтому тоника этих ладов переменна, то возникает вопрос — не существует ли возможность построить такие лады, в которых тоническое трезвучие являлось бы единственным, осуществляющим опосредствованное родство наиболее совершенно.

Известно, что натуральный минор постепенно превратился в минор гармонический.

Различие между этими ладами, как известно, заключается в том, что гармонический минорный лад имеет повышенную на  $\frac{1}{2}$  тона VII ступень. Например, в гармоническом *a-moll* вместо  $g-gis$ :



Исследуем этот лад:

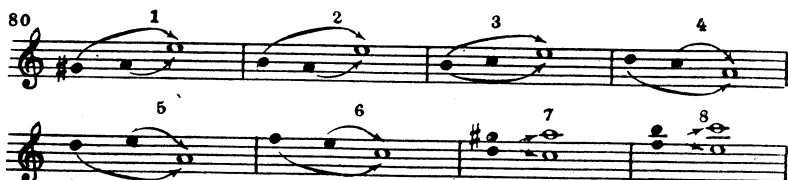
Трезвучия  $h^1-d^2-f^2$ ,  $gis^1-h^1-d^2$ ,  $c^2-e^2-gis^2$  и  $f^1-a^1-c^2$  не осуществляют родства между звуками некоторых интервалов этого лада, так как трезвучие  $h^1-d^2-f^2$  и  $gis^1-h^1-d^2$  являются уменьшенными, трезвучие  $c^2-e^2-gis^2$  является уве-

личенным, а трезвучие  $f^1-a^1-c^2$  не осуществляет опосредствованного родства между звуками следующих интервалов:



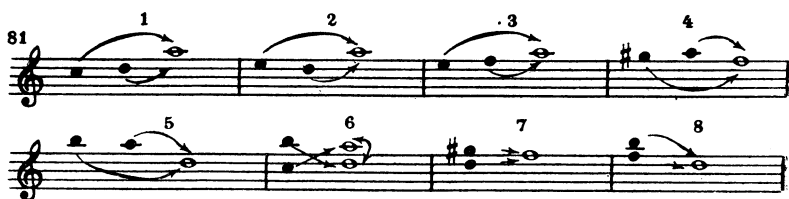
Таким образом, нам необходимо исследовать только трезвучия  $a^1-c^2-e^2$ ,  $d^2-f^2-a^2$  и  $e^2-gis^2-h^2$ .

Если мы рассмотрим, как трезвучие  $a^1-c^2-e^2$  осуществляет опосредствованное родство между звуками интервалов гармонического *a-moll*:



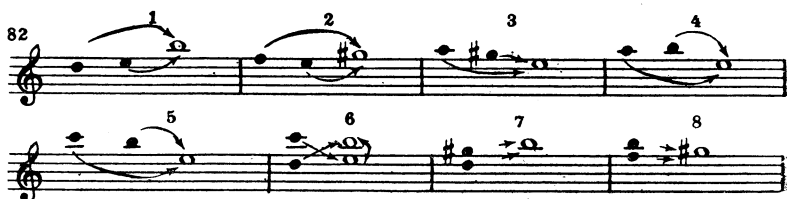
то убедимся, что это родство является квартоквинтовым (2, 5), квартотерцовым (1, 3, 4, 6), квинтовым (8) и квартотерцовым или квинтосекстовым (7, *gis-as*).

Если мы рассмотрим, как трезвучие  $d^2-f^2-a^2$  осуществляет опосредствованное родство между звуками интервалов этого лада:



то убедимся, что это родство является квартоквинтовым (2), квартотерцовым (1, 3, 5), секстоквинтовым (6) и терцовым (4, 7, 8).

Если мы, наконец, рассмотрим, как трезвучие  $e^2-gis^2-h^2$  осуществляет опосредствованное родство между звуками этого лада:



то убедимся, что это родство является квартоквинтовым (4), квартотерцовым (1, 3, 5), секстоквинтовым (6) и терцовым (2, 7, 8).

Сравнивая, как трезвучия  $a^1-c^2-e^2$ ,  $d^2-f^2-a^2$  и  $e^2-gis^2-h^2$  осуществляют опосредствованное родство между звуками интервалов гармонического *a-moll*, мы убеждаемся, что трезвучие  $a^1-c^2-e^2$  осуществляет это родство наиболее совершенно, т. е. является единственным тоническим трезвучием. Трезвучие  $c^2-e^2-gis^2$  в гармоническом *a-moll*, как было доказано, не является таким вторым тоническим трезвучием, как трезвучие  $c^2-e^2-g^2$  в натуральном *a-moll*.

Рассматривая аналогичным образом роль трезвучия  $c^2-e^2-g^2$  в гармоническом *C-dur*, мы убеждаемся, что это трезвучие является единственным тоническим, так как трезвучие  $a^1-c^2-e^2$ , превращаясь в увеличенное ( $as^1-c^2-e^2$ ), не может осуществлять опосредствованное родство между звуками интервалов гармонического *C-dur* так же, как осуществляло его трезвучие  $a^1-c^2-e^2$  в натуральном *C-dur*.

Ознакомившись с трихордными ладами типа:



т. е. с ладами, которые заключают в себе б. секунду и м. терцию, полученную скачком от нижнего или верхнего звука секунды, мы приходим к выводу, что пентатонные лады возникли путем соединения указанных выше трихордных ладов:



Тоникой такого пентатонного лада может служить любой звук. Таким образом пентатонный лад встречается в следующих видах:



Наиболее распространенными пентатонными ладами являются два первых лада. Существующие объяснения происхождения пентатонных ладов путем исключения отдельных звуков из поступенных ладов вряд ли можно считать правильным.



§ 9. Учитывая все вышеизложенное, можно дать следующие акустические определения музыкальной системы и лада:

1) музыкальная система есть организация звуков, в основе которой лежит какой-либо принцип звуковысотного отбора (слуховой или теоретический);

2) лад есть музыкальная система, все звуки которой объединены непосредственным и опосредствованным акустическим родством и имеют центр (один, два или три звука), наиболее совершенно осуществляющий это родство.

---

## Глава вторая

### КОНСОНАНС И ДИССОНАНС ИНТЕРВАЛОВ

§ 1. Не следует смешивать консонирующие интервалы с интервалами устойчивыми, а диссонирующие — с интервалами неустойчивыми. С понятиями устойчивость и неустойчивость мы связываем как отдельные звуки, так и созвучия (в данном ладу), но нельзя к понятиям консонанс и диссонанс отнести отдельные звуки, ибо эти понятия возникают только при одновременном звучании интервала (созвучия) как в ладу, так и вне лада. Исследование музыкальных произведений народного творчества убеждает нас в том, что эти произведения вначале были одноголосными. Поэтому бессознательное ощущение «устойчивости» и «неустойчивости» интервалов и звуков предшествовало понятиям консонанс и диссонанс, которые возникли только в момент появления многоголосия. Но так как в теории музыки понятия консонанс и диссонанс появились раньше понятий об устойчивости и неустойчивости звуков, то мы начинаем сначала исследование консонанса и диссонанса.

В настоящее время мы называем консонирующими интервалами такие гармонические интервалы, которые звучат мягко, спокойно независимо от того, находятся ли они в ладу или вне лада (например, октава, квинта и т. д.), а диссонирующими — интервалы, которые при тех же условиях звучат жестко, напряженно (малая, большая секунда и т. п.).

Существует несколько теорий консонанса и диссонанса интервалов, из которых наиболее известны теория Гельмгольца и теория Штумпфа.

§ 2. Теория Гельмгольца объясняет консонанс и диссонанс интервалов следующим образом: каждый музыкальный звук состоит из частичных тонов (основного тона и обертонов). При одновременном воспроизведении двух звуков между их частичными тонами возникают биения. От количества биений и их громкости зависит степень консонантности и диссонантности интервалов. Поясним сказанное примерами. Если мы воспроизведем гармонический интервал октавы, например,

$c-c^1$ , настроив его звуки в отношении 1 : 2 (натуральная октава), то мы не услышим биений.

Если мы воспроизведем гармонический интервал квинты, например,  $c-g$ , настроив его звуки в отношении 2 : 3 (натуральная квинта), то также не услышим биений.

Если мы воспроизведем гармонический интервал большой терции, например,  $c-e$ , настроив его звуки в отношении 4 : 5 (натуральная б. терция), то мы услышим слабые биения.

Если мы воспроизведем гармонический интервал м. секунды, например,  $c-des$ , настроив его звуки в отношении 15 : 16 (натуральная м. секунда), то услышим весьма сильные биения.

Исследовав таким образом все интервалы, Гельмгольц разделил консонантные интервалы на консонансы абсолютные (прима, октава), совершенные (квинта, кварта), средние (б. секста, б. терция) и несовершенные (м. терция, м. секста). Все остальные интервалы по терминологии Гельмгольца суть диссонансы. При изучении теории Гельмгольца возникает ряд существенных вопросов, а именно:

1. Гельмгольц в своей теории исходит из натуральных интервалов (октава 1 : 2, квинта 2 : 3 и т. д.). Между тем в музыкальной практике мы имеем дело с интервалами, звуки которых находятся в более сложных частных отношениях, что не мешает нам воспринимать эти интервалы как консонансы. Как объяснить такие явления?

2. Если консонантность и диссонантность интервалов зависят только от биений, то почему большая терция  $c^1-e^1$  в 12-звуковом равномернотемперированном строе<sup>1</sup> воспринимается нами как консонанс, хотя она дает ясно слышимые биения?

3. Почему натуральная септима  $7/4$ , звучащая весьма мягко (вследствие отсутствия отчетливо слышимых биений), считается в музыке диссонансом, в то время как м. секста, звучащая сравнительно резко (вследствие присутствия отчетливо слышимых биений), считается консонансом? На эти вопросы и на ряд других теория Гельмгольца не дает ответов.

Теория Штумпфа объясняет консонанс и диссонанс интервалов психологически. Если два звука при одновременном воспроизведении сливаются в нашем сознании в один звук, то образуемое ими двухзвучие есть консонанс, в противном случае — диссонанс.

В зависимости от того, какова степень слияния звуков, иначе говоря, трудность разложения интервала на соответствующие звуки, Штумпф разделяет консонирующие интервалы на группы, которые в общем совпадают с группами, предложенными Гельмгольцем.

---

<sup>1</sup> См. ниже гл. IV § 1.

Свои выводы Штумпф получил путем многочисленных экспериментов с восприятием гармонических интервалов как музыкальными, так и не музыкальными испытуемыми.

Из 100 возможных случаев Штумпф получил 75 случаев, когда октава воспринималась как один звук, 50 случаев (в среднем), когда квинта и кварта воспринимались как один звук, 25 случаев (в среднем), когда терция и секста воспринимались как один звук.

При изучении теории Штумпфа также возникает ряд существенных вопросов, а именно:

1. Правильно ли поступал Штумпф, пользуясь для объяснения музыкальных явлений мнением людей немusикальных?

2. Правильно ли поступал Штумпф, беря в основу своих опытов сливаемость звуков? Ведь в музыке такое слияние не желательно.

3. Если Штумпф отрицает роль биений в процессе слияния звуков в интервале, то отчего зависит способность одних звуков сливаться, других — нет?

На эти вопросы и на ряд других теория Штумпфа не дает удовлетворительных ответов.

§ 3. Попытаемся теперь осветить вопрос о консонансе и диссонансе интервалов, исходя из данных современной музыкальной акустики.

Биения несомненно играют значительную роль в определении диссонантности интервалов. Еще Гельмгольц установил, что 30 биений в секунду вызывают наиболее сильное раздражение органов слуха, т. е. ощущение диссонантности. Небольшое количество биений (1—5 в секунду), а также слишком большое (50 и выше биений в секунду) не вызывает этого ощущения. Так, например, в большой секунде  $c^1-d^1$  возникает 32 биения в секунду, в м. секунде  $h^1-c^2$  — 29 биений в секунду. Эти интервалы воспринимаются нами как диссонансы. А в квинте  $c^1-g^1$ , воспринимаемой как консонанс, возникает 130,5 биений в секунду и т. д.

Однако решающую роль при определении диссонантности играют не только биения между основными тонами, но и также между основным тоном и обертоном и между обертонами. Например, септима  $c^1-h^1$  не является консонансом, хотя между ее основными тонами возникает 232,5 биений в секунду. Ее диссонантность обуславливается взаимодействием основного тона  $h^1$  со вторым обертоном  $c^2$  (от  $c^1$ ), при котором возникает 29 биений в секунду. Темперированная м. септима  $c^1-b^1$  также не является консонансом, хотя между ее основными тонами — 204,5 биений в секунду, а между основным тоном  $b^1$  и вторым обертоном от  $c^1$  ( $c^2$ ) — 57 биений в секунду. В данном случае диссонантность определяется тоном совпадения ( $b^3$  — 7-й обертоном от  $c^1$ ,  $b^3$  — 4-й обертоном от  $b^1$ ). В темперированном строе между этими обертонами возникает 33,6 биений

в секунду. Натуральная септима 7 : 4 воспринимается как консонанс, так как указанные выше биения в тоне совпадения отсутствуют.

Нами были рассмотрены интервалы среднего регистра, в пределах которого возникло музыкальное искусство. В других регистрах обстоятельства существенным образом изменяются. Так, например, в б. терции в первой октаве ( $c^1—e^1$ ) возникает 68 биений в секунду между основными тонами. Но та же терция, перенесенная в малую октаву, дает 34 биения в секунду и следовательно должна восприниматься как диссонанс (по Гельмгольцу). Приведем другой пример. Большая секунда в первой октаве ( $c^1—d^1$ ) дает 32 биения в секунду между основными тонами. Но та же б. секунда, перенесенная в третью октаву, дает 128 биений в секунду и следовательно должна восприниматься как консонанс. Однако б. терция в малой и в других более низких октавах воспринимается как консонанс, а большая секунда в третьей и в других более высоких октавах воспринимается как диссонанс. Из сказанного видно, что не всегда биения играют решающую роль при определении диссонантности и консонантности интервалов. Повидимому, не меньшее значение имеют явления психологического порядка (явления памяти), а также ладово-функциональные связи между звуками интервала.

Из всего сказанного выше видно, что понятия консонантности и диссонантности возникают при одновременном звучании не менее двух звуков.

Посмотрим теперь, что наблюдается при последовательном звучании двух звуков. Если мы воспроизведем звуки  $c^1—d^1$  одновременно, то получим ясно выраженный диссонанс. Воспроизведем те же звуки последовательно ( $d^1—c^1$ ). Когда мы воспроизводили  $c^1—d^1$  одновременно, то мы не ощущали никакого лада. При последовательном воспроизведении  $d^1—c^1$  мы легче всего воспринимаем их как звуки лада *C-dur* (или *c-moll*), причем  $d^1$  воспринимаем как один из звуков доминанты, а  $c^1$ —как основной тонический звук. Никакой диссонантности мы здесь не ощущаем. Если мы воспроизведем одновременно  $h—c^1$ , то воспримем очень резкий внеладовый диссонанс. При последовательном же воспроизведении  $h—c^1$  мы не воспримем никакого диссонанса, причем  $h$  мы воспримем легче всего как один из звуков доминанты, а  $c^1$ —как звук тоники *C-dur* (или *c-moll*).

Описанные нами явления наблюдаются в больших и малых секундах. В других интервалах они не столь ясно выражены. Например, малая септима и тритон, воспроизведенные одновременно и последовательно, воспринимаются как диссонансы. Повидимому, явления, которые мы наблюдаем в последовательных секундах, зависят, во-первых, от того, что предыдущий звук при воспроизведении последующего воспринимает-

ся у нас как образ памяти, а последующий звук является реальной тоникой, чего нельзя сказать про малую септиму (или тритон), в которой тоника отсутствует. Здесь скорее играет роль ощущаемая нами неустойчивость звуков, а не диссонантность.

Напомним еще раз о том, что не следует смешивать интервалы устойчивые с консонантными, а неустойчивые с диссонантными, так как это не одно и то же.

Что же представляют собой устойчивые и неустойчивые звуки и интервалы? Прежде всего эти звуки и интервалы имеют место в ясно выраженном ладу, в котором мы и различаем звуки устойчивые и неустойчивые.

Устойчивыми звуками мы называем те звуки (мы имеем в виду народную и классическую музыку), на которых мы можем наиболее совершенно закончить мелодию. Например, в *C-dur* таковыми являются  $c^1—e^1—g^1$ , а неустойчивыми звуками в том же *C-dur* являются все остальные звуки. Степень устойчивости звуков различна. Наиболее устойчивым звуком является  $c^1$  (в *C-dur*), затем следует  $e^1$  и, наконец, звук  $g^1$ , который может восприниматься и как часть тонического трезвучия и как основной звук доминанты. То же самое, различную степень неустойчивости имеют и неустойчивые звуки. Звуки  $h$  и  $d^1$  (в *C-dur*) представляются наиболее неустойчивыми.

Когда мы говорим о разрешении интервалов, то мы должны иметь в виду их неустойчивость, а не диссонантность. Например, звуки  $f^1$  и  $a^1$ , воспроизведенные одновременно, являются консонантным интервалом, но в ладу *C-dur* являются оба неустойчивыми и требуют разрешения. Поэтому разрешения требуют не диссонирующие интервалы, а неустойчивые, которые могут быть и консонирующими.

Рассмотрим для примера диссонанс  $c^1—d^1$ . Если эти два звука взяты одновременно, то невозможно определить, к какому ладу они принадлежат. Если представить, что они принадлежат к ладу *C-dur*, то неустойчивым звуком является  $d^1$  и он чаще всего переводится (разрешается) в звук  $e^1$ . Если же мы представим эти два звука как звуки лада *G-dur*, то неустойчивым является звук  $c^1$ , который чаще всего переводится (разрешается) в звук  $h$ .

Разрешаться может не только неустойчивый интервал, но также и неустойчивый звук. Например, интервал  $f^1—a^1$  в *C-dur* заключает в себе два неустойчивых звука (и  $f^1$  и  $a^1$ ), хотя он представляет собой консонанс. Поэтому он в *C-dur* должен разрешиться в  $e^1—g^1$  (могут быть, конечно, и другие разрешения, например,  $f^1$  может пойти не в ближайший устойчивый звук  $e^1$ , что обыкновенно имеет место, а в  $c^1$ ). Если воспроизведем интервал  $f^1—g^1$ , то этот неустойчивый в *C-dur* интервал может разрешиться в  $e^1—g^1$ , т. е. будет разрешаться только один звук. Первый интервал ( $f^1—a^1$ ) был консонирую-

щим, второй — диссонирующим, но и тот и другой требовали разрешения, потому что первый интервал заключал в себе два неустойчивых звука, а второй — один. Таким образом, консонанс и диссонанс интервалов не всегда связан с устойчивостью и неустойчивостью, хотя диссонантность всегда связана с неустойчивостью, и разрешаться может не только интервал, но и отдельный звук.

---

## Глава третья

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СТРОИ

§ 1. Математическим строем называется совокупность частотных отношений между звуками в музыкальной системе. Введение в музыкальную практику многоголосных инструментов с фиксированной частотой звуков (орган и др.) заставило композиторов и исполнителей заинтересоваться количественной стороной музыкальных систем. К этому времени в науке был известен целый ряд звуковых строев, разработанных китайскими, персидскими, индийскими, арабскими и греческими учеными, в основе которых лежали самые разнообразные математические принципы отбора звуков и которые пытались объяснить соотношения между звуками в произведениях народного музыкального творчества.

Мы считаем излишним останавливаться на рассмотрении китайских, персидских, арабских и индийских звуковых строев, так как эти строи не оказали непосредственного влияния на европейскую музыку, а начнем с изучения строя, разработанного древнегреческими учеными и известного под именем «строя Пифагора».

Древнегреческим ученым было известно, что на монохорде<sup>1</sup> можно получить звуки не только путем возбуждения целой струны, но и ее частей:  $1/2$ ,  $2/3$  и  $3/4$ , и что звуки, полученные путем возбуждения указанных частей струны, образуют с ее основным тоном интервалы октавы —  $1/2$  струны, квинты —  $2/3$  струны и кварты —  $3/4$  струны (по современной терминологии).

Эти интервалы, найденные опытным путем и получившие, по преданию, применение при настройке лиры Орфея, стали основными интервалами пифагорова строя. Остальные интервалы этого строя были найдены последователями Пифагора посредством вычислений. Трудно сказать, какие причины заставили указанных ученых отказаться от дальнейших делений

---

<sup>1</sup> Музыкальный инструмент, состоявший из струны, натянутой на резонансный ящик.



струны на части в целях получения новых интервалов, известно лишь, что формирование пифагорова строя осуществлялось не опытным, а математическим путем. Этот путь был основан на следующих соображениях: так как  $\frac{2}{3}$  целой струны дают звук квинтой выше ее основного тона, а  $\frac{3}{4}$  целой струны — звук квартой выше того же тона, то  $\frac{2}{3}$  любой части струны должны дать звук квинтой выше этой части, а  $\frac{3}{4}$  любой части струны — звук квартой выше этой части.

Таким образом, если основной тон струны есть  $c$  и если взять  $\frac{2}{3}$  от  $\frac{2}{3}$  струны, т. е.  $\frac{4}{9}$  струны, то звук, соответствующий этой части струны, будет  $d^1$ . Этот звук находится за пределами октавы  $c—c^1$ . Взявши вместо его  $d$ , мы найдем, что последнему звуку соответствует  $\frac{8}{9}$  струны<sup>1</sup>.

Если взять  $\frac{2}{3}$  от  $\frac{8}{9}$  струны, т. е.  $\frac{16}{27}$  струны, то звук, соответствующий той части струны, будет  $a$ .

Если взять  $\frac{2}{3}$  от  $\frac{16}{27}$  струны, т. е.  $\frac{32}{81}$  струны, то звук, соответствующий этой части струны, будет  $e^1$ . Этот звук находится за пределами октавы  $c—c^1$ . Взявши вместо него  $e$ , мы найдем, что последнему звуку соответствует  $\frac{64}{81}$  струны.

Если взять  $\frac{2}{3}$  от  $\frac{64}{81}$  струны, т. е.  $\frac{128}{243}$  струны, то звук, соответствующий этой части струны, будет  $h$ . Если расположить все найденные нами звуки в порядке их высоты и подписать под ними соответствующие части струны, то мы получим диатоническую мажорную гамму пифагоровой настройки, в которой частотные отношения между звуками выражены в долях струны:

$c$	$d$	$e$	$f$	$g$	$a$	$h$	$c^1$
1	$\frac{8}{9}$	$\frac{64}{81}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{128}{243}$	$\frac{1}{2}$

Если, исходя из основных интервалов пифагорова строя, двигаться от звука  $f$  по чистым квинтам вниз, производя при этом соответствующие вычисления, то мы получим фригийскую гамму<sup>2</sup>, в которой частотные отношения между звуками выражены в долях струны:

$c$	$des$	$es$	$f$	$g$	$as$	$b$	$c^1$
1	$\frac{243}{256}$	$\frac{27}{32}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{81}{128}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{1}{2}$

Двигаясь по чистым квинтам вверх от звука  $h$  и по чистым квинтам вниз от звука  $des$  и производя соответствующие вычисления, мы придем в первом случае к звуку  $his$ , во втором —

к звуку  $deses$ . Звук  $his$  на интервал  $\frac{524288}{531441} \approx \frac{73}{74}$  выше звука  $c^1$ , а звук  $deses$  — на тот же интервал ниже звука  $c$ . Интервал, на который  $his$  выше  $c^1$ , а  $deses$  ниже  $c$  получил на-

<sup>1</sup> Перенесение звука на октаву вниз соответствует увеличению струны вдвое.

<sup>2</sup> По средневековой терминологии.

звание «пифагоровой коммы» (около  $1/9$  тона)<sup>1</sup>. Таким образом, строй Пифагора — незамкнутый.

Так как каждый интервал пифагорова строя получается посредством того или другого количества квинтовых ходов (вверх или вниз от исходного звука с последующими октавными перенесениями), то каждый интервал этого строя имеет только одно количественное выражение, так:

1) б. секунда, получаемая посредством двух квинтовых ходов, выражается отношением  $8/9$ ;

2) б. секста, получаемая посредством трех квинтовых ходов, выражается отношением  $16/27$ ;

3) б. терция, получаемая посредством четырех квинтовых ходов, выражается отношением  $64/81$ ;

4) диатонический полутон, получаемый посредством пяти квинтовых ходов, выражается отношением  $243/256$ ;

5) хроматический полутон, получаемый посредством семи квинтовых ходов, выражается отношением  $2048/2187$ .

Так как  $2048/2187$  меньше  $243/256$  струны, то хроматический полутон пифагорова строя больше диатонического на пифагорову комму. Так как все интервалы пифагорова строя (за исключением октавы) являются производными от ч. квинты, то пифагоров строй есть строй факторный.

Трудно сказать, какое влияние оказал пифагоров строй на музыку древних греков, но его роль в деле развития средневековой музыки вполне ясна.

В средние века стал широко применяться в церковной музыке орган — многоголосный инструмент с фиксированной частотой звуков. Этот инструмент требовал настройки. Так как единственным строем, хорошо известным в те времена, был строй Пифагора, то орган стали настраивать в этом строе. Настройка органа в пифагоровом строе не представляет больших трудностей. Она осуществляется путем настройки чистых квинт (т. е. квинт без биений) вверх и вниз от исходного звука и перенесения этих квинт в пределы одной октавы.

Однако уже первые попытки игры на органе, настроенном в пифагоровом строе, показали, что гармоническая б. терция этого строя звучит слишком напряженно и непригодна поэтому в качестве терции мажорного тонического трезвучия (гармонического). Нужно думать, что эту напряженность в первую очередь заметили участники хора, которые, повидимому, придерживались натуральной б. терции. Причину напряженности пифагоровой б. терции найти не трудно. В пифагоровом строе б. терция получается посредством четырех ходов по ч. квинтам вверх и выражается отношением  $64/81$ . Если выразить величину пифагоровой б. терции не долями струны, а числами колебаний, то окажется, что в этой терции

<sup>1</sup> Коммой называется интервал, меньший  $1/8$  целого тона.

верхнему звуку соответствует 81 колебание, а нижнему — 64. (С—Е в большой октаве при  $a=435$  герц). Для б. терции  $c^1—e^1$  отношение между числами колебаний будет  $324/256 (\frac{81}{64} \times \frac{4}{4})$ .

Звуки б. терции  $c^1—e^1$  имеют тон совпадения  $e^3$  (5-й частичный тон  $c^1$  совпадает с 4-м частичным тоном  $e^1$ ).

Число колебаний в секунду 5-го частичного тона =  $256.5=1280$ , число колебаний в секунду 4-го частичного тона =  $324.4=1296$ . При одновременном звучании обоих звуков б. терции  $c^1—e^1$  интервал будет давать 16 биений в секунду ( $1296—1280=16$ ). Эти биения и создают напряжение в гармонической пифагоровой б. терции.

Итак, попытка использовать пифагоров строй для настройки многоголосного музыкального инструмента с фиксированной частотой звуков вошла в противоречие с растущим гармоническим сознанием. Музыкальная практика требовала или отказа от гармонических терций вообще или замены их другими гармоническими б. терциями, приемлемыми для хора.

§ 2. Последним путем пошли Фольяни и Царлино, выдающиеся теоретики XVI века. Основываясь на работах Аристоксена, Птоломея и Дидима, они предложили брать для б. терции не  $64/81$ , а  $4/5$  ( $64/80$ ) струны, иначе говоря, рассматривать б. терцию, как основной, а не как производный интервал. Строй, полученный путем замены терции  $64/81$  терцией  $4/5$ , получил название «чистого», так как б. терция  $4/5$  звучит без биений (чисто).

Выразим теперь в долях струны частотные соотношения между звуками, образующими диатоническую мажорную гамму чистого строя, например:

$$c \ d \ e \ f \ g \ a \ h \ c^1$$

Если звуку  $c$  соответствует целая струна (1), то звуку  $e$ , образующему б. терцию со звуком  $c$ , будет соответствовать  $4/5$  струны; звуку  $a$ , образующему б. терцию со звуком  $f$ ,  $3/5$  струны ( $4/5$  от  $3/4=3/5$ ); звуку  $h$ , образующему б. терцию со звуком  $g$ , —  $8/15$  струны ( $4/5$  от  $2/3=8/15$ ). Звукам  $f$  и  $g$ , образующим кварту и квинту со звуком  $c$ , и звуку  $d$ , образующему кварту со звуком  $g$ , будет соответствовать, как и в строе Пифагора,  $3/4$ ,  $2/3$  и  $8/9$  струны.

Итак, звуки диатонической мажорной гаммы чистого строя в долях струны выразятся следующими отношениями:

$c$	$d$	$e$	$f$	$g$	$a$	$h$	$c^1$
1	$8/9$	$4/5$	$3/4$	$2/3$	$3/5$	$8/15$	$1/2$

Взяв в качестве основного интервала б. терцию и рассуждая аналогичным образом, мы найдем, что звуки фригийской гаммы выразятся:

<i>c</i>	<i>des</i>	<i>es</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>as</i>	<i>b</i>	<i>c<sup>1</sup></i>
1	15/16	5/6	3/4	2/3	5/8	5/9	1/2

Если, двигаясь квинтовыми и терцовыми ходами, найти части струны, соответствующие звукам *fis*, *cis*, *gis* и т. д. до *his* включительно, и части струны, соответствующие звукам *ges*, *ces*, *fes* и т. д. до *deses* включительно, то окажется, что *his* ниже *c<sup>1</sup>*, а *deses* выше *c*. Действительно, звуку *his*, получаемому путем движения на 3 б. терции вверх от *c* (*c—e—gis—his*), будет соответствовать 64/125 струны ( $1 \times 4/5 \times 4/5 \times 4/5$ ) (звуку *c<sup>1</sup>* соответствует 64/128, т. е. 1/2 струны). Звуку *deses*, получаемому путем движения на 3 б. терции вниз от *c<sup>1</sup>* (*c<sup>1</sup>—as—fes—deses*), будет соответствовать 125/128 струны ( $1/2 \times 5/4 \times 5/4 \times 5/4$ ) (звуку *c* соответствует 128/128, т. е. целая струна).

Разница между *his* и *c<sup>1</sup>*, *deses* и *c*  $\cong$  1/5 части тона.

Таким образом, чистый строй, подобно пифагорову, есть строй незамкнутый.

Если исследовать все интервалы, входящие в состав приведенной выше диатонической мажорной гаммы чистого строя, то не трудно убедиться, что в этом строе некоторые одноименные интервалы на различных ступенях гаммы имеют различные интервальные коэффициенты.

Так:

1) квинты на 1, 3, 4, 5 и 6-й ступенях выражаются отношением 2/3 (*c—g—<sup>2</sup>/<sub>3</sub>*; *e—h—<sup>8</sup>/<sub>15</sub>*;  $\frac{4}{5} = \frac{2}{3}$ ; *f—c<sup>1</sup>—<sup>1</sup>/<sub>2</sub>:<sup>3</sup>/<sub>4</sub> = <sup>2</sup>/<sub>3</sub>*; *g—d<sup>1</sup>—<sup>4</sup>/<sub>9</sub>:<sup>2</sup>/<sub>3</sub> = <sup>2</sup>/<sub>3</sub>*; *a—e<sup>1</sup>—<sup>2</sup>/<sub>5</sub>:<sup>3</sup>/<sub>5</sub> = <sup>2</sup>/<sub>3</sub>*);

2) Квинта на 2-й ступени *d—a* выражается отношением 27/40 ( $3/5 : 8/9 = 27/40$ );

3) м. терции на 3, 6-й и 7-й ступенях выражаются отношением 5/6 (*e—g—<sup>2</sup>/<sub>3</sub>:<sup>4</sup>/<sub>5</sub> = <sup>5</sup>/<sub>6</sub>*; *a—c<sup>1</sup>—<sup>1</sup>/<sub>2</sub>:<sup>3</sup>/<sub>5</sub> = <sup>5</sup>/<sub>6</sub>*; *h—d<sup>1</sup>—<sup>4</sup>/<sub>9</sub>:<sup>8</sup>/<sub>15</sub> = <sup>5</sup>/<sub>6</sub>*);

4) м. терция на 2-й ступени *d—f* выражается отношением 27/32 ( $3/4 : 8/9 = 27/32$ );

5) б. секунда на 1, 4-й и 6-й ступенях выражается отношением 8/9 (*c—d—<sup>8</sup>/<sub>9</sub>*; *f—g—<sup>2</sup>/<sub>3</sub>:<sup>3</sup>/<sub>4</sub> = <sup>8</sup>/<sub>9</sub>*; *a—h—<sup>8</sup>/<sub>15</sub>:<sup>3</sup>/<sub>5</sub> = <sup>8</sup>/<sub>9</sub>*);

6) б. секунда на 2-й и 5-й ступенях выражается отношением 9/10 (*d—e—<sup>4</sup>/<sub>5</sub>:<sup>8</sup>/<sub>9</sub> = <sup>9</sup>/<sub>10</sub>*; *g—a—<sup>3</sup>/<sub>5</sub>:<sup>2</sup>/<sub>3</sub> = <sup>9</sup>/<sub>10</sub>*).

Таким образом, в диатонической мажорной гамме чистого строя два интервальных коэффициента имеют:

квинта — 2/3 и 27/40 ( $2/3 = 27/40 \times 80/81$ )  
 кварта — 3/4 и 20/27 ( $20/27 = 3/4 \times 80/81$ )  
 м. терция — 5/6 и 27/32 ( $5/6 = 27/32 \times 80/80$ )  
 б. секста — 3/5 и 16/27 ( $16/27 = 3/5 \times 80/81$ )  
 б. секунда — 8/9 и 9/10 ( $8/9 = 9/10 \times 80/81$ )  
 м. септима — 9/16 и 5/9 ( $5/9 = 9/16 \times 80/81$ ).

Интервал 80/81, на который некоторые интервалы чистого строя больше или меньше соответствующих интервалов пифагорова строя, называется «дидимовой коммой». Дидимова

комма  $\approx 1/10$  тона. На эту же комму б. терция пифагорова строя больше чистой ( $64/81=5/4 \times 80/81$ ). Так как диатонический полутон, например, *c—des*, получается посредством ходов:

$$c-f-des$$

и выражается отношением  $15/16$  ( $3/4 \times 5/4 = 15/16$ ), а хроматический полугон, например, *c—cis*, получается посредством ходов

$$c-f-a-cis^1-cis$$

и выражается отношением  $24/25$  ( $3/4 \times 4/5 \times 4/5 \times 2$ ) и так как дробь  $24/25$  больше  $15/16$ , то звук *cis* (как соответствующий большему отрезку струны) ниже звука *des*. Таким образом, в чистом строе диатонический полутон больше хроматического (см. строй Пифагора). Из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Замена пифагоровых терций чистыми сделала возможным применение в музыкальном искусстве гармонических мажорных и минорных трезвучий (тонических) и расширила область частотных интонаций (квинта  $2/3$  и  $27/40$ , м. терция  $5/6$  и  $27/32$ , б. секунда  $8/9$  и  $9/10$  и т. д.).

2. Указанная замена не создала строя, вполне соответствующего требованиям музыкальной практики, так как чистый строй оказался:

а) незамкнутым, т. е. лишенным энгармонизма;

б) неудобным для модуляций даже в ближайшие (от *C-dur*) тональности;

в) требующим сложного устройства музыкальных инструментов с фиксированной частотой звуков.

Поясним изложенное в пп. б и в.

Чтобы сделать модуляцию из *C-dur* в *d-moll*, необходимо иметь в качестве тоники лада чистое минорное трезвучие *d—f—a*. Этим трезвучием не может быть минорное трезвучие II ступени *C-dur*, так как оно состоит из «нечистой» квинты *d—a* ( $27/40$ ) и пифагоровой м. терции *d—f* ( $27/32$ ). Чтобы сделать трезвучие *d—f—a* чистым, необходимо для звука *d* взять отношение  $9/10$  вместо  $8/9$ , т. е. понизить его на дидимову комму  $80/81$ . Таким образом, для совершения модуляции из *C-dur* в *d-moll* (и обратно) необходимо иметь 2 звука *d*, отличающихся по частоте на дидимову комму. Один в качестве звука доминантового трезвучия *C-dur*, другой в качестве звука тонического трезвучия *d-moll*. По тем же причинам для модуляции из *F-dur* в *g-moll* (и обратно) нужно иметь два «комматических звука» *g*, для модуляции из *G-dur* в *a-moll* нужно иметь два комматических звука *a* и т. д.

Для совершения модуляций во 2-ю степень родства потребуются новые комматические звуки. Таким образом, при широком пользовании модуляциями потребуется большое количество

комматических звуков. Если, кроме того, принять во внимание, что в чистом строе не существует энгармонизма (*fis* не совпадает по высоте с *ges*), то для пользования чистым строем потребуется значительное количество звуков в пределах одной октавы до 85 звуков). Это обстоятельство значительно усложняет устройство музыкальных инструментов с фиксированной частотой звуков и делает весьма трудной игру на этих инструментах. Из всего вышеизложенного следует, что чистый строй представляет собой весьма сложный математический строй.

Музыкальное искусство, которое уже в первой половине XVII века начало широко пользоваться энгармонизмом, не могло удовлетвориться чистым строем, и он разделил участь пифагорова.

Итак, причиной, заставившей музыкальное искусство отказаться от чистого строя, было отсутствие в этом строе энгармонизма, иначе говоря, незамкнутость этого строя. Поэтому дальнейшая эволюция строев пошла по пути создания так называемых «темпераций»<sup>1</sup>, т. е. таких математических строев, которые благодаря определенным частотным соотношениям между звуками являются замкнутыми. Так как музыкальное искусство не могло сразу отказаться от чистых квинт и чистых терций, преимущества которых перед терциями Пифагора были очевидны, то авторы темпераций пытались разрешить задачу, исходя из чистых больших и малых терций и чистых квинт.

---

<sup>1</sup> Темпераже—приводить в порядок

## Глава четвертая

### РАВНОМЕРНЫЕ ТЕМПЕРАЦИИ

§ 1. Попытки разрешить проблему строя, пригодного для музыкальных целей, посредством неравномерных температур, окончились неудачей, так как эти температуры давали возможность пользоваться ограниченным количеством тональностей (в отдельных тональностях появлялись так называемые «воющие» интервалы). Но эти попытки, особенно работы Веркмейстера и Нейдгардта, наметили правильный путь разрешения проблемы и привели позднейших исследователей к двенадцатизвуковому равномернотемперированному строю. Авторы этого строя исходили из следующих соображений. Если разделить пифагорову комму ( $1/9$  тона) на 12 равных частей, т. е. распределить ее между двенадцатью квинтами этого строя, то каждая квинта уменьшится на  $1/108$  тона ( $1/9 : 12 = 1/108$ ). При этом условии двенадцатая квинта вверх от звука  $c$  (*his*) совпадает с октавой от того же звука ( $c^1$ ), а двенадцатая квинта вниз от звука  $c^1$  (*deses*) совпадает с октавой от того же звука ( $c$ ). Совпадение *his* с  $c^1$ , а *deses* с  $c$  вызовет совпадение всех энгармонически равных звуков, отличающихся по высоте на пифагорову комму. Это совпадение произойдет путем смещения обоих звуков.

Так как в пифагоровом строе все целые тоны получаются посредством двух квинтовых ходов и потому равны между собой, и так как последовательность 6 целых тонов (например, от звука  $c$ ) приводит к звуку *his*, который на  $1/9$  тона выше  $c^1$ , то, уменьшая ч. квинты на  $1/108$  тона, мы уменьшаем каждый целый тон на  $1/54$ , а последовательность 6 тонов на  $1/9$  тона (пифагорову комму). Таким образом, в рассматриваемом нами темперированном строе октава состоит из 6 равных целых тонов.

Так как в пифагоровом строе хроматический полутон больше диатонического, то целый тон пифагорова строя делится на два неравных полутона. В рассматриваемом нами темперированном строе хроматический полутон равен диатоническому,

Поэтому в этом строе целый тон делится на два равных полутона. Таким образом, в этом строе октава состоит из 12 равных полутонов, а все другие интервалы из меньшего количества этих полутонов — от 11 (б. септима = ув. сексте) до 1 (м. секунда).

Исследуем теперь вопрос о музыкальной приемлемости интервалов 12-звукового равномернотемперированного строя. Так как названный строй получается путем деления ч. октавы на 12 равных полутонов, то все октавы этого строя, как и в прочих теоретических строях, чистые<sup>1</sup>. Темперированная квинта, которая меньше чистой на  $1/108$  тона, и темперированная кварта, которая больше чистой на  $1/108$  тона, по своим звуковым качествам почти не отличаются от чистых.

Темперированная б. терция меньше пифагоровой на  $1/27$  тона и, следовательно, больше чистой на  $1/16$  тона; наоборот, темперированная м. секста, являющаяся обращением б. терции, больше пифагоровой на  $1/27$  тона и меньше чистой на  $1/16$  тона.

Темперированная м. терция больше пифагоровой на  $1/36$  тона и, следовательно, меньше чистой на  $1/14$  тона; наоборот, темперированная б. секста, являющаяся обращением м. терции, меньше пифагоровой на  $1/36$  тона и больше чистой на  $1/14$  тона.

Итак, темперированная б. терция больше чистой на  $1/16$  тона, а темперированная м. терция меньше чистой на  $1/14$  тона. Эти терции по своим звуковым качествам заметно отличаются от чистых, но в музыкальном отношении приемлемы. То же самое можно сказать и относительно обращения терций — секст. Что же касается диссонирующих интервалов, то эти интервалы, сохраняющие свои звуковые качества в более широких границах, чем консонирующие, в темперированном строе не вызывают никаких протестов со стороны музыкального слуха. Таким образом, все интервалы изучаемого нами равномернотемперированного строя в музыкальном отношении приемлемы. Настройка хроматической гаммы 12-звукового равномернотемперированного строя представляет некоторые трудности. Так как все интервалы этого строя можно получить посредством квинтовых ходов, то теоретически вопрос сводится к нахождению числа биений в секунду, которое дает темперированная квинта на различных ступенях хроматической гаммы изучаемого строя, практически — к отсчету указанных биений. Первая часть вопроса разрешается следующим образом.

Если мы обозначим через  $x$  величину, показывающую, во сколько раз число колебаний верхнего звука темперированного полутона больше числа колебаний его нижнего звука, при-

<sup>1</sup> Под словом чистый следует понимать интервалы натуральные, т. е. интервалы, звуки которых находятся в простейших числовых отношениях. Например, октава—2:1, квинта—3:2, кварта—4:3 и т. д.



нятого за 1, то  $x^{12}$  будет величиной, показывающей, во сколько раз число колебаний верхнего звука октавы больше числа колебаний ее нижнего звука, принятого за 1. Так как число колебаний верхнего звука октавы больше числа колебаний ее нижнего звука в два раза, то мы можем составить следующее уравнение:

$$1 : x^{12} = 1 : 2$$

$$x^{12} = 2 \text{ или } x = \sqrt[12]{2} (= 2^{1/12}) = 1,0595.$$

Зная интервальный коэффициент темперированного полутона и число полутонов, заключающихся в интервалах темперированного строя, можно найти интервальные коэффициенты этих интервалов, а зная последние и считая, что звуку  $a^1$  соответствует 440 гц, можно найти числа колебаний для всех звуков темперированной хроматической гаммы от  $c^1$  до  $c^2$ .

Наименование звуков	Интервальные коэффициенты	Интервальные коэффициенты в десятичных дробях	Числа колебаний в секунду
$c^1$	1	1,0000	261,63
$cis^1(des^1)$	$\sqrt[12]{2}$	1,0595	277,18
$d^1$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^2$	1,1225	293,66
$dis^1(es^1)$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^3$	1,1892	311,13
$e^1$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^4$	1,2599	329,63
$f^1$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^5$	1,3348	349,23
$fis^1(ges^1)$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^6$	1,4142	369,99
$g^1$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^7$	1,4983	392,00
$gis^1(as^1)$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^8$	1,5874	415,30
$a^1$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^9$	1,6818	440,00
$b^1$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^{10}$	1,7818	466,16
$h^1$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^{11}$	1,8877	493,88
$c^2$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^{12}$	2,000	523,25

Известно, что при гармоническом воспроизведении ч. квинты 3-й частичный тон ее нижнего звука образует тон совпадения со 2-м частичным тоном ее верхнего звука. В темперированной квинте указанные частичные тоны не совпадают, и между ними возникают биения. Для квинты  $c^1—g^1$  число биений в секунду равно 0,89, так как число колебаний 3-го частичного тона звука  $c^1$  есть  $784,89^1$ , число колебаний 2-го частичного тона звука  $g^1$  есть  $784^2$ . Число биений в секунду для квинты  $e^1—b^1$  равно 1,07, так как число колебаний 3-го частичного тона звука  $e^1$  есть  $933,39^3$ , а число колебаний 2-го частичного тона звука  $b^1$  есть  $932,32^4$ . По тем соображениям число биений в секунду для квинты  $fis^1—cis^2$  равно 1,25, а для квинты  $a^1—e^2$  равно 1,48. Из всего только что изложенного видно, что для настройки темперированных квинт необходимо найти числа биений для всех 12 квинт. Однако практика настройки музыкальных инструментов с фиксированной частотой звуков показывает, что эти тонкости излишни и что для всех 12 квинт можно взять среднее число биений, т. е. для квинт 1-й октавы 1,1<sup>5</sup>. Эта замена значительно упрощает процесс настройки темперированных квинт, хотя и вызывает некоторое (совершенно незаметное для слуха) расхождение между вычисленными интервалами 12-звукового равномернотемперированного строя и фактически настраиваемыми. Установив число биений для квинт в 1-й октаве музыкальных инструментов с фиксированной частотой звуков (например, фортепиано), изложим метод настройки. Процесс настройки начинается с настройки  $a^1$  по камертону (440 гц). После настройки  $a^1$  настраивают все остальные звуки 1-й октавы. Рассмотрим один из способов настройки:



Поясним схему: квинты  $a^1—e^2$  и  $d^1—a^1$  настраиваются сначала как чистые, так как 1,1 биения в секунду можно получить как при некотором уменьшении квинты, так и при некотором ее увеличении. Затем  $e^2$  понижается (—), пока квинта  $a^1—e^2$  не даст 1,1 биения в секунду, а  $d^1$  повышается (+),

<sup>1</sup>  $261,63 \times 3 = 784,89$ .

<sup>2</sup>  $392 \times 2 = 784,00$ .

<sup>3</sup>  $311,13 \times 3 = 933,39$ .

<sup>4</sup>  $466,16 \times 2 = 932,32$ .

<sup>5</sup>  $\frac{0,89 + 1,07 + 1,25 + 1,48}{4} = 1,1$ .

пока квинта  $d^1 - a^1$  не даст 1,1 биения в секунду. Затем от  $e^2$  делается ход на чистую октаву в  $e^1$ , а от  $d^1$  — аналогичный ход в  $d^2$ . Эти ходы на октаву имеют целью заставить нас настраивать квинты только в пределах 1-й октавы, для которых число биений в секунду = 1,1<sup>1</sup>.

Дальнейшая настройка квинт происходит аналогичным образом, до тех пор пока с одной стороны мы дойдем до звука  $dis^2$  ( $es^2$ ) с другой — до звука  $es^1$  ( $dis^1$ ). Если эти звуки дадут ч. октаву, то настройка произведена правильно, если — нечистую октаву, то настройку необходимо проверить. Проверка настройки производится не только в отношении квинт и октав, но и в отношении мажорных и минорных трезвучий и их обращений (конечно, в отношении их звуковых качеств, а не отсчета биений, что в отношении терций затруднительно). Настройка остальных звуков фортепиано не представляет особых трудностей, так как они настраиваются по октавам вверх и вниз от полученных нами 12 звуков 1-й октавы. Профессиональные настройщики обычно не отсчитывают биений, а настраивают темперированные квинты на слух. Этот метод настройки более быстрый, но менее точный.

Сравнительно со строями пифагоровым и чистым, а также с неравномерными темперациями, упомянутыми нами ранее, 12-звуковой равномерно темперированный строй в музыкальном отношении является строем весьма совершенным:

- 1) он представляет собой строй замкнутый и энгармонический;
- 2) он состоит из интервалов, которые как при мелодическом, так и при гармоническом их воспроизведении вполне приемлемы для музыкального слуха;
- 3) он имеет в октаве только двенадцать звуков, могущих, однако, выполнить несколько ладовых функций;
- 4) он требует сравнительно простого устройства многоголосных инструментов.

Все перечисленные свойства 12-звукового равномерно темперированного строя делают возможности этого строя в музыкальном отношении почти неограниченными. И. С. Бах в «Das Wohltemperierte Klavier» впервые показал на практике все музыкальные возможности этого строя.

§ 2. Двенадцатизвуковой равномерно темперированный строй лежит в основе европейской музыки со времени И. С. Баха. Однако целый ряд музыкальных ученых и музыкантов не считает его вполне удовлетворительным. Неоднократно делались шаги к расширению этого строя, которые преследовали главным образом две цели:

---

<sup>1</sup> Практически отсчитывается приблизительно 1 биение в секунду.

1) улучшение звуковых качеств гармонических терций и секст, т. е. приближение их к натуральным (4 : 5, 5 : 6, 3 : 5 и 5 : 8);

2) введение в музыкальное искусство интервалов натурального звукоряда, выражающихся отношениями с участием множителей 7, 11, 13, 17, 19, 23, 31 и т. д.

Первую цель следует рассматривать как попытку вернуть музыкальное искусство к чистому строю, вторую — как попытку обогатить музыкальное искусство новыми интервалами натурального звукоряда (7/4, 11/8, 13/8, 19/16, 24/23, 32/31 и т. д.) и их производными.

Трудно что-нибудь возразить против улучшения звуковых качеств терций и секст, что же касается введения в музыку новых интервалов натурального звукоряда, то на этом вопросе следует остановиться.

На стр. 8 было указано, что высоте звука соответствует не одна определенная частота, а некоторая полоса частот, и что названия интервалов сохраняются при различных, но близких по величине интервальных коэффициентов.

Таким образом, «натуральные» м. септима 7/4, которая меньше м. септимы 12-звукового строя  $2^{10/12}$  на 1/7 тона<sup>1</sup>, незначительно отличается по своим звуковым качествам от последней, м. терция 19/16, которая меньше м. терции 12-звукового строя  $2^{3/12}$  на 1/68 тона, совершенно не отличается от последней.

Интервал 11/8, который больше квинты 12-звукового строя  $2^{5/12}$  на 1/4 тона и меньше ув. квинты  $2^{6/12}$  на 1/4 тона, резко отличается от обоих; интервал 13/8, который больше м. сексты 12-звукового строя  $2^{8/12}$  на 1/5 тона и меньше б. сексты 12-звукового строя  $2^{9/12}$  на 3/10, резко отличается от обоих.

Таким образом введение в музыкальную практику новых интервалов натурального звукоряда не дает заметного эффекта. Этот эффект должен наблюдаться лишь в тех случаях, когда вводимые интервалы резко отличаются от интервалов 12-звукового равномернотемперированного строя (например, 11/8 и 13/8). Однако, исследования показывают, что и в этом случае мы не воспринимаем новых интервалов, а воспринимаем частотные интонации или предыдущего или последующего интервала (11/8 — или ч. кварта или ув. кварта). Эффект, получаемый от введения в музыкальную практику таких интервалов, как 7/4 и 19/16, — ничтожен, так как интервал 19/16

---

<sup>1</sup>  $2^{10/12} : 7/4 = 1,78 : 1,75 = 1/7$

совершенно не отличается от соответствующих интервалов 12-звучового строя,  $7/4$  — отличается от них незначительно.

Среди равномерных темпераций, в которых октава делится на большее количество частей, чем 12, можно назвать прежде всего 24-звучовый равномернотемперированный строй. Этот строй, сохраняющий все особенности 12-звучового равномерно-темперированного строя, дает возможность осуществить с большой точностью интервалы, коэффициенты которых заключают в себе числа 11 и 13. Улучшение терций и секст (сравнительно с 12-звучовой темперацией) в рассматриваемой темперации не наблюдается.

Попытки сочинять музыку в 24-звучовом равномернотемперированном строе нельзя признать удачными. Другая равномерная темперация, представляющая собой расширение 12-звучового равномернотемперированной системы, есть 48-звучовая равномерная темперация.

В этом строе, сохраняющем все особенности как 12-звучовой, так и 24-звучовой равномерных темпераций, могут быть весьма точно осуществлены интервалы, коэффициенты которых заключают в себе множитель 7. Кроме того, этот строй дает возможность получить терции и сексты, весьма близкие к натуральным.

Музыкальные инструменты с фиксированной частотой звуков, необходимые для музыкального использования этого строя, весьма сложны по своему устройству (48 звуков в октаве!). Попытки сочинять музыку в 48-звучовом равномерно-темперированном строе также не дали удовлетворительных результатов.

Наиболее совершенная в звучовом отношении темперация была бы 53-звучовая, дающая возможность осуществить с большим приближением интервалы как чистого, так и натурального строя. Гармониум с 53 звуками в октаве был построен Бозанкетом. Практического применения рассматриваемая темперация также не получила.

---

## Глава пятая

### ЗОННЫЙ СТРОЙ

С тех пор, как в музыкальном искусстве появилось понятие строй, этим термином стали называть совокупность частотных отношений звуков в ладу. Наиболее известными являются строй Пифагора (Древняя Греция), чистый строй (Царлино) и 12-звуковой равномернотемперированный строй (Нейдгардт и Веркемейстер).

Появившаяся в последнее время электроизмерительная акустическая аппаратура (генератор звуковой частоты, хроматический стробоскоп и т. п.) заставила нас изменить наше понятие о строе. Многочисленные исследования, проведенные в акустической лаборатории Московской государственной консерватории, показали, что наш слух не способен воспринимать частоту звуков и их частотные отношения, а может воспринимать только высоту звуков и их высотные отношения, что мы воспринимаем как звук одного и того же названия целую область близких частот и как интервал одного и того же названия целый ряд частотных отношений между звуками. Эта полоса частот (зона) колеблется в пределах около  $\pm 25$  центов ( $\pm 1/8$  тона) даже у высококвалифицированных музыкантов — слушателей и исполнителей на различных музыкальных инструментах.

Так, например, у испытуемого № 2, обладающего превосходным абсолютным слухом, при прослушивании им отдельных звуков, в частности —  $a^1$ , зона абсолютного слуха оказалась равной 42 центам (приблизительно). У скрипача О., при исполнении им арии Баха из оркестровой сюиты *D-dur* (переложение для скрипки с фортепиано Вильгельми), наблюдались отклонения от равномернотемперированного строя до  $\pm 30$  центов<sup>1</sup>. Подобные отклонения наблюдаются и у исполнителей

---

<sup>1</sup> См. Гарбузов Н. А. Зонная природа звуковысотного слуха. Изд. АН СССР, 1948 г.

на других инструментах. Интересно отметить, что настройка фортепиано производится высококвалифицированными настройщиками не в 12-звуковом равномернотемперированном строе, а в зонном строе, в котором встречаются интервалы пифагорова и чистого строев и в котором максимальные отклонения от равномернотемперированного строя достигают  $\pm 9$  центов, а минимальные —  $\pm 2$  цента<sup>1</sup>.

Таким образом музыкальное искусство на практике не пользуется и никогда не пользовалось ни пифагоровым ни чистым строями в целом. Оно не может пользоваться и отвлеченно-теоретическим равномернотемперированным строем, а пользуется зонным строем, который является каким-то приближением к 12-звуковому равномернотемперированному строю и обусловлен зонной природой нашего слуха.

Итак, мы должны различать два вида 12-звукового равномернотемперированного строя: отвлеченно-теоретический, который существует только на бумаге, и практический, в котором исполняются и воспринимаются музыкальные произведения, а также настраиваются музыкальные инструменты (духовые инструменты, фортепиано). Этот строй, более или менее приближающийся к теоретическому, можно назвать двенадцатизонным равномернотемперированным музыкальным строем.

---

<sup>1</sup> См. Гарбузов Н. А. Внутризонный интонационный слух и методы его развития. Изд. Музгиз, 1951 г.

## АКУСТИКА ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

§ 1. Свободное распространение звуковых волн в закрытом помещении ограничено поверхностями стен, потолка, пола, мебели и т. п. При соприкосновении звуковых волн с указанными поверхностями энергия их частью отражается, частью проникает в новую среду. Совокупность всех явлений, вызывающих потерю энергии звуковых волн, распространяющихся в помещении, называется «поглощением звука». Величина поглощения энергии звуковых волн поверхностями разных материалов—различна. Поверхности металла, камня, мрамора, бетона и дерева поглощают незначительное количество падающей звуковой энергии. Наоборот, поверхности пористых материалов: войлока, тканей и пр., поглощают значительное количество звуковой энергии.

Один и тот же материал не в одинаковой степени поглощает звуки различной частоты. Так, например, плотные ткани: драпировки, занавесы и т. п., поглощают энергию высоких звуков значительно более, чем низких.

С изменением силы звука пропорционально изменяется величина поглощенной и отраженной энергии, поэтому соотношение между ними остается постоянным. Таким образом, для данного материала и определенной частоты звука поглощенная энергия всегда составляет одну и ту же часть энергии падающих звуковых волн, независимо от силы звука.

Отношение поглощенной звуковой энергии к полной энергии падающих звуковых волн называется «коэффициентом поглощения звука» и обозначается через  $\alpha$ . Если, например, коэффициент поглощения звука у линолеума равен 0,03, то это значит, что при отражении звука от линолеума поглощается три процента падающей звуковой энергии.

Отношение отраженной энергии к падающей называется «коэффициентом отражения звука» и обозначается через  $\beta$ . Сумма поглощенной и отраженной энергии равна энергии падающей или:  $\alpha + \beta = 1$ .

Так как звукопоглощение материала изменяется с изменением частоты звука, то для характеристики звукопоглощения этого материала приводят коэффициенты поглощения при звуках различных частот. Если указание на частоту звука отсутствует, то условно принимают коэффициент поглощения для звука средней частоты—512 к/с.

В нижеследующей таблице помещены коэффициенты звукопоглощения некоторых материалов. (См. 1-ю табл. на стр. 220).

Для более равномерного поглощения звуков различной частоты специально изготавливаются облицовочные материалы (См. 2-ю табл. на стр. 220).

§ 2. В закрытых помещениях звуковые волны, распространяясь от источника звука, многократно отражаются от стен, потолка и пола. Отраженные звуки настолько быстро следуют друг за другом, что наблюдатель не различает каждый отраженный звук в отдельности. Вследствие



многократного отражения от поверхностей помещения общая энергия звуковых волн, воспринимаемых слушателем, значительно больше энергии тех звуковых волн, которые идут непосредственно от источника звука по прямому пути. Поэтому звуки в закрытых помещениях более громки, чем на открытом воздухе.

Материалы	Коэффициенты поглощения звука					
	128	256	512	1024	2048	4096 к/с
Бетон	0,010	0,012	0,016	0,019	0,023	0,035
Кирпичная стена	0,024	0,025	0,031	0,042	0,049	0,07
Штукатурка	0,020	0,024	0,034	0,030	0,028	0,043
Деревянная обшивка	0,098	0,11	0,10	0,081	0,082	0,11
Драпир. со складками	0,07	0,37	0,49	0,81	0,66	0,54
Войлок (2,5 см толщин.)	0,09	0,34	0,55	0,66	0,52	0,39
Публика, сидящая в зале	—	—	0,96	—	—	—
Открытое окно	—	—	1,00	—	—	—

Материалы	Коэффициенты поглощения звука					
	128	256	512	1024	2048	4096 к/с
Акустический целотекс (тип А)	0,14	0,16	0,24	0,23	0,23	0,23
Акустическая штукатурка Моск. архитектур. ин-та марки АЦП	,20	0,22	0,28	0,32	0,32	0,40
Плиты асбестовые Моск. архитектур. ин-та марки АЦА	0,32	0,38	0,35	0,35	0,37	0,35

Когда источник звука перестает звучать, мы еще слышим после этого звук, который, постепенно затихая, через некоторое время нами уже совершенно не ощущается.

Наличие звуков в помещении после того, как источник звука перестал звучать, называется «реверберацией».

Продолжительность реверберации, т. е. время, прошедшее с момента прекращения звучания источника до момента прекращения восприятия звуковых волн, зависит как от акустических свойств помещения, так и от громкости источника звука. Мерой для сравнения реверберации различных помещений является время, в течение которого средняя плотность

звуковой энергии в помещении уменьшается в миллион раз (на 60 дБ). Такая реверберация называется «стандартной». Когда говорят о величине реверберации в помещениях, то всегда имеют в виду время стандартной реверберации

Величину реверберации определяют с помощью специальных приборов, называемых «реверберометрами».

Величина реверберации зависит: 1) от объема помещения, 2) от величины поглощения.

С увеличением объема помещения реверберация увеличивается, так как удлиняются пути отражающихся волн и отраженные звуки запаздывают больше.

С увеличением общего поглощения звука реверберация уменьшается, так как энергия отражающихся звуковых волн быстро убывает и волны скорее затухают.

Увеличение объема помещения вызывает также и увеличение общего поглощения вследствие увеличения площади поглощающих поверхностей. Однако реверберация при этом все же увеличивается, так как действие увеличения объема превышает действие увеличения поглощающих поверхностей.

Акустические качества помещения существенно зависят от имеющейся в нем реверберации. Реверберация, увеличивая громкость звуков, представляет с этой точки зрения положительное явление.

Однако при слишком большой реверберации отзвуки, примешиваясь к последующим звукам, создают гул и делают речь неясной, а музыкальное произведение беспорядочной смесью звуков. Слишком малая реверберация, не связывая между собой последовательных звуков, делает музыкальное исполнение сухим, отрывистым. Слышимость при малой реверберации ухудшается, так как уменьшается громкость звуков.

Для каждого помещения, в зависимости от его назначения (концертный зал, театр, аудитория, кинотеатр, радиостудия), существует своя наилучшая «оптимальная» реверберация.

Величина оптимума реверберации в данном помещении определяется экспериментально, слуховой экспертизой и приборами.

Так как реверберация звука в пустом помещении значительно отличается от реверберации в наполненном публикой помещении, то при определении оптимума реверберации учитывают присутствие в помещении публики, сильно поглощающей звук.

В качестве примера можно привести Колонный зал Дома союзов в Москве. Этот зал, с объемом в  $12\,500\text{ м}^3$ , при наполнении его публикой, имеет реверберацию 1,72 сек, являющуюся оптимальной. В пустом же зале реверберация чрезмерно велика — 3,55 сек, и акустика его неудовлетворительна.

Ниже приведены примерные значения оптимума реверберации для концертных зал в зависимости от их объема

Объем $\text{м}^3$	Оптимум реверб. сек.	Объем $\text{м}^3$	Оптимум реверб. сек.
до 300	От 0,8 до 1,06	15000	1,72
700	1,1	20000	1,8
1000	1,22	30000	1,91
1500	1,3	45000	2,01
3000	1,42	60000	2,1
5000	1,5	80000	2,2
10000	1,64	100000	2,24

В помещениях, предназначенных для речи (драматические театры, аудитории), оптимум реверберации несколько меньше, чем в концертных залах такого же объема.

Исправление акустики помещения в первую очередь сводится к установлению в нем оптимальной реверберации.

Большую реверберацию можно уменьшить, с одной стороны, путем уменьшения объема помещения (путем исключения части последнего); с другой стороны, в помещении данного объема для изменения реверберации пользуются уменьшением или увеличением общего поглощения звуков, покрывая стены материалом с другим коэффициентом поглощения, заменяя жесткую мебель мягкой и т. п.

При подборе звукопоглощающих материалов для получения оптимальной реверберации нужно учитывать их коэффициенты поглощения не только для звуков средней высоты, но и для низких и высоких. Так, например, покрытие стен войлоком или материей часто дает неудовлетворительные результаты, вследствие того, что эти материалы поглощают высокие звуки значительно сильнее, чем низкие (это можно видеть из таблицы на стр. 220; низкие звуки делаются от этого громче высоких).

Для уменьшения зависимости реверберации от различного количества публики мебель для сидения часто обивают мягкой материей, сильно поглощающей звук и при отсутствии сидящих на ней слушателей.

Существуют формулы, устанавливающие зависимость между реверберацией, поглощением и объемом помещения. Наиболее простой и достаточно точной для помещений средней величины (не слишком заглушен-

ных) является формула Сэбина:  $t = \frac{0,164 \cdot v}{\alpha \cdot S}$ ,

где  $t$ —время стандартной реверберации (для звука средней громкости);

$v$ —объем помещения;

$S$ —общая площадь всех звукопоглощающих поверхностей в помещении;

$\alpha$ —средний коэффициент звукопоглощения этих поверхностей.

По этой формуле можно вычислить величину общего звукопоглощения, необходимого для получения оптимума реверберации. Для этого,

написав ее в виде:  $\alpha \cdot S = \frac{0,164 \cdot v}{t}$

следует подставить в нее вместо  $v$  и  $S$  их численные значения, а вместо  $t$ —величину оптимума реверберации.

§ 3. Кроме оптимальной реверберации, для хорошей акустики помещения большое значение имеет равномерность распределения звуковой энергии в помещении. В помещениях удлиненной формы с этой целью позади источника звука, находящегося в одном конце помещения (например, на эстраде) часто устраивают отражающую поверхность для направления звуковых лучей в другой конец помещения.

Поверхности, отражающие в нужном направлении звуковые лучи, применяют обычно в концертных эстрадах на открытом воздухе; эти поверхности, имеющие форму раковины, отражая в сторону слушателей звуковые лучи, отчасти возмещают уменьшение громкости звуков на открытом воздухе, вследствие отсутствия реверберации.

Равномерности распределения звуковой энергии в помещении способствует рассеивание звука, чего можно достигнуть, покрывая отражающие поверхности стен или потолка лепными украшениями, барельефами и т. п. Наличие в помещении поверхностей выпуклой формы, рассеивающих звук, например, колонн, также благоприятствует равномерному распределению звуковой энергии в помещении. Однако следует заметить, что слушатель, находящийся за колонной значительной толщины, может слышать высокие звуки хуже, чем низкие, вследствие дифракции звуковых волн при обтекании ими колонны.

Поверхности вогнутой формы могут создать в помещении серьезные недостатки акустики. Так, вогнутый куполообразный потолок, собирая все отраженные им звуки в одной точке—фокусе, создает явление эхо.

Слушатель воспримет при этом сначала прямой звук, идущий непосредственно от источника звука, а затем, через некоторое время, отраженный.

Эхо мешает разборчивости речи и музыкальному исполнению. Для устранения эхо следует изменить форму вызывающей эхо поверхности, сделав, например, на куполообразном потолке перекрытие или устроив на нем неровности, рассеивающие звук.

Кроме указанных недостатков акустики помещений, происходящих от плохой реверберации и формы отражающих поверхностей, могут иметь место также недостатки акустики, вызываемые преломлением звуковых волн слоями воздуха различной температуры, резонансом и стоячими волнами

## ЭТАЛОН ВЫСОТЫ (частоты)

Мерилом (эталоном) высоты звука при настройке музыкальных инструментов обычно служит камертон<sup>1</sup>. Он представляет собой стальной стержень прямоугольного или квадратного сечения, согнутый U-образно так, что его две ветви идут параллельно. На вершине изгиба стержня камертона имеет ножку, за которую его держат при пользовании (рис. 82).



Рис. 82

Изгиб стержня камертона вызывает сближение его главных узлов, располагающихся примерно в точках перехода прямых ветвей в нижнее закругление.

Будучи возбужден ударом по концу одной из ветвей, или иным способом, камертон приходит в колебание и начинает издавать через некоторое время простой тон, практически весьма близкий к синусоидальному. При этом концы его ветвей колеблются в одинаковой фазе (но в противоположных направлениях) и с наибольшей амплитудой; колебание с противоположной фазой, но с соответственно меньшей амплитудой, возникает в дуге камертона, достигая максимума в точке прикрепления рукоятки.

Если камертон укреплен на открытом с одной стороны деревянном ящике (рис. 83), полость которого настроена в

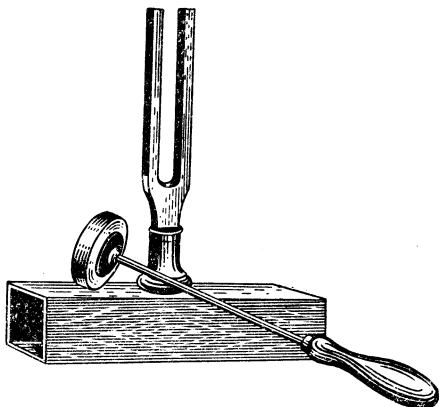


Рис. 83

<sup>1</sup> Русское название «камертон» неправильно, так как не отражает сущности его устройства и действия. На других языках его называют правильнее «вилкой для настройки».

резонанс с его основным тоном, то последний особенно усиливается, делается чистым и хорошо слышимым на расстоянии<sup>1</sup>.

Камертон почти не нашел себе употребления как звучащее тело в музыкальных инструментах, если не считать малоудачные и не получившие широкого применения камертонные клавиры, но зато служит для получения нормального тона при настройке музыкальных инструментов как вибратор, дающий практически не изменяющийся от времени звук постоянной высоты. Он был изобретен в 1711 г. придворным трубачом английской королевы Елизаветы Джоном Шором и имел тогда высоту звука  $a^1=419,9$  гц. С тех пор высота основного тона музыкальной настройки непрерывно повышалась. Так, например, в 1741 г. Гендель применял  $a^1=422,5$  гц, а во времена Вебера (около 1815 г.)  $a^1$  имело 423,2 гц. Быстрое повышение основного тона музыкальной настройки началось со второй четверти XIX века, когда в оркестре стали больше и чаще применяться духовые инструменты. Разогревание последних дыханием во время игры вызывало повышение их звуков, а это в свою очередь побуждало подстраивать выше и остальные инструменты оркестра. В 1826 г. в Дрезденской опере применялось  $a^1=435$  гц; в 1841 г. в Парижской опере  $a^1=453$  гц. Около этого же времени в Венской опере дошли до  $a^1=456$  гц и даже до  $a^1=466$  гц! Протесты вокалистов заставили прийти к соглашению об установлении более низкого международного строя; в качестве такового уже в 1859 г. Парижской консерваторией был принят «нормальный камертон» (diapason normal)  $a^1=435$  гц, признанный в 1885 г. на конференции в Вене как международный эталон основного тона музыкальной настройки и применявшийся вплоть до недавнего времени огромным большинством стран в качестве основной единицы при настройке инструментов.

В последние десятилетия появилась тенденция к установлению несколько более высокого стандарта основного музыкального тона; так например, в Англии был принят строй  $a^1=439$  гц, а в 1825 г. Национальное бюро стандартов США приняло  $a^1=440$  гц при  $68^\circ$  Фаренгейта ( $20^\circ$  Ц)<sup>2</sup>.

В России, согласно решению Венской конференции, применялся строй  $a^1=435$  гц; однако с 1 января 1936 г. в СССР принят в качестве обязательного к употреблению основного тона музыкальной настройки тон  $a^1=440$  гц при  $20^\circ$  Цельсия, т. е. совпадающий со стандартом США (ОСТ—7710).

## ЛОГАРИФИЧЕСКОЕ ИСЧИСЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛОВ. ЦЕНТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Величина любого интервала может быть выражена в виде отношения чисел колебаний входящих в его состав тонов. Равным образом мы видели, что при сложении интервалов необходимо перемножить между собой выражающие их интервальные коэффициенты, а при вычитании их друг из друга—разделить один интервальный коэффициент на другой.

Таким образом, относительно простые действия—сложение и вычитание—в таких случаях приходится заменять более сложными арифметическими действиями—умножением и делением дробей.

В целях упрощения математических операций при расчетах интервалов, целесообразно применять не самые отношения частот колебаний входящих в них тонов, но логарифмы этих отношений. Тогда сложение ин-

<sup>1</sup> В первый момент камертон дает несколько негармонических обертонов (см. колебания стержней—стр. 50), которые однако очень быстро затухают.

<sup>2</sup> В США применяется два уровня высоты настройки: так называемый низкий строй (low pitch), соответствующий указанному стандарту, и высокий строй (high pitch) при  $a^1=457$  гц, применяемый преимущественно в джаз-оркестрах.

тервалов выразится сложением их логарифмов, а вычитание — вычитанием.

В самом деле, если требуется сложить два интервала с отношениями:

$$\frac{f_1}{f_2} \text{ и } \frac{f_3}{f_4}$$

то, перемножая их, мы получим:  $\frac{f_1}{f_2} : \frac{f_3}{f_4} = \frac{f_1 \cdot f_3}{f_2 \cdot f_4}$

то же в случае вычитания:  $\frac{f_1}{f_2} : \frac{f_3}{f_4} = \frac{f_1 \cdot f_4}{f_2 \cdot f_3}$

Если же мы заменим отношения их логарифмами, то получим следующие выражения:

а) для сложения интервалов —  $(\log f_1 - \log f_2) + (\log f_3 - \log f_4)$

б) для вычитания интервалов —  $(\log f_1 - \log f_2) - (\log f_3 - \log f_4)$

Так как логарифмы интервалов могут быть вычислены заранее, то указанные действия являются весьма простыми операциями, тем более что и окончательные результаты могут быть непосредственно найдены в специально рассчитанных таблицах.

Пользование логарифмами интервалов особенно удобно для расчетов темперированных интервалов; в этих случаях, благодаря постоянству отношений чисел колебаний в одноименных интервалах, логарифмы их также будут одинаковыми.

Во всех случаях исчисления интервалов в логарифмах наиболее целесообразно применять логарифмы, вычисленные при основании 2. При этом соответствующие интервалы во всех октавах будут иметь одинаковые мантиссы, отличаясь только характеристиками, соответствующими номерам октав, т. е. логарифмы интервалов будут соответствовать их качествам.

Применяя такую систему логарифмов, легко видеть, что величина логарифма интервала равномерной темперации с  $n$  ступенями в октаве будет равна  $\frac{1}{n}$ .

Величина какого-либо интервала в долях октавы выразится тогда формулой:  $\frac{f_1}{f_2} = 2^N$  или  $N = \log_2 \left( \frac{f_1}{f_2} \right)$

Однако измерение интервалов в долях такой крупной единицы, как октава, не совсем удобно. Если взять за единицу полутон равномернотемперированной 12-звучковой скалы, то величина какого-либо интервала в долях этого полутона выразится формулой:  $\frac{f_1}{f_2} = 2^{\frac{S}{12}}$  или  $S = 12 \log_2 \left( \frac{f_1}{f_2} \right)$

При наиболее точных измерениях интервалов выгодно брать еще меньшую единицу измерения. Такой единицей, по предложению английского акустика Эллиса, является цент, равный 1/100 темперированного полутона, или 1/1200 октавы. Применение центов оказалось весьма удобным при точных вычислениях величины интервалов.

Таким образом, величина любого интервала в центах может быть выражена следующей формулой:

$$\frac{f_1}{f_2} = 2^{\frac{C}{1200}} \text{ или } C = 1200 \log \left( \frac{f_1}{f_2} \right)$$

Если принять в качестве стандартной высоты основного тона музыкальной настройки  $a^1 = 440$  гц, то частоту любого иного тона можно выразить следующими формулами:

- а) в октавах —  $f = 440 \cdot 2^N$   
 б) в полутонах —  $f = 440 \cdot 2^{\frac{S}{12}}$   
 в) в центах —  $f = 440 \cdot 2^{\frac{C}{1200}}$

Отсюда:

$$N = \log_2 \left( \frac{f}{440} \right)$$

$$S = 12 \log_2 \left( \frac{f}{440} \right)$$

$$C = 1200 \log_2 \left( \frac{f}{440} \right)$$

Поясним сказанное несколькими примерами вычислений:

1. Требуется найти частоту колебаний звука  $d$ , отстоящего от стандартного звука  $a^1$  на 19 полутонов вниз.

$$f = 440 : 2^{\frac{19}{12}} = 440 : 2,9966 = 146,83$$

$$\log 440 = 2,6434527$$

$$- \log 2^{\frac{19}{12}} = \frac{0,4766308}{2,1668219} = \log 146,83$$

2. Требуется найти частоту колебаний звука  $b^2$ , отстоящего от стандартного звука  $a^1$  на один полутоном вверх.

$$f = 440 \cdot 2^{\frac{1}{12}} = 440 \cdot 1,05946 = 466,16$$

$$\log 440 = 2,6434527$$

$$+ \log 2^{\frac{1}{12}} = \frac{0,0250858}{2,6685385} = \log 466,16$$

3. Требуется найти величину интервала  $435:440$  и выразить ее в центах.

$$C = 1200 \log_2 \frac{435}{440} = 1200 \cdot (-0,0168233) = -20,2$$

$$\log 1200 = 3,0791812$$

$$+ \log 0,0168233 = \frac{8,2259120}{1,3050932} = \log 20,188$$

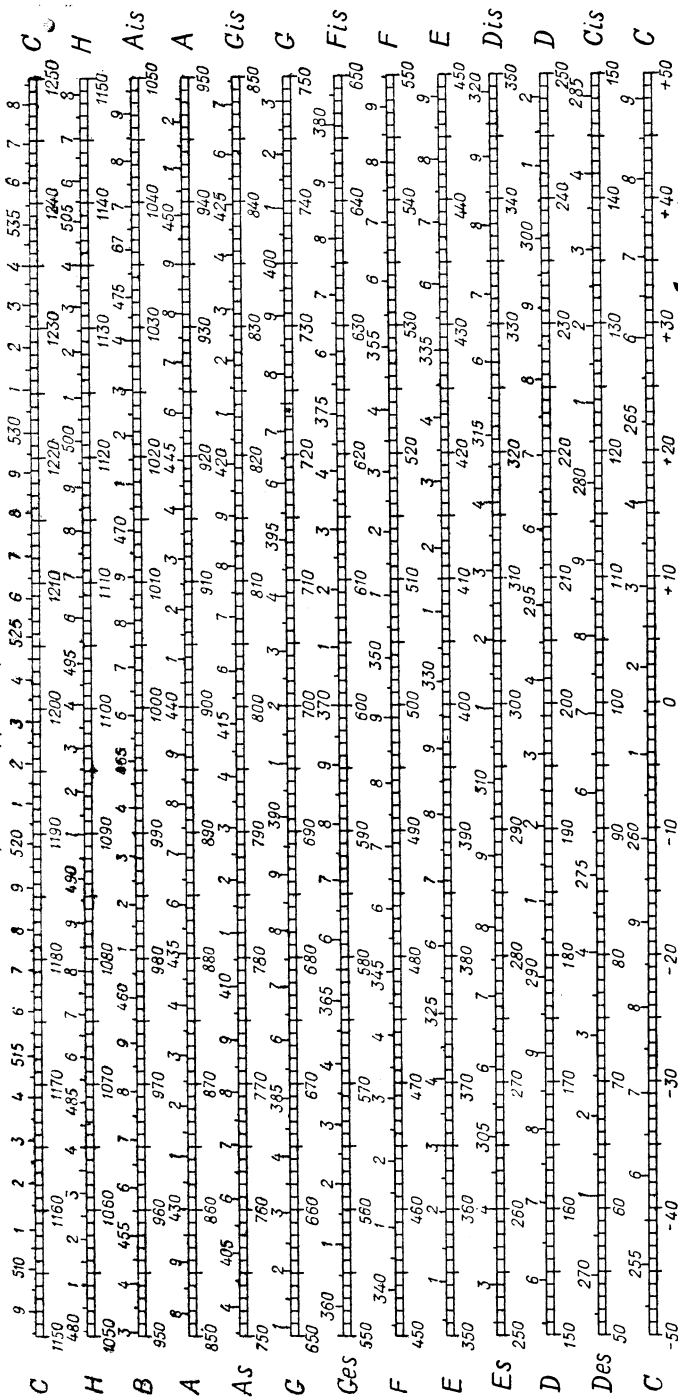
Практически наиболее удобно пользоваться готовыми таблицами или номограммами, вычисленными по вышеприведенным формулам и извлекающим от повторения таких довольно сложных вычислений.

Пример такой номограммы для тонов первой октавы дан на рис. 84.

Она состоит из 13 линеек, соответствующих 13 хроматическим полутонам, от  $c^1$  до  $c^2$  включительно. Каждая линейка разделена на 100 равных частей, соответствующих центам. Помещая на ее середине нормальную частоту одного из стандартных тонов темперированной гаммы, мы имеем по направлению влево—понижение данного звука до 50 центов,—и вправо—повышение до 50 центов.

Сверху на каждой линейке нанесены числа колебаний звуков (герцы, циклы, периоды), снизу же поставлены номера центов, считая за нуль  $c^1$  (261,6 гц).

Верхние цифры - герцы



Нижние цифры - центы

Рис. 84



1. Требуется определить, на сколько центов отличается от нормы звук с частотой 421,5 гц?

О т в е т:  $826 - 800 = 26$ , т. е. он выше звука  $as^1$  на 26 центов.

О т в е т: 511,5 гц соответствует 1160,5 центам

т. е. интервал больше темперированной большой сексты на 16,5 центов.

Ответ: берем по таблице подходящие кратные числа колебаний и переводим их, как в предыдущем примере, в центы, например:

Примечание. Если измеряемые звуки находятся в других октавах, то, путем умножения или деления на 2, 4, 8 и т. д., числа их колебаний приводят к числам колебаний первой октавы, после чего продельывают с ними соответствующие операции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гельмгольц. Учение о слуховых ощущениях. Перев. с нем. М. Петухова. 1875.
2. Ржевкин, С. Н., проф. Слух и речь в свете современных физических исследований.
3. Музекольд. Акустика и механика человеческого голосового аппарата. Перев. с нем. под ред. ГИМН'а. 1926.
4. Труды ГИМН'а. Сборник работ по музыкальной акустике. Вып. 1. 1925.
5. Труды ГИМН'а. Сборник работ по музыкальной акустике. Вып. II. 1929.
6. Гарбузов Н. А. Зонная природа звуковысотного слуха. 1948.
7. Гарбузов Н. А. Зонная природа темпа и ритма. 1950.
8. Гарбузов Н. А. Внутризонный интонационный слух и методы его развития. 1951

### Пособия по физической акустике

Для первоначального ознакомления с физической акустикой рекомендуется любой учебник по физике для средней школы, например: Фалеев и Перышкин. Курс Физики, ч. I.

Для более углубленного ознакомления с физической акустикой рекомендуется:

Хвольсон, О. Д., Курс физики, т. II.

### Литература ко второму отделу

1. Дьяконов, Н. А. Производство клавишных инструментов. Л.—М. 1936.
2. Зимин, П. Н. Фортепиано в его прошлом и настоящем. М. 1934.
3. Тиндаль, Д. Звук. ГИЗ, М. 1922.
4. Boehm, Th. Die Flöte und Flötenspiél, 1871.
5. Drechsel, F. A. Zur Akustik der Blasinstrumente, Leipzig, 1927.
6. Goebel, J. Grundzüge des modernen Klavierbaues, Leipzig, 1925.
7. Hansing, S. Das Pianoforte in seinen akustischen Anlagen, Schwerin, 1909.
8. Junghanns, H. Der Piano und Flügelbau, Leipzig, 1932.
9. Mahillon, V. C. Elements d'acoustique musicale et instrumentale, Bruxelles, 1874

10. Mahillon, V. C. Catalogue descriptif et analytique du Musée instrumental du Conservatoire Royal de Musique de Bruxelles, vol. III et IV.

11. Meyer, Erwin. Die Klangspektren der Musikinstrumente, Ztschr. f. techn. Physik, 12(1931), 606.

12. Richardson, E. G. Sound—A Physical Textbook, London, 1929.

13. Richardson, E. G. The Acoustics of orchestral instruments and of the Organ, London, 1929.

14. Sachs, Curt. Handbuch der Musikinstrumentenkunde, Leipzig, 1920.

15. Wolfenden, S. A. Treatise on the Art of Pianoforte Construction, London, 1916.

16. Римский-Корсаков, А. В. и Дьяконов, Н. А. Музыкальные инструменты Л.—М. 1952.

---

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоколебания 38, 101  
 Автоколебательные системы 38  
 Аграфы 64  
 Адаптация слуха 14  
 «Aeoline» 122  
 Аккордеон 122  
 Акустическая константа 66  
 Акустическая лаборатория МГК 217  
 Акустически-связанные системы 60,  
     104, 110  
 Аликвотная система 77  
 Альт 88, 95  
 Альтгорн 166  
 Альтернатор 148  
 Альтовый кларнет 135  
 Амбюшюрные инструменты 103  
 Амплитуда 6  
 Английский рожок 137  
 Аристоксен 206  
 Арундо-донакс (тростник) 124, 134,  
     137  
 Арфа 79  
 Аттака звука 147, 149, 173  
  
 Бакгауз 97  
 Барабан 61  
 Барабан-гонг 62  
 Барабан малый (военный) 62  
 Барабанная перепонка 31  
 Баритон (голос) 171  
 Баритон (эвфониум) 166  
 Бартон 159  
 Бас 155  
 Бас (голос) 171  
 Басовый кларнет 135  
 Бассет-горн 135  
 Бах И. С. 214  
 Баян 122  
 Безендорфер 77  
 Бел 13  
 Белл Г. 13  
 Бем Т. 107, 129  
 Бернштейн Н. А. 124  
  
 Биения 7, 14, 25, 145, 197, 205  
 Бинауральный эффект 14  
 «Bifaga» (piffaga) 145  
 Бишкур 125  
 Блютнер 77  
 «Больших чисел» закон 124  
 Boosey and Hawkes 157  
 Бозанкет 216  
 Бруски 36, 39  
 Бубен 63  
 Бьющие язычки 121  
  
 Валторна 163  
 Валторна двойная 164  
 Вебера-Фехнера закон 12, 53  
 Вебер К. М. 224  
 Вельте Э. 149  
 Венская конференция 224  
 Вентили 154  
 Веркмейстер 210  
 Вибрато 178  
 Вибратор 34  
 Вильом 98  
 Виолончель 88  
 Вихрей возникновение 106  
 Воздушные столбы, законы их коле-  
     баний 110, 113, 115  
 Волны бегущие 7  
     продольные 7  
     стоячие 7, 223  
 Волосатые (слуховые) клетки 32  
 Вольтка 125  
 «Vox humana» (регистр органа) 27  
 Высота звука 8  
  
 Гаммонда орган 149, 150  
 Ганзинг З. 68, 69  
 Гарбузов Н. А. 103, 217  
 Гармоника 122, 123  
 Гармоники 16  
 Гармониум 122, 123, 145  
 Гармонический звукояд 16

Гварнери А. 97  
 Гварнери дель Джезу 99  
 Гебель 68, 69  
 Гельмгольц 30, 33, 149, 175, 197  
 Гендель 224  
 Генератор звуковой частоты 217  
 Герман 175  
 Герман-Гольдап 131, 136, 162, 163, 164  
 Герц 11  
 Гиперболическая мензура 102, 126, 155  
 Глоккеншпиль 53  
 Глушители 75  
 Гобой 122, 135  
 Голосовая машина 155, 156  
 Голосовая щель 169  
 Голосовые связи 170  
 Гомогенные деки 66  
 Гонг 56  
 Гортань 169  
 Граммофон 35, 37  
 Громкоговорители 35, 37, 152  
 Громкость звука 12  
 Гротриан-Штейнвег 66  
 Грудной голос 172

Демпферы 75  
 Деревя подбор 65  
 Децибел 13  
 «Diapason normal» 224  
 Дидим 206  
 Дискантный колокольчик 77  
 Дифракция 7, 15, 222  
 Диффузоры 35  
 «Doublette» (регистр органа) 145  
 Лудки 116

Евстахиева труба 31  
 Еремеев И. И. 149

Жалюзи 145

Зависимость восприятия высоты от длительности 8—9

Законы колебания струн 47

Закрытые трубы 111, 126

«Закрытый» звук 173

Замр 125

Зацепление 37

Звуковой зонд 27

Звуковые системы 180

Звукоряд гармонический 16  
 натуральный 16, 17, 165  
 унтертонный 17

Зонная природа слуха 14, 150

Зорге 30

Зурна 125

Излучение 65

Импеданс акустический 119

Интервальные коэффициенты 19, 212

Интерференция 7

Интонировка 72

ИРПА 176, 177

Кавайе-Колль А. 119

Камертон 17, 223

Канифоль 37, 90

Каррьер 108

Кастаньеты 58

«Киксы» 121

К'ин 48

Клавесин 75

Клавикорд 75

Кларнет 121, 122, 132

Колебания гармонические или

периодические 6

затухающие 5, 37

незатухающие 6, 37

Колебательные движения 5

Колебательные контуры (ламповые) 148

Колковая механика 90

«Col legno» 90, 91

Колокола 56

Комбинационный тон разности 27, 145

Комма дидимова 207

пифагорова 205

Комптона орган 149

Конические трубы 102, 126

Контрабас 89

Контрабас-туба 164

Контрафагот 117, 139

Концертино 122

«Kornett» (регистр органа) 145

Кортнев орган 32

Краевые тоны 109, 110, 158

«Kromorne» (регистр органа) 144

Крон общего строя 155

Круглое окно 33

Ксилофон 52

Кэгилл Т. 148

Лабильные трубы 102, 113, 115, 116, 143

Лабиринт 32

Лад 188, 196

Лас 159

Литавры 45, 59

Ложные голосовые связи 170

«Low pitch» 224

Магийон Ш. 119, 120

Маскировка звуков звуками 21, 29

Материала влияние 47, 49, 92, 129,

133, 136, 140, 144

Мейер Э. 55, 58, 60, 62, 96, 130, 131,

133, 135, 136, 138, 140, 161,

163, 164, 165

Мембраны 36, 44

- Мензура фортепиано 68  
 Место удара молотка 69  
 Металлофон 53  
 Механо-электрические инструменты 148  
 Мидгли орган 149  
 «Mixture» (микстура) 145, 147  
 Модератор 77  
 Молоток фортепиано 70  
 Молоточек (слуховая косточка) 32  
 Монтаньяна 97  
 Морганиевы желудочки 169  
 Музеюльд 169, 171  
 Музыкальные системы 7, 180, 196  
 Мундштук амбушюрных инструментов 157  
 Мундштуки воронкообразные 103, 154  
 Мясников 176, 177  
 Наковальня (слуховая косточка) 32  
 Наружный слуховой проход 31  
 Настройка язычков 125  
 Натуральный звукояд 16  
 Нейдгардт 210  
 Обертоны гармонические 16  
     негармонические 16  
     субъективные 17  
 Область наибольшей чувствительности уха 8  
 Обтекания процессы 105  
 Объективные комбинационные тоны 30  
 Объемность звучания 15  
 Обыгрывание скрипки 98  
 Овальное окно 33  
 Орган 116, 123, 142  
 Органные трубы 110, 143  
 «Оргатрон» Эверетта 124, 150  
 Основной тон 16  
 Основной тон корпуса скрипки 94  
 ОСТ—7710 224  
 Осциллограф 177  
 Отзывчивость 102  
 Открытые трубы 113, 126  
 Открытый звук 173  
 Отражение звука 219  
 Параболическая труба 102  
 Педаль задерживающая 76  
     левая 76  
     правая 76  
 Пентатоника 195  
 Передувание 109  
 Перепонки 36, 44  
 Период 6, 17  
 Пианино 77  
 Пикколо флейта 110, 131  
 Пифагор 203  
 «Piffaga» 145  
 Pizzicato 90, 91  
 Пластинки 36, 41  
 Поглощение звука 219  
 Полукружные каналы 31  
 Полусамозвучающие тела 36  
 Порог болевой 12  
 Порог слышимости 12  
 Преддверие 33  
 Преломление звука 223  
 Прерывистое раздражение 25  
 «Prinzipal» (регистр органа) 144  
 Простые звуки 15  
 Птоломей 206  
 Равногромкие звуки 13  
 Ранджера орган 149  
 Размах колебания 6  
 Разница рояля и пианино 77  
 Разностный тон «1» 28  
 «Rauschquinte» (регистр органа) 145  
 Реверберация 220  
 Реверберация искусственная 151  
 Резонанс 223  
 Резонансная дека 64  
 Резонаторы 127  
 Риман 18  
 Ричардсон Э. Г. 109, 158  
 Родство звуков непосредственное 21, 185  
     опосредствованное 21, 185  
 Рояль 77  
 Рэйли 57  
 Савар 94  
 Саксофоны 155, 166  
 Саксофон 122, 140  
 Самозвучающие тела 36, 52  
 Сарасате 100  
 Саррюзофон 122, 141  
 Световой орган Вельте 149  
 Свирель 110, 116  
 Свистящие инструменты 102  
 Селлюлофон 149  
 «Sesquialtera» (регистр органа) 145  
 Сила звука 12  
 Симонов И. Д. 149  
 Синтез тембров 150  
 Синусоидальные колебания 15, 17  
 Скрипка 83  
     бочки или обечайки 85  
     гриф 86  
     деки 84  
     душка 87, 90  
     колки 86  
     корпус (кузов) 84  
     обручички 85  
     подбородник 87  
     подгриф 87  
     подставка 86  
     порожек 86

пружина 84  
 рукоятка 85  
 смычок 87  
 стойки 85  
 струны 88  
 сурдина 87  
 ус 84  
 эфы 84  
 Слух абсолютный 9  
 внутренний 10  
 относительный 9  
 Смычек 87  
 Сокальский 183  
 Сонометр 46  
 Сопилка 116  
 Состав звука 16  
 Спектр звука 52  
 Стейнвей 67, 76, 77  
 Стержни 36, 39  
 Стон 159  
 Стоячие волны 111, 118  
 Страдивариус 86, 88, 89, 98, 99, 100  
 Стремя (слуховая косточка) 32  
 Стробоскопический метод 10  
 Строй 180  
 Струны 36, 46, 48, 67  
 Субъективные комбинационные тоны 30  
 «Sulla tastiera» 92  
 Суперпиано Шпильмана 149  
 Табер Джонс 57  
 Тамбурин 63  
 Там-там 56  
 Тарелки 54  
 Таризио 98  
 Тартини 30  
 Телегармониум 148  
 Телефон 38  
 Тембр 16, 92  
 Тембра изменения 166  
 Тембр фортепианного звука 73  
 Темперированный строй 16, 210  
 Теноргорн 166  
 «Tertian» (регистр органа) 145  
 Толчок 36  
 Тоны совпадения 22, 199  
 Точечный эффект 153  
 Тремулант (регистр органа) 145  
 Трение 37  
 Треугольник 53  
 Тромбон 117, 162  
 «Trompette» (регистр органа) 144  
 Трость 90, 134  
 Труба 161  
 Трубки 42  
 Трубчатые «колокола» 58  
 Трубы органные 143  
 Туба 164  
 Тубафон 58

Тулон 149  
 Тулумбас 61  
 Удар 36, 90  
 Улитка 31  
 «Unda maris» (регистр органа) 145  
 Унисон физический и физиологический 24  
 Унтертоны 17  
 Уолфенден 68, 69  
 Уровень громкости 13  
 Уровень шума 14  
 Утомление смычковых инструментов 99  
 Ухо наружное, среднее, внутреннее 31  
 Ушная раковина 31  
 Фагот 121, 122, 138  
 Фальцет 172  
 «Physharmonika» (регистр органа) 122  
 Фисгармония 122, 145  
 Флажолет 110, 116  
 Флажолетные тоны 50, 82, 93  
 Флейта оркестровая 107, 129  
 Флейта Пана 110, 119  
 Флюгельгорн 166  
 «Flûte octavante» (регистр органа) 115  
 Фольяни 206  
 Фон 13  
 Фонограф 35  
 Форманты 53, 96, 124, 131, 136, 139, 149, 161, 162, 175, 178  
 «Фотона» Еремеева 149  
 «High pitch» 224  
 Хладни Э. 35, 43  
 Хладниевы фигуры 44, 55  
 Хоровой регистр 151  
 «Хоры» струн 69  
 Царлино 206  
 Цент 11, 225  
 Цуг-флейта 117  
 «Zymbel» (регистр органа) 145  
 Частота 6  
 Частотомер стробоскопический 11  
 Челеста 54  
 Шенг 125  
 Шор, Джон 224  
 Шпиль 89, 90  
 Шпильман 149  
 Шредер 67, 77  
 Штег 64, 65  
 Штумпф 147, 198  
 Шумомер 13  
 Шумы 7

Щипок 37, 90

Эвфониум 166

Экспоненциальная мензура 102, 126,  
155

Электрические органы 148

Электрофонные инструменты 142, 148

Эллис 225

Эолова арфа 105

«Эфы» 84

Эхо 222

Юнг 40

Юнга законы 45, 49, 69

Юнгханс 68, 69

Явор 85

Язычки бьющие 121

свободные 122

Язычковые инструмнты 102

Янковский Б. А. 166

---



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	ко 2-му изданию	3
Введение		4

## Отдел первый

## Колебательные движения. Восприятие звуковых колебаний

Глава 1. Понятие о колебательном движении . . . . .	5
Глава 2. Высота звука . . . . .	8
Глава 3. Громкость звука . . . . .	12
Глава 4. Тембр звука . . . . .	16
Глава 5. Восприятие созвучий . . . . .	19
Глава 6. Устройство уха. Резонансная теория Гельмгольца . . . . .	31

## Отдел второй

# Акустика музыкальных инструментов и человеческого голосового аппарата

Глава 1. Общее понятие о музыкальных инструментах	34
Глава 2. Звуковые колебания твердых тел	39
Глава 3. Ударные инструменты	52
Глава 4. Фортепиано	64
Глава 5. Арфа	79
Глава 6. Смычковые инструменты	83
Глава 7. Духовые инструменты	101
Глава 8. Звуковые колебания газообразных тел	105
Глава 9. Свистящие и язычковые инструменты	129
Глава 10. Орган и органоподобные инструменты	142
Глава 11. Инструменты с воронкообразными мундштуками	154
Глава 12. Голосовой аппарат человека	168

### Отдел третий

## Акустика музыкальных систем и строев

Глава 1. Музыкальные системы	180
Глава 2. Консонанс и диссонанс интервалов	197
Глава 3. Математические строи	203
Глава 4. Равномерные темперации	210
Глава 5. Зонный строй	217

## Приложения

Акустика закрытых помещений . . . . .	219
Эталон высоты (частоты) . . . . .	223
Логарифмическое исчисление интервалов. Центы и их применение	224
Л и т е р а т у р а . . . . .	229
А л ф а в и т н ы й    у к а з а т е л ь . . . . .	231

Редактор М. Виноградов Техн. редактор Р. Нейман  
Корректор А. Ржечковская

Подписано к печати 9/III 1954 г. Формат бумаги 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. л. 7,375. Печ. л. 14,75.  
Уч.-изд. л. 13,0. А 02198. Тираж 5 500 экз. Заказ 1140

Типо-литография Музгиза. Москва, Щипок, 18.