

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современной акустике, наряду с традиционными областями — музыкальной и архитектурной акустикой, электроакустикой, гидроакустикой, быстро развиваются новые направления: учение о гиперзвуке, ультразвуковые технологии, методы расчета средств борьбы с шумом. После создания источников мощного ультразвука началось интенсивное изучение нелинейных эффектов при распространении волн. Возникла необходимость решения дифракционных задач для разработки оптимальных конструкций шумозащитных экранов, задач синтеза шумозащитных конструкций, обладающих заданными акустическими характеристиками, определения закономерностей распространения упругих волн в средах с флюктуирующими параметрами. Успешно развиваются технологии создания комфортных условий звуковосприятия речевых и музыкальных программ в помещениях.

Разнообразие физических явлений, с которыми приходится встречаться во всех этих областях исследований, очень велико. Несмотря на это в их основе лежат закономерности, общие для любых упругих волн. Поэтому возможен единый подход к изучению поведения волн, как бы ни различались исследуемые явления. Такого подхода требует не только развитие акустики как науки, но и педагогические цели.

В связи с этим в предлагаемом пособии сделана попытка осуществить подобный подход: наука о звуке трактуется как своеобразная механика упругих волн, в которой изучается поведение акустической волны как самостоятельного объекта, в отличие от обычной механики, занимающейся поведением материальных тел.

Автор стремился изложить общие закономерности поведения упругих волн в различных типичных ситуациях. Основное внимание при этом уделялось физическому толкованию изучаемых явлений при распространении упругих волн в области звуковых частот. Автор пытался использовать преимущества единого подхода для освещения возможно большого числа вопросов, в том числе таких, которые до сих пор разбирались только в специальной литературе.

Автор считает своим долгом выразить признательность тем ученым, работы которых использовались при написании этой книги. Особого упоминания заслуживают В. Анерт, Л. А. Борисов, Л. М. Бреховских, М. А. Исакович, Ф. П. Мехель, В. Райхардт, А. М. Тюрин.

Автор стремился обойтись без сколько-нибудь сложного математического аппарата, полагая, что это способствует созданию «акустической интуиции», необходимой для работников в области акустики. Однако восприятие материала книги требует математических знаний, получаемых студентами технических вузов.

Решение прикладных задач связано с подробным изучением специальной литературы, которую исследователь, используя современные средства информации, может определить в океане публикаций по любым вопросам. Автор будет вполне удовлетворен ситуацией, когда инженер, усвоив на основе материала

книги закономерности поведения звуковой волны, будет ориентирован в отыскании и использовании специальной литературы, экономя драгоценное время для творческой работы.

Ряд типичных акустических ситуаций рассмотрен детально, вплоть до получения окончательных формул. В Приложении иллюстрируется применение методов математической физики при решении некоторых вопросов распространения звуковых волн.

Глава 1

ЗВУКОВОСПРИЯТИЕ

1.1. Функционирование органов слуха

Звук является субъективным ощущением человека при воздействии колебаний воздуха в окружающей среде, передающихся барабанной перепонке слухового устройства. Вибрации последней усиливаются при помощи элементов изящно сконструированной природной конструкции слухового аппарата и возбуждают так называемые «волосковые» нервные клетки, расположенные в улитке внутреннего уха. Последние передают в мозг спектральную картину колебаний.

Функционально органы слуха состоят из звукопроводящего аппарата (наружное и среднее ухо), внутреннего уха и из звуковоспринимающих структур. Схематический разрез уха человека представлен на рисунке 1.1.

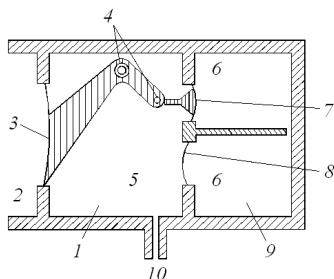


Рис. 1.1

Схема функционирования органов слуха:

1 — среднее ухо; 2 — наружный слуховой проход; 3 — барабанная перепонка; 4 — шарнир; 5 — воздух; 6 — жидкость; 7 — овальное окно; 8 — круглое окно; 9 — внутреннее ухо; 10 — слуховая труба.

Наружное ухо, имеющее форму рупора, выполняет роль принимающей антенны, эффективно концентрирующей звуковую энергию на высоких частотах. Трубка этого рупора имеет длину около 3 см и заканчивается с внутренней стороны барабанной перепонкой. Среднее ухо содержит три крошечные косточки, соединяющие барабанную перепонку с внутренним ухом: молоточек, наковальню и стремя. Основание стремени находится вблизи отверстия, называемого овальным окном. Полость среднего уха соединяется с носоглоткой с помощью евстахиевой трубы, благодаря чему барабанная перепонка не реагирует на медленное изменение атмосферного давления. Внутреннее ухо, заполненное лимфой — жидкостью, содержит базилярную мембрану, состоящую из нескольких тысяч поперечных волокон, уложенных в виде улитки. На базилярной мембране, вдоль всей ее длины расположены порядка 30 000 чувствительных клеток, к которым подходят окончания слухового нерва.

Работа слухового аппарата происходит следующим образом. При изменениях внешнего давления, происходящих со звуковой частотой, барабанная перепонка совершает колебательные движения, передающиеся через систему слуховых косточек (молоточек, наковальню) на основание стремечка, которое, подобно поршню, проталкивает жидкость, заставляя ее совершать движение вдоль преддверной и барабанной лестниц. Колебания жидкости вызывают колебательные движения продольной перегородки и, соответственно, базилярной мембраны. В процессе передачи колебаний от барабанной перепонки к овальному окну слуховые косточки выполняют роль трансформатора, согласующего сравнительно небольшое акустическое сопротивление воздушной среды с большим сопротивлением жидкости во внутреннем ухе. Происходит это частично из-за большой разницы в эффективных площадях барабанной перепонки и основания стремечка, частично вследствие рычажного действия молоточка и наковальни.

Собственная частота воздушного столба в наружном слуховом проходе 2–4 кГц, благодаря чему в этом диапазоне частот из-за резонанса усиливаются все звуковые колебания. В результате попадания звуковых волн на барабанную перепонку она колеблется как единая жесткая поверхность вокруг оси вращения, расположенной в районе ее верхней кромки. Движение барабанной перепонки передается сросшимся с ней молоточком через наковальню на стремя. Основание стремени, которое входит в овальное окно, колеблется вокруг оси вращения, расположенной у задней кромки овального окна. Соотношение площади барабанной перепонки (55 мм^2) и основания стремени ($3,5 \text{ мм}^2$), а также длинные рычажки слуховых косточек обуславливают 22-кратное усиление звукового давления.

Оптимальный коэффициент преобразования, с учетом собственной частоты среднего уха, отмечается на 1–2 кГц. Из-за движения основания стремени в жидкости вестибулярной полости образуются бегущие волны; при каждом движении основания внутрь благодаря несжимаемости жидкости мембрана в круглом окне барабанной полости прогибается в сторону среднего уха. Скорость волн зависит от эластичности базилярной мембраны, повышающейся от основания к вершине улитки. Соответственно скорости длина волн уменьшается к вершине. Затем при волнах определенной длины следует передача энергии колебаний на мембрану Рейснера и на базилярную мембрану. Чем ниже частота возбуждения и чем больше длина волны, тем на большем расстоянии от овального окна амплитуда колебаний будет максимальной.

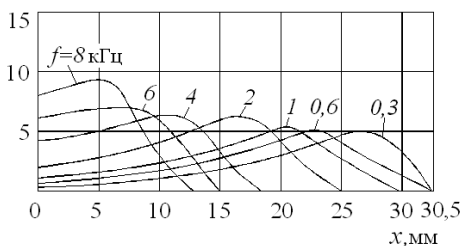


Рис. 1.2

Относительная деформация базилярной мембраны на различных частотах

При низкой звуковой частоте максимум прогиба базилярной мембраны находится ближе к вершине улитки, при высокой частоте — ближе к основанию (рис. 1.2). Поскольку максимальные перемещения базилярной мембраны характерны для ее периферии, а мембраны Рейснера — для ее центральной части, между кортиевым органом и покровной мембраной появляются касательные движения. В результате этих движений волосковые клетки изгибаются, а в них возникают так называемые токи раздражения (микрофонный потенциал), значения которых соответствуют прогибу базилярной мембраны. Микрофонный потенциал — изменение потенциала постоянного напряжения между эндолимфой и перилимфой, поддерживаемого перераспределением натрия и калия в обеих жидкостях. Обычно он составляет 80 мВ. Является ли микрофонный потенциал причиной электрических процессов в слуховом нерве, еще не выяснено. Дальше раздражение распространяется слуховым нервом. Восприятие громкости звука зависит от числа изменений потенциала в единицу времени и от количества возбужденных клеток, а восприятие частоты — от образования концентрацией возбуждения в определенных волокнах.

1.2. Восприятие высоты тона

Для понимания многих особенностей слухового восприятия важную роль играет субъективная высота тона. Она соответствует одинаковым расстояниям от овального окна вдоль базилярной мембраны. Высота тона определяется областью максимального возбуждения базилярной мембраны, размеры которой приблизительно пропорциональны числу расположенных в этой области волосковых клеток. Ее можно также характеризовать числом различаемых градаций высоты тона. Субъективное восприятие высоты тона измеряется в единицах «барк» или «мел» и тесно связано с критическими полосами слуха. Приблизительно считают, что 1 критическая полоса = 1 барк \approx 100 мел \approx 35 градаций высоты тона. Эти соотношения поясняются на рисунке 1.3.

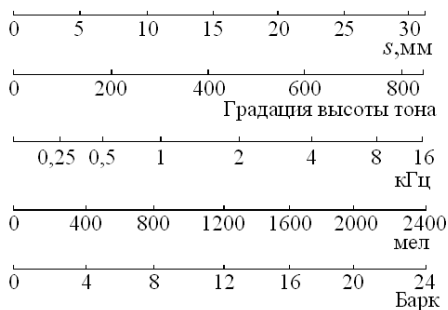


Рис. 1.3

Единицы высоты тона

Можно заметить, что на низких частотах (до 500 Гц) субъективная высота тона приблизительно пропорциональна частоте. На частотах выше 500 Гц для

оценки высоты тона вместо единиц «мел» можно пользоваться «центами». Но на низких частотах девиацию частоты, если хотят получить объективную меру, необходимо измерять в Гц. На рисунке 1.4 приведена зависимость высоты тона в мелах от частоты звукового сигнала в герцах.

Из рисунка 1.4 видно, что логарифмическая зависимость высоты тона от частоты наблюдается лишь на низких частотах. На частотах более 500 Гц математически точные интервалы не соответствуют натуральным отношениям высоты тонов, определяющим мелодичность звучания.

Точность слухового аппарата (чувствительность к изменению частоты) определяется отношением $\Delta f/f$, где Δf — минимальное заметное изменение частоты, f — частота тона. На рисунке 1.5 представлена кривая относительной зависимости чувствительности уха к изменению частоты.

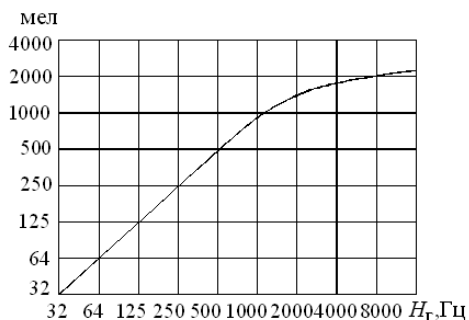


Рис. 1.4

*Зависимость высоты в мелах
от частоты звука в герцах*

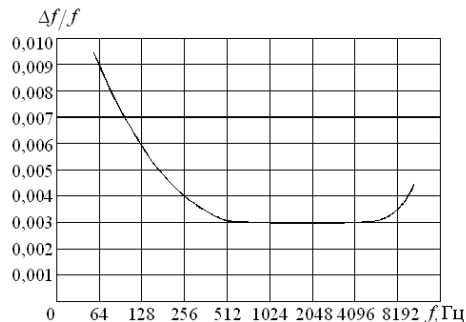


Рис. 1.5

*Зависимость чувствительности уха
от частоты*

Нетрудно видеть, что в диапазоне частот $512 < f < 4096$ Гц минимальное изменение частоты тона, которое нормальное ухо в состоянии обнаружить, равно 0,3%. На других частотах ухо становится менее чувствительным. Указанные проценты не могут быть вполне точными, так как в процессе их определения существенную роль играют субъективные ощущения органов чувств индивидуального человека, что уже не поддается строгой технической формулировке.

Вне указанного диапазона частот чувствительность слухового аппарата довольно редко ухудшается. Ухо не ощущает, не воспринимает колебания мембраны на частотах ниже 20 Гц и выше 18 000 Гц. Колебания источников звука на частотах ниже 20 Гц называют *инфразвуковыми*, на частотах выше 20 кГц — *ультразвуковыми*.

Звуковой диапазон частот определяет формирование речевой информации. Человек снабжен слуховым органом с чувствительностью, приспособленной наилучшим образом для слушания речи и музыки. Видимо, при эволюции человека речь и музыка развились позднее ощущения слуха. Речь и музыка приспособились к характеристикам чувствительности уха.

Способность уха различать небольшие изменения девиации частоты чрезвычайно важна для слушания речи и музыки.

При проектировании систем озвучения субъективное восприятие высоты тона является основой для оценки эффектов звучания, которые могут быть обусловлены смещением частот в электроакустическом канале звукоусиления. Для достижения эффективности подавления паразитной обратной связи используется частотная модуляция $f_{\text{мод}} = 4$ Гц. На низких частотах приходится увеличивать девиацию частоты, т. е. выбирать частоту модуляции более высокой.

1.3. Музыкальные интервалы

Музыкальная интуиция человека не сделала ошибки, когда человек, еще не зная логарифмов и не имея частотно-измерительной аппаратуры, начал петь и сочинять музыкальные мелодии, основой которых явились достаточно точные и арифметически простые соотношения используемых музыкальных тонов, соответствующих, как впоследствии выяснилось, логарифмическому ряду. Следует добавить, что древние греки и римляне вводили музыкальные термины «квинта» и «кварта» не вслепую: они изучали связь между изменениями тонов и длиной звучащих струн. Октава (изменение частоты звуковых колебаний вдвое) производила на слух впечатление как-то повторяющейся предыдущей ступени музыкальной гаммы; октава и явилась, таким образом, «основанием музыкальных логарифмов». Наименование «октава» происходит от латинского слова «восьмой»; октава является восьмой ступенью диатонической гаммы, т. е. тоном, одинаковым по названию с первой ступенью (тоникой). В пределах октавы, т. е. между первой и восьмой ступенями, заключается 7 интервалов основных музыкальных тонов или 12 интервалов, включая и полутона.

В конце XVII в. Веркмейстер уже с достаточной сознательностью ввел геометрическую прогрессию в музыку, разделив октаву на 12 равномерных интервалов, удовлетворяющих геометрической прогрессии со знаменателем $\sqrt[12]{2}$. В этом случае все полутона гаммы будут определяться частотами, логарифмы которых будут привязаны к двенадцатиричной системе исчисления. В настоящее время такое деление музыкальной октавы является основным для так называемой «европейской» музыки и международных инструментов. Существуют проекты деления октавы не на 12, а на 24 и даже 48 интервалов (до четвертей и восьмых долей тона). В некоторых восточных странах существуют и до сих пор деления октавы на иное (не 12) число интервалов.

В настоящее время наиболее распространенной (европейской) является именно хроматическая гамма, содержащая в октаве 12 равномерно распределенных интервалов полутонов (темперированная гамма). Эта равномерность интервалов выполнена, конечно, с некоторым ущербом для восприятия естественных гармонических сочетаний тонов, определяемых простейшими кратными соотношениями, однако это явилось неизбежным, ибо создавать большое количество интервалов в октаве или делать интервалы разными нецелесообразно, а даже простейшие соотношения тонов, например $\frac{5}{4}$; $\frac{4}{3}$; $\frac{3}{2}$; $\frac{5}{3}$; $\frac{5}{8}$ и т. д., не совмещаются со значениями отдельных членов геометрической прогрессии.

Равномерное распределение октавы на 12 интервалов требует, чтобы соотношение между двумя соседними интервалами составляло $\sqrt[12]{2} \approx 1,059463...$ Точность соблюдения этих соотношений определяется по мере необходимости техническими требованиями. В настоящее время для практических музыкальных и измерительных целей применяются две счетные системы:

а) система счета в миллиоктавах, т. е. в интервалах, соответствующих в логарифмическом масштабе тысячным долям логарифма 2 (октавы); иными словами, одна миллиоктава соответствует такому отношению тонов, логарифм которого при основании 2 равен 0,001; десятичный логарифм этого отношения равен 0,00030103..., а само отношение равно 1,0006933..., т. е. в несколько раз меньше того изменения тона, которое может быть отмечено человеческим ухом;

б) система счета в логарифмических интервальных сотках; в этом случае логарифм октавы делится на $12 \cdot 100 = 1200$ равномерных делений; эта система счета даст опорные деления несколько точнее, чем миллиоктавные деления, и удобнее тем, что на каждый отдельный интервал темперированной гаммы будет приходиться ровно по 100 соток.

Очевидно, что в случае необходимости, как, например, при точных эталонно-лабораторных измерениях, эти опорные деления могут быть подразделены в общем порядке на десятые, сотые, тысячные доли. Таким образом, 1 миллиоктава соответствует отношению частот, равному $\sqrt[1000]{2} \approx 1,0006933...$, а 1 сотка — отношению частот $\sqrt[1200]{2} \approx 1,0005777...$

Интервалы музыкальной гаммы определяются частотными соотношениями, указанными в таблице 1.1; в более развернутом виде эти же данные указаны в таблице 1.2, где приведены значения интервалов октав и частотные соотношения для темперированной и натуральной гамм.

Таблица 1.1

Частотные соотношения для темперированной музыкальной гаммы

№ п/п	Интервал	Соотношение частот	Сотки	Миллиоктавы
0	Унисон	1:1	0	0
1	Полутон (малая секунда)	1,059463:1	100	83,33
2	Целый тон (большая секунда)	1,122462:1	200	166,67
3	Малая терция	1,189207:1	300	250,00
4	Большая терция	1,259921:1	400	333,33
5	Кварта (чистая и увеличенная)	1,334840:1	500	416,67
6	Уменьшенная квинта	1,414214:1	600	500,00
7	Чистая квинта	1,498307:1	700	583,33
8	Малая секста	1,587401:1	800	666,67
9	Большая секста	1,681793:1	900	750,00
10	Малая септима	1,781797:1	1000	833,33
11	Большая септима	1,887749:1	1100	916,67
12	Октава	2:1	1200	1000,0

Таблица 1.2

Частотные соотношения для темперированной музыкальной гаммы

№ п/п	Название интервалов	Отношение частот				Миллиоктавы		Сотки	
		Натуральная гамма		Темпериро- ванная гамма		Нату- ральная гамма	Темпери- рованная гамма	Нату- ральная гамма	Темпе- рирован- ная гамма
		точ- ное	деся- тичное	точ- ное	деся- тичное				
1	Унисон	1:1	1,000	1	1,000	0	0	0	0
2	Диадониче- ский полутон	16:25	1,0667	$2^{1/12}$	1,059	93,11	83,33	111,73	100
3	Целый тон	9:8	1,125	$2^{2/12}$	1,122	169,92	166,67	203,91	200
4	Малая терция	6:5	1,200	$2^{3/12}$	1,189	263,03	250,00	315,64	300
5	Большая тер- ция	5:4	1,250	$2^{4/12}$	1,260	321,93	333,33	386,31	400
6	Чистая кварта	4:3	1,333	$2^{5/12}$	1,335	415,04	416,67	498,05	500
7	Уменьшенная квинта	64:45	1,422	$2^{6/12}$	1,414	508,15	500,00	609,78	600
8	Чистая квинта	3:2	1,500	$2^{7/12}$	1,498	584,96	583,33	701,96	700
9	Малая секста	8:5	1,600	$2^{8/12}$	1,587	678,07	666,67	813,69	800
10	Большая сек- ста	5:3	1,667	$2^{9/12}$	1,682	736,97	750,00	884,36	900
11	Малая сеп- тима	9:5	1,800	$2^{10/12}$	1,792	848,00	833,33	1017,60	1000
12	Большая сеп- тима	15:8	1,875	$2^{11/12}$	1,888	906,90	916,67	1088,27	1100
13	Октава	2:1	2,000	2	2,000	1000,00	1000,00	1200,00	1200

Темперированная гамма представляет строгую логарифмическую шкалу, в которой логарифм октавы (логарифм 2) делится на 12 одинаковых частей — интервалов, соответствующих полутонам современной клавиатуры рояля.

Из таблицы 1.2 можно выяснить, сколько существенным отклонениям пришлось подвергнуть естественные частотные соотношения промежуточных тонов натуральной гаммы. Например, первый полутон, считая от начального (унисон), составляющий 100 соток, является компромиссным между хроматическим полутонном натуральной гаммы в 70,67 соток и диатоническим полутонном той же гаммы в 111,73 соток. Одиннадцатый полутон темперированной гаммы в 1100 соток (малая септима) объединяет в тоне одной частоты как гармоническую малую септиму с натуральным соотношением 7:4 (968,83 соток), так и тяжелую малую септиму с натуральным соотношением 9:5 (1017,60 соток).

На эти жертвы музыкально-эстетического характера пришлось пойти из-за нужд и целесообразности стандартизации (нельзя же изготавливать инструменты с неопределенно большим количеством клавиш и ладов). Следует отметить, что главнейшие соотношения тонов, например 3:2 (чистая квинта) или 4:3 (чистая кварта), пострадали едва заметно. Как можно установить по данным таблицы 1.2, для чистой квинты (седьмой полутон гаммы — нормализованные 700 соток) требуется настройка на соотношение частот 1,498 вместо 1,500, а для чистой кварты (пятый полутон гаммы) — настройка на соотношение частот 1,335 вместо 1,339...

Можно считать, что расхождения такой величины среднее человеческое ухо не обнаружит.

Однако, если числовое частотное соотношение между тонами и полутонами в музыке было установлено еще в конце XVII в., то «нулевой уровень» частоты музыкального тона не мог быть выбран устойчивым, так как техника тех лет не была в состоянии разработать частото-измерительные приборы необходимой точности. Инструменты в разных странах настраивались по-разному, расхождения по частоте для какого-либо опорного тона превышали 10%. В самом деле, удержать на слух основной тон гаммы было невозможно даже для музыкально одаренных исполнителей. Появление камертона позволило дирижеру легко «задавать тон» хору или оркестру, способствовало долговременной стабильности частот и обеспечило «перевозку частоты» для сравнения тона «ля» или «до» разных местностей. Однако разноголосица между отдельными музыкантами, городами и тем более разными странами существовала очень долго, вплоть до конца первой половины XX столетия. Лишь в последнее время был введен и принят во многих странах международный стандарт: основной тон «ля» (тон А) 440 Гц. Введение такого стандарта позволяет теперь организовать международный ансамбль без подстройки инструментов, вывезенных из разных городов или стран. Теперь певцы, «недоотягивающие» до какого-то тона, уже не имеют формального права жаловаться, что аккомпанирующий инструмент «настроен слишком высоко».

Дадим определение типов гамм, встречающихся в литературе.

Натуральная гамма — музыкальная гамма, в которой интервалы тонов могут быть выражены отношениями небольших чисел.

Равномерно темперированная гамма — музыкальная гамма, в которой интервалы тонов сделаны равными.

Хроматическая гамма — музыкальная гамма, содержащая двенадцать интервалов на октаву и полученная из диатонической гаммы дополнительным сообщением пяти полутонов, расположенных так, чтобы сообщить результирующей гамме приблизительно равные интервалы.

При проектировании систем озвучения субъективное восприятие тона служит оценкой дефектов звучания, которые могут быть обусловлены смещением частот в электроакустическом канале звукоусиления. Транспонирование спектра происходит лишь в системах, где смещение по частоте вводится для подавления паразитной акустической обратной связи. Обычно применяется постоянное смещение на 5 Гц, но нередко вводится и частотная модуляция с частотой 4 Гц и девиацией частоты ± 4 Гц. В обоих случаях изменяются частотные интервалы, что воспринимается слушателями как искажения звучания.

Колебания частоты звучания возникают непосредственно при игре на музыкальных инструментах. Ни один музыкант, и тем более вокалист, не могут «держат» ноту с высокой точностью. Изменение высоты тона с частотой 440 Гц, по которому настраиваются инструменты, на 4 Гц означает расстройку на 16 центов, т. е. меньше чем $1/6$ полутона. Такое колебание частоты представляет собой типичное явление в музыке. Колебания высоты тона обусловлены не только при вибрато, но и самим процессом извлечения звука, будь то смычковый, ударный, духовой или

щипковый инструмент. Например, в первые две секунды после нажатия на клавиши фортепиано ноты до мажор пятой октавы наблюдаются колебания основной частоты на 45 Гц (183 цента).

Однако такого же порядка или еще меньшие колебания частоты, вносимые техническими средствами, представляют практический интерес. Как раз по этим колебаниям различают музыкальные инструменты, и ими же определяется художественная выразительность исполнения.

1.4. Восприятие громкости

Естествоиспытатели всего мира обратили внимание, прежде всего, на исследование явлений, связанных с интонацией звуков: введено понятие высоких и низких тонов, определена связь высоты тона с длиной струны, сформированы условия соизвучности тонов и т. д. Громкость для ранних исследователей считалась мерой энергии, силы звуковой волны, которая не требует столь тщательного анализа.

С развитием техники аппаратных измерений, разработкой методов озвучивания помещений и аппаратуры управления качеством звука, созданием методов маскировки и направленной локализации звука исследование физических процессов, связанных с восприятием громкости, приобрело первостепенное значение.

Громкостью называется субъективное ощущение, позволяющее слуховой системе дифференцировать звуки по шкалам от тихих до громких звуков. У музыкантов для оценки громкости звучания существует специальная шкала, в соответствии с которой предусмотрены градации звука. Понятие «громкость» звука впервые ввел Г. Флетчер. Согласно его гипотезе воспринимаемая громкость пропорциональна числу нервных импульсов, поступающих в слуховой центр от базилярной мембраны.

Далее не будем подробно рассматривать особенности физиологических ощущений, вызываемых звуковой волной. Отметим только, что, во-первых, измерение слуховых ощущений громкости звука не поддается простому объективному измерению электронным прибором, а во-вторых, биологические особенности органов слуха приводят к дополнительному усложнению логарифмической зависимости ощущения изменения громкости звука, частоты колебаний, даже формы уха и расположения головы и пр.

Необходимость создания акустического поля с заданными параметрами качества воспринимаемой информации требует разработки методов расчета, основанных на исследованиях взаимосвязи объективных и субъективных параметров звукового поля. Необходимо исследовать корреляционную связь между громкостью и звуковым давлением. Эта же задача стоит при анализе влияния звукового поля на организм человека.

Основными объективными параметрами звукового поля является звуковое давление p и интенсивность I звуковой волны.

Звуковое давление определяет отношение силы к единице площади, на которую воздействует первая. Интенсивность определяет энергию звуковой волны,

проходящей сквозь площадь поверхности, величиной 1 см^2 (1 м^2) в одну секунду. Для плоской звуковой волны указанные параметры связаны отношением

$$I = p^2/w_0, \quad (1.1)$$

где w_0 — волновое сопротивление воздушной среды. Для нормальных атмосферных условий $w_0 = 410 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$.

Минимальное звуковое давление, которое способно еще воспринимать человеческое ухо при отсутствии мешающих шумов, определяет порог слышимости. Величина порога слышимости $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ($2 \cdot 10^{-4} \text{ бар}$), установленная на частоте 1000 Гц звуковой волны, зависит от длительности звукового воздействия. Для точной оценки порога слышимости необходим временной интервал около 200 мс .

Порог слышимости для интенсивности равен: $I_0 = 10^{-14} \text{ Вт/м}^2$, что соответствует звуковому давлению $p_0 = 0,0002 \text{ бар}$.

В таблице 1.3 приведены размерности и соотношения физических параметров, необходимых для выполнения расчетов.

Таблица 1.3

Размерности и соотношения физических параметров

№ п/п	Величины	Размерность		Соотношения
		CGS	СИ	
1	Сила, F	дина $[F] = \frac{\text{г} \cdot \text{см}}{\text{с}^2}$	ньютон $[F] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}$	1 дина = 10^{-5} ньютон
2	Работа, A	эрг $[A] = \text{дин} \cdot \text{см}$	джоуль $[A] = \text{Н} \cdot \text{м}$	1 эрг = $10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м}$
3	Давление, p	бар $[p] = \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$	паскаль $[p] = \frac{\text{ньют}}{\text{м}^2}$	1 бар = 0,1 Па
4	Интенсивность, I	$\frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$1 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2} = 10^{-11} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
5	Мощность, N	$\frac{\text{эрг}}{\text{с}}$	Вт	$1 \frac{\text{эрг}}{\text{с}} = 10^{-7} \text{ Вт}$

При повышении звукового давления до 10 Па возникают неприятные ощущения в слуховом аппарате. При давлении 200 Па появляются болевые ощущения. Указанное давление определяет так называемый «болевой порог». Таким образом, динамический диапазон слухового восприятия составляет 10^7 .

В инженерно-технической деятельности вычислительные работы становятся наиболее производительными при использовании вместо ряда громоздких величин натуральных чисел логарифмических систем счисления, позволяющих наиболее целесообразно использовать двух-, трехзначные числа нашей десятичной системы счисления.

Применение децибельной системы количественной оценки акустических параметров звукового поля выгодна по следующим причинам:

- интенсивность и звуковое давление при практическом использовании меняются в 10 миллионов раз, и без логарифмической системы в расчетах поля обойтись трудно;

- реакция человеческого уха и оценка интенсивностей звука в децибельной (логарифмической) системе находятся в полном соответствии;
- достаточно близкое совпадение с биофизиологической единицей раздражения (ухо ощущает изменение энергии звука при изменении интенсивности воздействия примерно на 1 дБ);
- полная увязка с десятичной системой счисления;
- логарифмический характер единицы, позволяющий пользоваться операцией сложения вместо умножения.

В технике звукоусиления первостепенный интерес представляет задача увеличения громкости, звукового давления. При этом речь идет не об абсолютных значениях, а лишь о том, насколько изменяется первоначальный звук, т. е. необходимо использовать относительные величины. Для этого введены параметры: уровень звукового давления L_p и уровень интенсивности L_i , показывающие в децибелах разницу между двумя уровнями. Нижний уровень определяется величинами p_0 и I_0 , значения которых приведены выше. Верхний уровень определяется величиной исследуемого давления либо интенсивностью I . Бел впервые ввел в технику измерений величину децибел для определения уровня интенсивности, количественно выражающуюся десятичным логарифмом от отношения I/I_0 , таким образом:

$$L_i = 10 \lg(I/I_0). \quad (1.2)$$

Как будет показано ниже, для плоской звуковой волны интенсивность пропорциональна квадрату звукового давления. Уровень звукового давления запишется в следующем виде:

$$L_p = 20 \lg(p/p_0). \quad (1.3)$$

Нетрудно показать, что уровень интенсивности равен уровню звукового давления следующим образом:

$$L_i = 10 \lg(I/I_0) = 10 \lg(p/p_0)^2 = 20 \lg(p/p_0) = L_p. \quad (1.4)$$

Поэтому в технике акустических измерений используется общее обозначение уровней — L , без указания нижних индексов.

Неточные, приблизительные субъективные оценки громкости вызвали необходимость найти объективно измеряемый физический параметр. Известным компромиссом явилось введение параметра, называемого уровнем громкости L_G . Он измеряется в фонах и определяется выражением

$$L_G = 20 \lg(p_N/p_0), \quad (1.5)$$

где p_N — эффективное значение звукового давления тонального сигнала частотой 1000 Гц. При этом под уровнем громкости L_G понимают уровень тона частотой 1000 Гц, имеющего равную с данным звуком при их попеременном сравнении громкость. Число фонов совпадает с числом децибелов уровня тона частотой 1000 Гц, имеющего равную громкость с оцениваемым звуком p_N .

Субъективная оценка, очевидно, не исключается, но тем не менее значение L_G можно найти, так как для чистых тонов известны значения $p_N(f)$, а следовательно, и L_N .

На рисунке 1.6 приведены изофоны (кривые равного уровня громкости в фонах), вошедшие в национальные стандарты почти всех стран, и приведен на двойной логарифмической сетке типовой график кривых равной громкости в зависимости от рассматриваемых интенсивностей и частот акустических колебаний. График снят экспериментально телефонной лабораторией. За нулевой уровень принят международный стандарт интенсивности предела слышимости звуковых колебаний $1 \cdot 10^{-16}$ Вт/см² (соответствует звуковому давлению 0,000203 бар). При таком нулевом уровне все слышимые звуки будут определяться только положительными значениями децибел, т. е. будут учитываться только интенсивности, превышающие предел слышимости человеческого уха. Для привязки к шкале громкостей введена уравнивательная шкала громкостей — «фонов», совпадающая с децибельной шкалой интенсивностей только в диапазоне частот около 1000 Гц. Как видно из кривых рисунка 1.6, весь диапазон слышимых средних человеческим ухом звуков укладывается в динамический диапазон 120 дБ (для частоты 1000 Гц; для весьма низких частот 25–50 Гц динамический диапазон интенсивностей сужается примерно вдвое). На графике указаны граничные звуковые пределы для человеческого уха — предел слышимости (0 дБ по шкале громкостей) и болевой предел (120 дБ при 1000 Гц или 120 фонов по шкале громкостей; в некоторых книгах по акустике болевой предел определен в 130 дБ или фонов). Следует добавить, что на рисунке 1.6 можно отметить некоторый минимум кривых громкости при частотах порядка 3000–4000 Гц. Этот минимум для линии предела слышимости (0 фонов) опускается даже ниже нулевого уровня интенсивности $1 \cdot 10^{-16}$ Вт/см². Дополнительная логарифмическая шкала графика указывает соответствующие звуковые давления. Масштаб этой шкалы вдвое шире, чем для интенсивности, ибо интенсивность звука (как это будет показано в следующей главе) пропорциональна квадрату звукового давления.

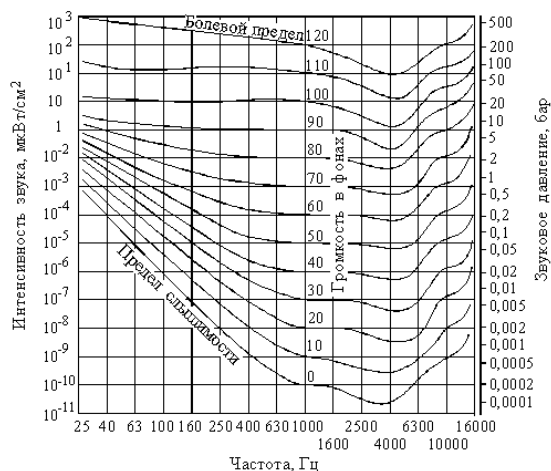


Рис. 1.6

*Кривые равной громкости и их связь с интенсивностью и частотой колебаний.
Нулевой уровень интенсивности $1 \cdot 10^{-16}$ Вт/см² (0,0002 бар)*

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru