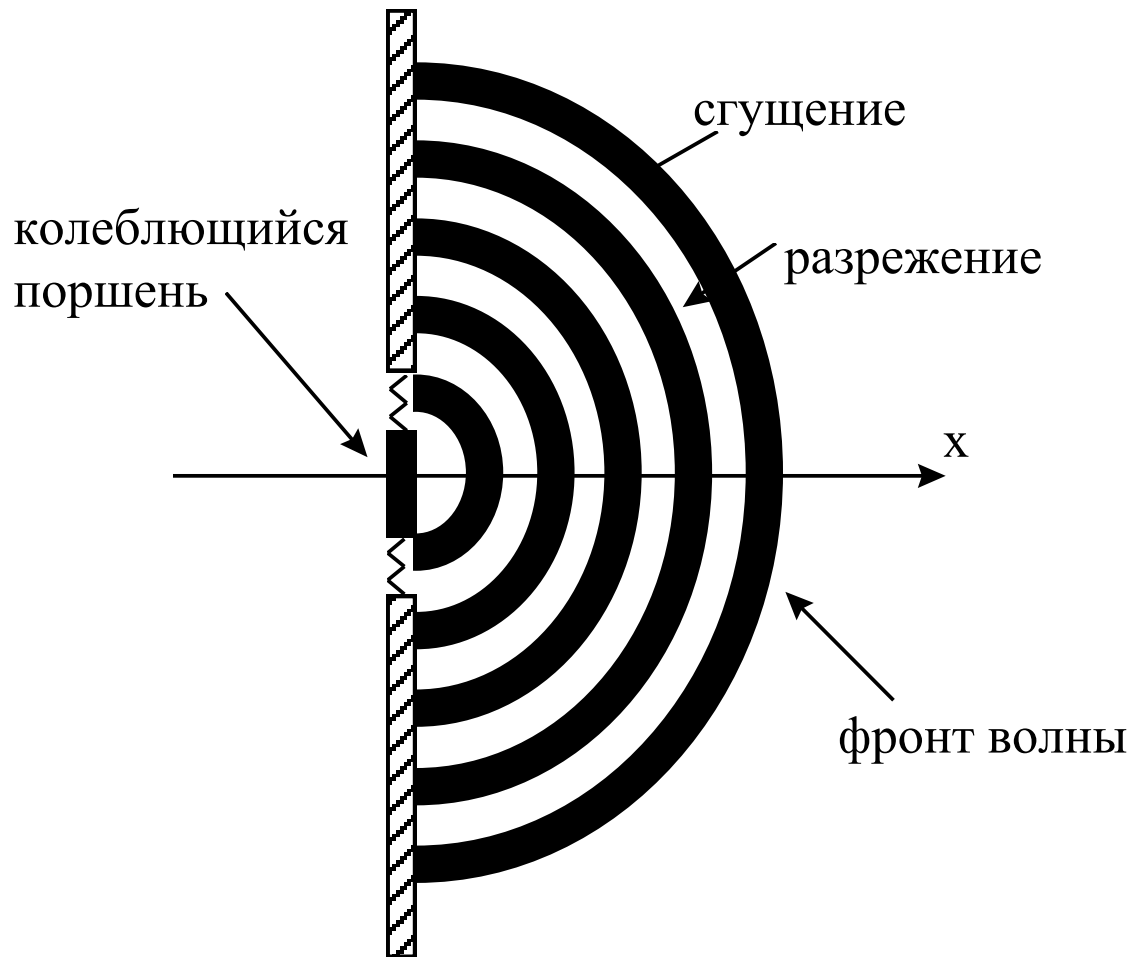


Звуковые поля и волны

Звуковое поле

Звуковым полем называется пространство, в котором происходит распространение звуковых колебаний.



При возбуждении звуковых колебаний в газообразной среде (а именно в ней мы находимся) образуются чередующиеся слои сжатия и разрежения, распространяющиеся от источника звука в виде продольных звуковых волн.

Это означает, что колебательное перемещение частиц среды происходит в направлении распространения звуковой волны.

Направление распространения звуковой волны называют *звуковым лучом*, а поверхность, соединяющую все смежные точки поля с одинаковой фазой колебания частиц среды, — *фронтом волны*. Фронт волны перпендикулярен звуковому лучу.

Поскольку частицы совершают колебания вдоль направления распространения волны, то такие колебания называют *продольными*. Эти колебания распространяются от одних частиц воздуха к другим с определенной скоростью, называемой *скоростью звука*.

Линейные характеристики звукового поля

Скорость распространения звуковой волны в воздухе (*скорость звука*) $c_{зв}$ в основном зависит от параметров среды и температуры. С точностью, достаточной для технических расчетов, можно считать, что $c_{зв} = 331\sqrt{T/273}$, где T — абсолютная температура воздуха, К. При нормальном атмосферном давлении $p_{АТМ} = 101325$ Па (760 мм. рт. ст.) и температуре $T = 290$ К (17 °С) скорость звука $c_{зв} = 340$ м/с. Это значение используется в технических расчетах

Расстояние между соседними фронтами, находящимися в одинаковой фазе, называется *длиной волны*. Если период колебаний T , скорость звука $c_{зв}$ и частота F , то длина волны

$$\lambda = c_{зв} T = \frac{c_{зв}}{F}$$

Длину звуковой волны можно определить как расстояние между двумя соседними областями максимального сгущения и разрежения частиц среды в пространстве.

Частоты звуковых колебаний, при которых человек получает слуховое восприятие, лежат в полосе частот от 16 до 20000 Гц. Соответственно длины звуковых волн имеют величины от 21 м (при 16 Гц) до 1,7 см (при 20 кГц). Частоты ниже 16 Гц называют *инфразвуковыми*, а выше 20 кГц — *ультразвуковыми*. Инфразвуковые и ультразвуковые колебания органом слуха не воспринимаются.

Колебательная скорость – это мгновенное значение скорости колебательного движения частиц среды при распространении в ней звуковой волны. Нельзя путать эту величину со скоростью звука. Скорость звука – это величина, с которой возбуждение передается от ближних к источнику частиц среды к все более и более удаленным. Здесь же речь идет о скорости колебаний частиц относительно своей точки покоя. Даже для очень громких звуков $v < 10$ м/с.

При синусоидальных перемещениях частицы

$$x = a_{\max} \cdot \sin \omega t$$

скорость колебаний определяется выражением

$$V = dx/dt = a_{\max} \omega \cdot \cos \omega t = V_{\max} \cos \omega t ,$$

где V - мгновенное значение скорости частицы, м/с,

ω - угловая частота, $\omega = 2 \pi f$, рад/с,

f - частота колебаний частицы, Гц,

a_{\max} – амплитуда смещения частицы, м,

$V_{\max} = \omega \cdot a_{\max} = 2\pi f \cdot a_{\max}$ - амплитуда скорости частицы, м/с.

Чем громче и выше тон, тем больше скорость колебаний.

Звуковым давлением называется разность между суммарным мгновенным значением давления в некоторой точке поля и атмосферным давлением.

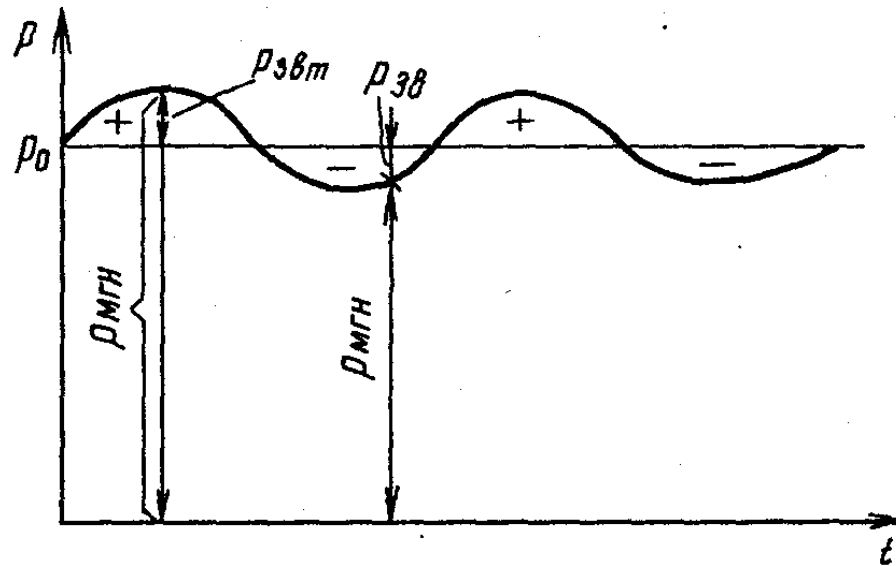


Рис. 2.1. Изменение звукового давления в точке звукового поля при излучении синусоидальной волны

$$p_{зв}(t) = p_{мгн}(t) - p_{атм}$$

Здесь $p_{зв}(t)$ – величина звукового давления;

$p_{мгн}(t)$ – суммарное мгновенное значение давления в некоторой точке звукового поля;

$p_{АТМ}$ – атмосферное давление.

Напомним, что в физике давлением называется сила, приходящаяся на единицу поверхности тела. Она измеряется в H/m^2 . Обозначим эту величину p , тогда

$$p = \frac{F}{S} \quad \left[\frac{\text{н}}{\text{м}^2} \right],$$

где F – сила, действующая на поверхность S ;

S – площадь поверхности, на которую действует сила.

Единица равная 1 Н/м^2 названа Паскалем, [Па]. В области сжатия (сгущения) частиц среды больше атмосферного и звуковое давление положительно. В области разрежения отрицательно, то есть звуковое давление величина знакопеременная. В акустике приходится иметь дело с величинами звукового давления, не превышающими по амплитуде $10 \dots 200 \text{ Па}$. Если учесть, что нормальное ат-

атмосферное давление составляет $1,01 \cdot 10^5$ Па, то становится очевидным, что значения звукового давления составляют лишь незначительную долю атмосферного.

Средние значения звукового давления для различных звуков:

порог слышимости при частоте $F = 1000$ Гц

$$p_{\text{зв пс}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па};$$

порог болевого ощущения при частоте $F = 1000$ Гц

$$p_{\text{зв бол ош}} = 200 \text{ Па}.$$

Значения звукового давления зависят от расстояния до источника звука. Звуковое давление убывает вместе с ростом расстояния до источника звука.

Среда, в которой распространяется звук, оказывает колеблющейся поверхности некоторое сопротивление, называемое *акустическим сопротивлением*.

Противодействие среды, приходящееся на единицу (м^2) колеблющейся поверхности, перпендикулярной к направлению распространения звуковой волны, называется *удельным акустическим сопротивлением*.

Модуль этой величины: $|Z|_a = p_{зв}/V$ ($\text{Па}\cdot\text{с}/\text{м}$)

В общем случае акустическое сопротивление величина комплексная: $Z_a = W + jq$.

Наличие реактивной составляющей свидетельствует о сдвиге фаз между звуковым давлением и скоростью колебаний: $\text{tg}\varphi = q/W$.

Энергетические характеристики звукового поля

Звуковая мощность—это энергия, переносимая звуковой волной в единицу времени в направлении распространения звуковых волн через всю площадь фронта волны.

Мощность есть работа, произведенная за единицу времени. В электроакустике имеется в виду работа, которую совершает излучатель против силы, действующей на него со стороны среды.

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{Fdx}{dt} = Fv = p_{36} Sv \quad (\text{Вт})$$

где P —звуковая мощность;

A — работа;

F —сила, действующая на излучатель со стороны среды;

x —смещение излучателя;

$p_{зв}$ —звуковое давление.

Интенсивность или сила звука— это поток звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу поверхности фронта волны.

$$I = \frac{P}{S} = \frac{p_{зв} S v}{S} = p_{зв} v = \frac{p_{зв}^2}{Z_a} = v^2 Z_a \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$$

Для сферической волны при мощности P_a источника звуковой энергии, находящегося в центре

$$I = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{4\pi r^2},$$

где r — радиус шара.

Интенсивность (или сила) звука, соответствующая порогу слышимости на частоте $F = 1000$ Гц:

$$I_{\text{пор сл}} = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

Плотность звуковой энергии – это среднее количество звуковой энергии, приходящееся на единицу объема. Обычно она обозначается буквой ε , ее размерность [Дж/м³].

Если звуковая энергия в единице объема звукового поля в среднем равна ε , а скорость распространения звуковой энергии (скорость звука) $c_{\text{зв}}$, то в течение одной секунды через единицу площади, перпендикулярной звуковому лучу, пройдет энергия, численно равная $\varepsilon c_{\text{зв}}$. Но с другой стороны звуковая энергия, проходящая через единицу площади фронта в единицу времени, есть интенсивность звука I , т. е. $I = \varepsilon c_{\text{зв}}$ или $\varepsilon = \frac{I}{c_{\text{зв}}}$.

Далее только для групп специальности
«Аудиовизуальная техника»

Восприятие по амплитуде

Если силу звука увеличивать в десять раз, то каждому десятикратному возрастанию интенсивности будет соответствовать субъективно ощущаемое увеличение громкости на одну ступень. Принимая за исходное значение силу звука I_0 получим приблизительно равные ступени изменения громкости при каждом последующем увеличении силы звука в десять раз: $I_0; I_1=10I_0; I_2=10I_1=10^2I_0; I_3=10I_2=10^3I_0; \dots; I_M=10^M I_0$.

Общее число ступеней, на которое изменится громкость при увеличении силы звука от I_0 до I_M равно

$$M = \lg \frac{I_M}{I_0} .$$

Соответствующая десятикратному изменению силы

звуча логарифмическая единица (ступень изменения громкости) получила название “Бел” (Б). Бел является крупной ступенью изменения громкости. По данным субъективно-статистических экспертиз ступень изменения громкости в 1 Б воспринимается на слух как увеличение громкости вдвое. В пределах такой большой ступени (Б) человек различает еще приблизительно десять градаций изменения громкости. Иначе говоря, общее число ступеней, соответствующих минимально заметному изменению громкости сигнала, будет:

$$N=10M, \text{ то есть } N=10 \lg \frac{I_M}{I_0},$$

Логарифмическая единица, соответствующая ступени в десять раз меньшей Бела, естественно, была названа “деци-бел” (дБ). Если $N=1$, то $I_M/I_0 = 1,26$, т. е. 1 дБ соответству-

ет изменению силы звука на 26%, что оценивается на слух как едва заметное изменение громкости.

Текст....(ступ. рег. громк.; шкалы изм. ур.)

В децибелах (дБ) оценивают относительный уровень изменения сил звуков, звуковых давлений, колебательных скоростей и т. д. Для одной и той же точки звукового поля при нормальных атмосферных условиях $N_I = N_p = N_v = N_\varepsilon$

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \lg \frac{p}{p_0} = 20 \lg \frac{v}{v_0} = 10 \lg \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \text{ дБ.}$$

Если в качестве исходных величин I_0 , p_0 , v_0 , ε_0 приняты значения, соответствующие абсолютному порогу слышимости (смотри таблицу ниже), то полученное число дБ определяет **абсолютный уровень сигнала**.

Если уровень сигнала в дБ оценен по отношению к любой другой величине, то такой уровень сигнала будет на-

ЗЫВАТЬСЯ **относительным уровнем сигнала.**

Порог чувствительности уха	p_0	I_0	V_0	ϵ_0
	Па	Вт/м ²	м/с	Дж/м ³
Абсолютный порог слышимости	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-12}	$5 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-15}$
Болевой порог	200	10^2	0,5	0,3

Восприятие по частоте

Гармонические колебания воспринимаются на слух как «чистые» или «простые» тоны, лишенные всякой музыкальной особенности. Постепенное увеличение частоты от 16 до 20000 Гц вызывает восприятие постепенно изменяющегося тона от самого низкого (басового) до наиболее высокого.

За объективную единицу (ступень) изменения высоты тона, приближенно отражающей субъективное восприятие, принята октава, соответствующая изменению частоты в два раза.

Если исходная частота равна F_0 , то каждой октаве соответствуют частоты: $F_1 = 2F_0$; $F_2 = 2F_1 = 2^2F_0$; $F_3 = 2F_2 = 2^3F_0$; ...; $F_n = 2^nF_0$.

Следовательно, число октав n , на которое повысился тон, будет

$$n = \log_2 \frac{F_n}{F_0} = 3,34 \lg \frac{F_n}{F_0}$$

Принимая $F_0 = 20$ Гц и $F_n = 20000$ Гц, найдем слышимое человеком число октав:

$$3,34 \lg \frac{20000}{20} = 3,34 \cdot 3 = 10$$

Текст

Полутон соответствует изменению частоты в $\sqrt[12]{2} \approx 1,054$ раза, т.е. он равен 1/12 октавы.

Деление октавы на части

Текст

Дифференциальный порог слышимости по частоте

См. выше