

Таким образом, наблюдатель будет воспринимать звук меньшей длины волны λ' . Соответствующая частота

$$\nu' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{\nu}{1 - \frac{v}{c}}. \quad (9)$$

Легко вывести аналогичным образом, что если источник звука удаляется со скоростью v , то воспринимаемая наблюдателем частота равна:

$$\nu' = \frac{\nu}{1 + \frac{v}{c}}. \quad (9')$$

Если рассматривать *движение наблюдателя* к источнику звука, то вследствие более частых «встреч» с гребнями волн частота воспринимаемых колебаний увеличивается.

Пусть наблюдатель движется к источнику звука со скоростью v м/сек. Тогда скорость звука относительно наблюдателя будет равна $c + v$ и мимо наблюдателя в единицу времени пройдет ν' волн, причем, как обычно,

$$\nu' = \frac{c + v}{\lambda};$$

с другой стороны,

$$\nu = \frac{c}{\lambda};$$

таким образом,

$$\nu' = \nu \left(1 + \frac{v}{c} \right). \quad (10)$$

При движении наблюдателя от источника получим соответственно:

$$\nu' = \nu \left(1 - \frac{v}{c} \right). \quad (10')$$

Все формулы, относящиеся к указанным случаям, при малых значениях скорости v делаются тождественными. Именно

$$\nu' = \nu \left(1 \pm \frac{v}{c} \right), \quad (11)$$

где знак минус соответствует удалению, а плюс — сближению наблюдателя и источника со скоростью v .

§ 70. Звук как психофизиологическое явление. Механизм звукового восприятия

Обратимся к субъективному восприятию звука. Здесь прежде всего необходимо отметить, что не каждый доходящий до уха колебательный процесс может вызвать ощущение звука: для этого необходимо, чтобы частота процесса и сила звука не выходили за

некоторые (правда, довольно широкие) пределы. Нижней границей частоты является частота около 20 колебаний в 1 сек. (20 *гц*), верхняя граница лежит между 16 000 и 20 000 *гц*. Положение этих границ не для всех людей одинаково и подвержено индивидуальным колебаниям, в отдельных случаях довольно значительным. Частоту, лежащую внутри указанных границ, принято называть *звуковой частотой*. Подобные же границы существуют и для силы воспринимаемых ухом звуков. Для того чтобы волна звуковой частоты создала ощущение звука, необходимо, чтобы сила звука превышала некоторую минимальную величину, называемую *порогом слышимости*. Звук, сила которого лежит ниже порога слышимости, ухом не воспринимается. Он слишком слаб для этого. С другой стороны, звуки очень большой силы (порядка сотен тысяч *эрг/см²сек*) также не воспринимаются как звук, вызывая лишь ощущение боли и давления в ухе. Максимальная величина силы звука, при превышении которой уже возникает боль, называется *порогом болевого ощущения*.

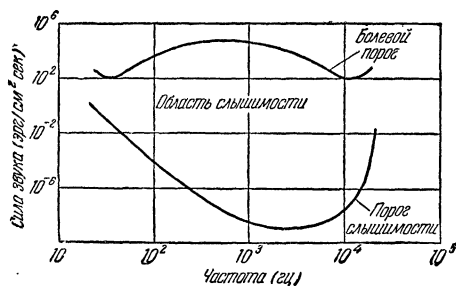


Рис. 171. Область слышимости.

Значения обоих порогов — слышимости и боли — различны в различных областях частот. Ухо наиболее чувствительно в области средних частот (1000—3000 *гц*): порог слышимости здесь 10^{-8} *эрг/см²сек*. При такой силе звука амплитуда колебаний частиц воздуха имеет порядок всего 10^{-10} *см*, т. е. в сотни раз меньше диаметра молекул. В области низких и высоких частот порог слышимости лежит гораздо выше, т. е. ухо гораздо менее чувствительно к низким и высоким звукам. Порог болевого ощущения лежит наиболее высоко в области средних частот, несколько понижаясь как в сторону более низких, так и в сторону более высоких частот.

На рис. 171 представлены кривые, показывающие зависимость обоих порогов от частоты. Верхняя кривая относится к болевому порогу, нижняя — к порогу слышимости. Очевидно, что область, лежащая между обеими кривыми, определяет диапазон частот и сил всех воспринимаемых ухом звуков, поэтому эту область называют *областью слышимости*.

Ухо представляет собой звукоприемный аппарат, работающий в чрезвычайно широком диапазоне частот и амплитуд. Большая широта области слышимости (не надо забывать, что на рис. 171 оси координат построены для экономии места в логарифмическом масштабе) связана с довольно сложным устройством слухового аппарата. Мы ограничимся здесь описанием весьма упрощенной схемы (рис. 172).

Звуковая волна, доходя до ушной раковины, попадает в наружный слуховой проход 1, в конце которого находится барабанная перепонка 8. Под действием периодически меняющегося давления в звуковой волне барабанная перепонка колеблется, совершая вынужденные колебания с частотой воспринимаемого звука. Колебания барабанной перепонки через посредство действующей как рычаг системы сочлененных косточек 2— молоточка, наковальни и стремечка — передаются так называемому овальному окну 3, закрывающему внутреннюю полость ушного лабиринта. Ушной лабиринт в той его части, где лежат чувствительные к механическому раздражению окончания слухового нерва, заполнен почти несжимаемой жидкостью — эндолимфой; эндолимфа передает колебания овального окна круглому окну 5, причем в своем движении она заставляет колебаться определенные части так называемой основной мембраны 6. Основная мембрана является главнейшей и наиболее интересной частью органа слуха; она представляет собой ряд волокон различной длины (общим числом несколько тысяч), настроенных

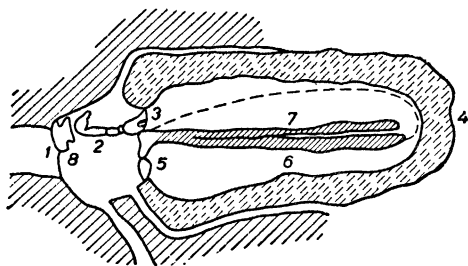


Рис. 172. Схема слухового аппарата.

каждое на некоторый определенный тон. Нечто похожее представляет собой система натянутых струн рояля: каждая струна имеет свою собственную частоту, и если в доходящей до струн звуковой волне содержатся колебания с этой именно частотой, то соответствующая струна начинает колебаться (явление резонанса). Точно так же и движения эндолимфы обуславливают колебания тех волокон основной мембраны, которые настроены на частоты, содержащиеся в воспринимаемой звуковой волне. При этом нервные окончания (так называемые волосатые клетки) прикасаются к параллельно идущей текториальной мембране 7, чем и вызывается специфическое нервное раздражение.

Изложенная здесь картина механизма слухового восприятия была разработана в прошлом столетии Гельмгольцем (резонансная теория слуха). Теория Гельмгольца встретила целый ряд возражений, для устранения которых неоднократно предлагались другие теории слуха. Однако, несмотря на некоторые немаловажные трудности, до последнего времени считали, что резонансная теория в ее современной форме лучше всех других согласуется с данными, добытыми анатомией и физиологией органа слуха.

В связи с описанным выше механизмом слухового восприятия становится понятным то обстоятельство, что ухо способно к различению отдельных компонентов сложного звука (например, аккорда). Орган зрения — глаз — при восприятии одновременных колебаний с различными частотами (например, сложного цвета) в противоположность уху не обладает свойствами спектрального аппарата; он не разлагает сложного колебания на простые составляющие. Напротив, орган слуха анализирует колебательный процесс, развертывая его в спектр простых гармонических колебаний; таким образом с физической точки зрения ухо является как бы набором резонаторов, обладающих ясно выраженным свойством избирательности.

Следует заметить, что относительно природы этих резонаторов могут быть высказаны предположения, глубоко отличающиеся от теории Гельмгольца. В 1948 г. Я. И. Френкелем была предложена новая, релаксационная, теория слуха. Френкель писал:

«Физикам уже давно известно, что наряду с явлением резонанса, обусловленного совпадением частоты возбуждающих колебаний («внешней силы») с частотой собственных (или свободных) колебаний воспринимающей их системы, существует до некоторой степени аналогичное явление в том случае, когда

соответствующая система вовсе не обладает упругостью, т. е. когда ее собственная частота колебаний равна нулю, но когда она испытывает при своем движении силу трения, прямо пропорциональную скорости. Эту силу трения можно характеризовать некоторым *временем релаксации* τ , т. е. временем, необходимым для возвращения системы в нормальное (неподвижное) состояние при устранении возмущающих внешних сил». Для подобных систем (не обладающих упругостью и характеризующихся трением, которое пропорционально скорости) поглощение энергии колебательного движения, подводимой извне, оказывается максимальным, когда угловая частота вынужденных колебаний совпадает с обратным значением времени релаксации ($\omega_{\text{вын}} = \frac{1}{\tau}$), что как бы соответствует явлению резонанса.

Я. И. Френкель считает, что «все биологические системы (в том числе различные ткани, в частности нервная и мышечная) принадлежат к категории таких, которые если и не вовсе лишены способности к свободным колебаниям упругого характера, то во всяком случае обладают ею в минимальной степени (соответствующей весьма малым значениям частоты собственных колебаний по сравнению с частотой колебаний внешних сил). Так, например, у обыкновенной резины при комнатных температурах время релаксации имеет порядок $\tau = 10^{-7}$ сек., тогда как период свободных колебаний небольшого куска резины не превышает 1/50 сек. Применяя этот принцип к слуховому аппарату человека и других высших животных, мы можем высказать гипотезу, что окончания слухового нерва, разветвляющиеся в улитке наподобие гребешка, характеризуются не различными значениями частоты собственных колебаний (все эти частоты можно в действительности считать равными нулю), а различными значениями времени релаксации. Различные значения, вероятно, находятся в простой связи с длиной нервных волоконцев а именно: чем длиннее волокно, тем больше время релаксации, характеризующее его поведение при погружении в вязкую жидкость, которой наполнено внутреннее ухо».

Интенсивности звука соответствует ощущение *громкости звука*. Понятно, что интенсивность звука и громкость являются понятиями неравнозначными. Интенсивность звука объективно характеризует физический процесс независимо от того, воспринимается ли он слушателем или нет; громкость же является чисто субъективным качеством; поэтому, строго говоря, количественный масштаб к ней неприложим. Однако, если мы расположим громкости одного и того же звука в виде ряда, возрастающего в том же направлении, что и сила звука, и будем руководствоваться воспринимаемыми ухом ступенями прироста громкости (при непрерывном увеличении силы звука), то найдем, что громкость возрастает значительно медленнее силы звука. Согласно известному психофизическому *закону Вебера — Фехнера* ухо, как и все органы чувств, оценивает интенсивность внешнего раздражения в логарифмическом масштабе: *прирост силы ощущения пропорционален логарифму отношения энергий двух сравниваемых раздражений*.

При выборе шкалы громкостей этот логарифмический закон должен быть принят во внимание. Условимся считать, что на пороге слышимости громкость равна нулю; согласно закону Вебера — Фехнера громкость некоторого звука будет пропорциональна логарифму отношения его силы I к силе того же самого звука на пороге слышимости I_0 :

$$L = k \log \frac{I}{I_0}. \quad (12)$$

В этом равенстве L выражает собой некоторую отвлеченную величину, характеризующую громкость звука, сила которого равна I ; k есть коэффициент пропорциональности. Величину L обычно называют *уровнем звука*.

Выбор коэффициента пропорциональности k , вообще говоря, совершенно произволен. Если положить его равным единице, то уровень звука выразится в единицах, получивших название *белов*:

$$L = \log \frac{I}{I_0} \text{ белов.}$$

Практически оказалось более удобным пользоваться единицами, в 10 раз меньшими; эти единицы получили название *децибелов*. Коэффициент k в формуле (12) при этом, очевидно, равняется 10:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ децибелов.} \quad (12')$$

Чтобы получить более конкретное представление о децибеле, следует заметить, что минимальный прирост громкости, воспринимаемый человеческим ухом, примерно равен 1 децибелу. Нижеприведенная табличка дает возможность ориентироваться в значениях уровня громкости различных звуков.

Уровни различных звуков

Звук	Уровень в децибелах	Сила звука ¹⁾ в эрг/см ² сек	Эффективное давление ¹⁾ в дин/см ²
Тиканье часов	20	$1 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$
Тихий разговор	40	$1 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-1}$
Речь средней громкости	60	1	6,4
Крик	80	$1 \cdot 10^2$	$6,4 \cdot 10$
Фортиссимо большого оркестра	100	$1 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^2$
Ощущение боли	120	$1 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^3$

¹⁾ Числа в графах «Сила звука» и «Давление» вычислены для звуков в средней области частот (около 1000 гц) и носят ориентировочный характер.

Исследования С. Н. Ржевкина и др. показали, что закон Вебера — Фехнера неудовлетворительно передает нарастание громкости в зависимости от интенсивности звука. Вблизи порога слышимости этот закон вообще теряет силу, поэтому уровень громкости очень слабых звуков не дает количественного представления об их субъективной громкости.

По неодинаковой громкости при восприятии звука (большой частоты) правым и левым ухом в слуховом центре мозга создается представление о направлении прихода звуковых волн (это — так называемый *бинауральный эффект*). В случае звуков низкой частоты

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.