

бинауральный эффект обусловлен ощущением разности фаз звуков, слышимых правым и левым ухом. Если к одному уху звук приходит на $3 \cdot 10^{-5}$ сек. раньше или позже, чем к другому уху, это уже делается заметным и оценивается нами как отклонение источника звука примерно на 3° от прямой «прямо перед» наблюдателем.

§ 71. Высота и тембр звука

Как уже упоминалось, частоте звуковых синусоидальных колебаний соответствует ощущение высоты звука. В случае сложных не-синусоидальных колебаний высота звука оценивается ухом по высоте основного тона (период основного тона совпадает с периодом анализируемого звука). Обертоны, даже если их относительная сила велика, мало влияют на ощущение высоты звука.

Чтобы дать представление о высоте звуков, наиболее используемых в музыке, отметим, что у рояля самый низкий звук соответствует 27 колебаниям струны в секунду, а самый высокий — 4184 *гц*.

Ряд звуков, отличающихся по числу колебаний в два раза, т. е. составляющих октаву, воспринимается как ряд звуков, равноудаленных друг от друга по высоте. Таким образом, геометрическая прогрессия частот звуков соответствует арифметической прогрессии в субъективной оценке высоты звуков.

Музыкальные звуки составляют восемь октав: субконтроктава (16—32 *гц*), контроктава (32—65,5 *гц*), большая октава (65,5—131 *гц*), малая октава (131—262 *гц*), первая октава (262—523 *гц*; в физике эту октаву принято обозначать как третью), октавы вторая (523—1046 *гц*), третья (1046—2092 *гц*) и четвертая (2092—4184 *гц*).

Голоса певцов характеризуются следующими диапазонами частот и соответствующих им длин волн основных тонов:

	Частота в <i>гц</i>	Длина волны в воздухе при 15°C в <i>см</i>
Бас	90— 340	380—100
Баритон	110— 440	310— 77
Тенор	130— 520	260— 65
Контральто	200— 780	170— 44
Меццо-сопрано	220— 880	130— 32
Сопрано	260—1050	155— 39
Колоратурное сопрано	—1390	— 25

Ухо не способно оценить высоту звука, если продолжительность звучания составляет меньше $1/20$ сек. В случае самых низких воспринимаемых нами звуков за указанное время, необходимое для оценки высоты звука, происходит одно-два колебания, в случае самых высоких слышимых звуков — до 1000 колебаний.

При одновременном звучании двух близких по частоте тонов их высота воспринимается раздельно, если относительная разность частот этих звуков превосходит 2—3%:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 0,02.$$

При меньшей разности частот слышится один слитный звук средней высоты.

При одновременном звучании близких друг к другу тонов возникают *биения* (быстро следующие друг за другом замирания и усиления звука), которые оказываются в особенности неприятными для слуха, если число биений достигает 33 в 1 сек.

При одновременном звучании двух тонов с большой силой звука (так же как и вообще при колебательном движении тела под действием двух периодических сил большой амплитуды, когда пропорциональность между смещением и действующими силами является нарушенной) обычные законы сложения колебаний усложняются. В этом случае, как показал Гельмгольц, совместное действие двух вынуждающих периодических сил с частотами ν_1 и ν_2 дает результирующее колебание такой формы, что его можно считать состоящим из четырех гармонических колебаний с частотами ν_1 , ν_2 , $\nu_1 - \nu_2$ и $\nu_1 + \nu_2$. Два последних колебания носят название *комбинационных колебаний* — разностного и суммарного. Комбинационные колебания могут возникать в нашем слуховом аппарате (вследствие отклонения от пропорциональности между смещением стремечка и упругими силами тканей). Обычно отчетливо слышны разностные комбинационные тоны, что же касается суммарных комбинационных тонов, то они едва заметны.

Для музыкальных целей более важна не абсолютная, а *относительная высота* звуков. При построении музыкальной последовательности звуков — при построении *мелодии*, а также и при музыкальном одновременном сочетании звуков — в *гармонии* звуков — пользуются преимущественно такими интервалами частот, при которых отношения частот звуков $\frac{\nu_1}{\nu_2}$, $\frac{\nu_2}{\nu_3}$ и т. д. выражаются дробями $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{5}{6}$ и т. д. Каждому такому *музыкальному интервалу*, определяемому отношением частот звуков присвоено особое название:

Название созвучий	Отношение частот	Название созвучий	Отношение частот
Унисон (прима)	1:1	Терция большая	4:5
Октава	1:2	Терция малая	5:6
Квинта	2:3	Дуодецима	1:3
Кварта	3:4	Секста большая	3:5

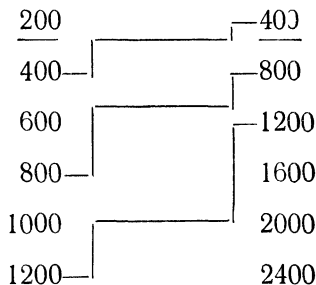
Перечисленные наиболее благозвучные интервалы носят общее название *консонансов*¹⁾. Применяются и менее благозвучные интервалы — *диссонансы*²⁾:

Название созвучий	Отношение частот	Название созвучий	Отношение частот
Секунда большая (тон большой)	8:9	Септима большая	8:15
Секунда малая (тон малый)	9:10	Септима малая	5:9
		Полутон большой	15:16
		Полутон малый	24:25

Всякий интервал, меньший малого полутона, называют *коммою*, но обычно под коммою подразумевают интервал 80 : 81.

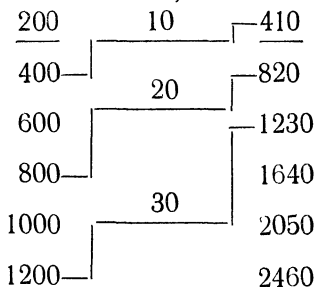
Обращает на себя внимание тот факт, что в музыке не применяются интервалы, определяемые дробями, содержащими число 7. Это число как бы отделяет консонансы от диссонансов (дроби, определяющие консонансы, имеют в числителе и в знаменателе числа, меньшие 7).

Совершенство консонанса, по-видимому, стоит в связи с числом тонов, общих у обоих звуков. Возьмем, например, два звука с частотами 200 и 400 *гц*, составляющими октаву, и выпишем частоты их пяти низших обертонов:



Мы видим, что у двух звуков, составляющих октаву, из пяти низших обертонов два обертона являются общими, и, помимо того, основной тон высшего звука совпадает с первым обертоном низшего звука.

Диссонанс производит тем менее благозвучное впечатление, чем больше биений (имеющих частоту порядка 10—50 *гц*) возникает от сочетания обертонов и комбинационных тонов звуков. Например, возьмем несколько «расстроенную» октаву: два звука с частотами 200 и 410 *гц*:



1) От латинского слова *consonare* — согласоваться.

2) От латинского слова *dissonare* — не согласоваться.

Мы видим, что в этом случае возникают биения с частотами 10, 20 и 30 гц. Помимо того, основные тоны указанных звуков дают комбинационный разностный тон с частотой 210, от сочетания которого с основным тоном низшего звука также возникает биение с частотой 10 гц.

С. Н. Ржевкин обнаружил, что при раздельном слушании двух звуков различными ушами ощущение диссонанса и консонанса полностью исчезает; стало быть, восприятия консонанса и диссонанса создаются в периферических органах слуха, а не в центральной нервной системе.

Сочетания трех или большего числа звуков называют *аккордом*. Наиболее благозвучный аккорд — *мажорное трезвучие* — получается, когда частоты основных тонов удовлетворяют отношению 4 : 5 : 6. На повторении этого аккорда построена *натуральная мажорная гамма*:

do	re	mi	fa	sol	la	si	do ₁
8:9	9:10	15:16	8:9	9:10	8:9	15:16	
тон большой	тон малый	полутон	тон большой	тон малый	тон большой	полутон	

Действительно, нетрудно видеть, что при указанных интервалах частоты звуков: do — mi — sol, а также sol — si — re и fa — la — do₁ относятся, как числа 4 : 5 : 6 (например, $\frac{\nu_{do}}{\nu_{mi}} = \frac{8}{9} \cdot \frac{9}{10} = \frac{8}{10} = \frac{4}{5}$).

Мажорное трезвучие представляет собой сочетание звука (какой-либо частоты ν) с его большой терцией ($\frac{5}{4} \nu$) и квинтой ($\frac{3}{2} \nu$), что соответствует соотношению частот $1 : \frac{5}{4} : \frac{3}{2} = 4 : 5 : 6$. Весьма благозвучным является также *минорное трезвучие*, которое представляет собой сочетание звука (какой-либо частоты ν) с его малой терцией ($\frac{6}{5} \nu$) и квинтой ($\frac{3}{2} \nu$); это соответствует отношению частот $1 : \frac{6}{5} : \frac{3}{2} = 10 : 12 : 15$. На повторении минорного созвучия построена *натуральная минорная гамма*:

do	re	mi ^b	fa	sol	la ^b	si ^b	do ₁
8:9	15:16	9:10	8:9	15:16	8:9	9:10	
тон большой	полутон	тон малый	тон большой	полутон	тон большой	тон малый	

(знак ^b носит название *бемоль* и означает понижение высоты звука на полутон, г. е. на $\frac{16}{15}$). Повышение звука на полутон обозначается знаком # — *диез*). При указанных интервалах между звуками гаммы получаются минорные трезвучия: do — mi^b — sol, а также sol — si^b — re₁ и fa — la^b — do₁ (например, $\frac{\nu_{do}}{\nu_{mi^b}} = \frac{8}{9} \cdot \frac{15}{16} = \frac{10}{12}$). Наряду с указанной минорной гаммой, которой пользуются в музыке при составлении мелодий как «нисходящей» гаммой, применяют также «восходящую» минорную гамму, которая отличается от мажорной гаммы только заменой звука mi на mi^b. В гармонии применяется минорная гамма, отличаю-

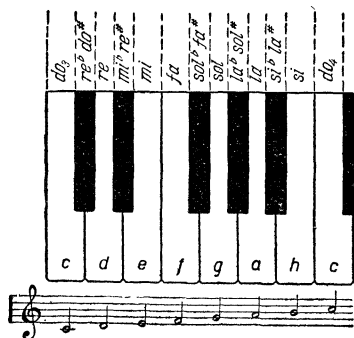
щаяся от мажорной заменой звуков: mi на mi^b и la на la^b (но si берется без бемоля).

Как видно из вышеприведенных схем мажорной и минорных гамм, интервалы между смежными звуками в этих натуральных гаммах неодинаковы. Это приводит к существенным неудобствам, во избежание которых сделано соглашение: жертвуя абсолютной музыкальной чистотой, применять так называемую *темперированную гамму*, содержащую в октаве 12 равных между собой интервалов, так что частота

каждого смежного звука в $\sqrt[12]{2} = 1,05946$ раза превосходит частоту предыдущего звука. Схема темперированной гаммы представлена на рис. 173. Важнейшие консонансы в темперированной гамме почти не нарушаются: унисон и октава, понятно, остаются неизменными; кварта и квинта в темперированной гамме выражаются отно-

шениями единицы к $2^{\frac{5}{12}} = 1,3348$ и к $2^{\frac{7}{12}} = 1,4983$, тогда как в натуральных гаммах кварта и квинта выражаются отношениями $\frac{4}{3} = 1,3333$ и $\frac{3}{2} = 1,5000$.

Рис. 173. Гамма на рояле (обозначения нот).



Согласно международному соглашению (1936 г.) частота звука la_3 (la — второй струны скрипки) принята равной 440 *гц*. В таблице приведены частоты других звуков темперированной гаммы.

Обозначение звука (название нот)	Частота в темпериро- ванной гамме	Длина волны (в см) в воздухе при 15° С ($c \sim 340$ м/сек)
do ₃	261,6	130
re ₃	293,7	115,7
mi ₃	329,6	103,2
fa ₃	349,2	97,4
sol ₃	392	86,7
la ₃	440	77,3
si ₃	493,9	68,8
do ₄	523,2	65,0

Как уже было упомянуто выше (§ 68), тембр звука зависит от числа и относительной силы обертонов. Относительная сила обертонов у одного и того же музыкального инструмента зависит от способа возбуждения звука. Например, тембр звука, издаваемого струной, можно изменять в широких пределах, выделяя те или другие обертоны (для чего, возбуждая звук, нужно проводить смычком там, где находится пучность стоячих волн данного обертона).

Вследствие резонансного выделения тех или иных обертонов тембр звука струнных инструментов сильно зависит от устройства и качества различных (в частности, деревянных) деталей инструмента.

Тембр звука определяется не только числом и относительной силой обертонов, но также характерными процессами нарастания и изменчивости звука. Опытами

Штумфа (1926) и других исследователей было установлено, что если исключить начальную стадию установления звука (начинать слушание, когда звучание какого-либо звука делается стационарным), то тембр звука кажется иным, причем в этом случае звуки, издаваемые различными музыкальными инструментами, оказываются настолько сходными в отношении тембра, что даже опытные музыканты часто ошибаются, определяя инструмент по тембру звука.

В смычковых инструментах нарастание каждого извлекаемого звука продолжается примерно $\frac{1}{10}$ сек. В течение этой начальной стадии звучания звук является нестационарным не только в отношении амплитуды, но происходит также характерное изменение частотного состава звука. В первый момент нарастания звука преобладают высокие обертоны (с частотами от 3000 до 5000 *гц*), и только к концу указанной стадии нарастания звука обертоны уступают по относительной силе основному тону. Мы воспринимаем процесс нарастания звука слитно с последующим стационарным звучанием и впечатление, вызванное начальной стадией, сохраняем как некоторый оттенок звука. У хороших инструментов стадия нарастания звука дает ощущение приятного тембра; строго стационарный звук, прослушанный без начальной стадии нарастания, производит монотонное впечатление и менее приятен. Тембр звуков, издаваемых роялем, заметно изменяется в зависимости от скорости, с которой опускают клавишу (что в известной мере зависит от силы удара).

У большинства духовых инструментов стадия нарастания звука меньше влияет на тембр звука, чем у струнных инструментов. Это отчасти объясняется тем, что у многих духовых инструментов стадия нарастания звука является весьма короткой: у гобоя $\frac{1}{100}$ сек., у кларнета $\frac{1}{20}$ сек. Однако у флейты процесс нарастания звука является относительно продолжительным ($\frac{2}{10} \div \frac{3}{10}$ сек.), и это заметно обогащает тембр звуков флейты.

Для оценки музыкальных качеств голоса хороший тембр голоса, несомненно, является не менее важным, чем сила голоса. Звук хорошего певческого голоса нестационарен: в быстро следующие друг за другом моменты времени (около шести раз в секунду) акустический спектр изменяется так, что сначала подчеркиваются одни обертоны, потом другие. У хороших певцов эта вибрация, обогащающая тембр (вibrato), мало сказывается на громкости, которая остается равномерной.

§ 72. Ультразвуки

Звуковые колебания и волны, характеризующиеся очень большими частотами (не воспринимаемые ухом) порядка нескольких десятков и сотен тысяч герц, вплоть до сотен миллионов герц, называют *ультразвуковыми*.

Ультразвуки относительно небольшой частоты можно получить с помощью *свистка Гальтона*, представляющего собой миниатюрную трубу, возбуждаемую продуванием воздушной струи. Уменьшая с помощью поршенька длину звучащего столба воздуха, можно добиться того, что звук свистка, постепенно повышаясь, наконец, перестанет быть слышен; излучаемая свистком волна переходит в область ультразвуковых частот. С помощью свистка Гальтона и других подобных ему устройств не удается, однако, получить сколь угодно интенсивных ультразвуков; помимо малой мощности таких излучателей, очень существенную роль играет здесь еще и то обстоятельство, что в воздухе колебания высокой частоты очень быстро затухают.