Глава 19
Упругие волны

§ 153. Волновые процессы. Продольные и поперечные волны

Колебания, возбужденные в какой-либо точке среды (твердой, жидкой или газообразной), распространяются в ней с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, передаваясь от одной точки среды к другой. Чем дальше расположена частица среды от источника колебаний, тем позднее она начнет колебаться. Иначе говоря, фазы колебаний частиц среды и источника тем больше отличаются друг от друга, чем больше это расстояние. При изучении распространения колебаний не учитывается дискретное (молекулярное) строение среды и среда рассматривается как **сплошная,** т. е. непрерывно распределенная в пространстве и обладающая упругими свойствами.

Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется **волновым процессом** (или **волной).** При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передаются лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому *основным свойством всех волн,* независимо от их природы, является *перенос энергии без переноса вещества.*

Среди разнообразных волн, встречающихся в природе и технике, выделяются следующие их типы: **волны на поверхности жидкости, упругие и электромагнитные волны. Упругими** (или **механическими)** волнами называются механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Упругие волны бывают продольные и поперечные. В **продольных волнах** частицы среды колеблются в направлении распространения волны, в **поперечных** — в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы *при деформации сжатия и растяжения,* т. е. твердых, жидких и газообразных телах. Поперечные волны могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы *при деформации сдвига,* т. е. фактически только в твердых телах; в жидкостях и газах возникают только продольные волны, а в твердых телах — как продольные, так и поперечные.

Упругая волна называется **гармонической,** если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими. На рис. 220 представлена гармоническая поперечная волна, распространяющаяся со скоростью v вдоль оси x, т. е. приведена зависимость между смещением ζ частиц среды, участвующих в волновом процессе, и расстоянием x этих частиц (например, частицы *B)* от источника колебаний *O* для какого-то фиксированного момента времени *t.* Хотя приведенный график функции I *(x, t)* похож на график гармонического колебания, но они *различны по существу.*

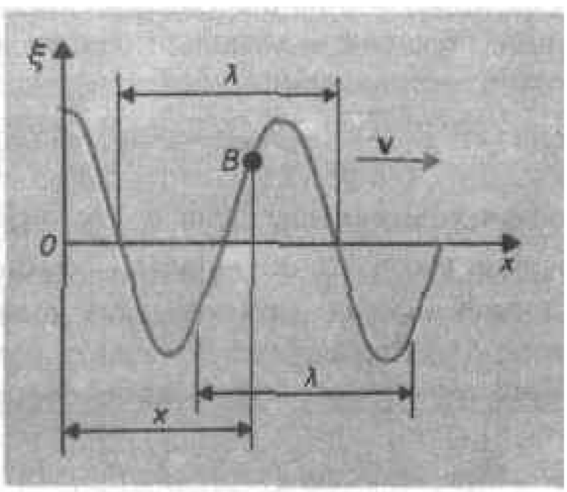

Рис. 220

всех частиц среды от расстояния до источника колебаний в данный момент времени, а график колебаний — зависимость смещения *данной частицы от времени.*
Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется **длиной волны** λ, (рис.220). Длина волны равна тому расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период, т. е.
$\lambda = vT,$
или, учитывая, что $T=1/\nu$, где ν — частота колебаний,
$v=\lambda\nu$.
Если рассмотреть волновой процесс подробнее, то ясно, что колеблются не только частицы, расположенные вдоль оси *x,* а колеблется совокупность частиц, расположенных в некотором объеме, т. е. волна, распространяясь от источника колебаний, охватывает все новые и новые области пространства. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени *t,* называется **волновым фронтом.** Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется **волновой поверхностью.** Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени — один. Волновой фронт также является волновой поверхностью. В принципе волновые поверхности могут быть любой формы, а в простейшем случае они представляют собой совокупность плоскостей, параллельных друг другу, или совокупность концентрических сфер. Соответственно **волна** называется **плоской** или **сферической.**

§ 154. Уравнение бегущей волны. Фазовая скорость. Волновое уравнение

Бегущими волнами называются волны, которые переносят в пространстве энергию. Перенос энергии в волнах количественно характеризуется **вектором плотности потока энергии.** Этот вектор для упругих волн называется **вектором Умова** (по имени русского ученого Н. А. Умова (1846—1915), решившего задачу о движении энергии в среде). Направление вектора Умова совпадает с направлением переноса энергии, а его модуль равен энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.
Для вывода уравнения бегущей волны — зависимости смещения колеблющейся частицы от координат и времени — рассмотрим *плоскую волну,* предполагая, что колебания носят гармонический характер, а ось *x* совпадает с направлением распространения волны (рис. 220). В данном случае волновые поверхности перпендикулярны оси *x,* а так как все точки волновой поверхности колеблются одинаково, то смещение ξ будет зависеть только от *x* и *t,* т. е. $\xi=\xi(x, t)$.
На рис. 220 рассмотрим некоторую частицу среды *B,* находящуюся от источника колебаний *O* на расстоянии *x.* Если колебания точек, лежащих в плоскости $x=0$, описываются функцией $\xi(0, t)=A\cos\omega t$, то частица среды *B* колеблется по тому же закону, но ее колебания будут отставать по времени от колебаний источника на т, так как для прохождения волной расстояния *x* требуется время $\tau=x/v$, где *v* — скорость распространения волны. Тогда уравнение колебаний частиц, лежащих в плоскости *x,* имеет вид
$\xi(x,t)=A\cos\omega(t-x/v),$ (154.1)
откуда следует, что $\xi(x, t)$ является не только периодической функцией времени, но и периодической функцией координаты *x.* Уравнение (154.1) есть **уравнение бегущей волны.** Если плоская волна распространяется в противоположном направлении, то
$$\xi(x, t)=A\cos\omega(t+x/v).$$
В общем случае **уравнение плоской волны,** распространяющейся вдоль положительного направления оси *x* в среде, *не поглощающей* энергию, имеет вид
$\xi(x,t)=A\cos[\omega(t-x/v)+\varphi_0]$, (154.2)
где A=const — **амплитуда волны,** ω — **циклическая частота волны,** φ_0 — **начальная фаза колебаний,** определяемая в общем случае выбором начал отсчета x и *t,* $[\omega(t-x/v)+\varphi_0]$—**фаза плоской волны.**
Для характеристики волн используется **волновое число**

$k=2\pi/\lambda=2\pi/vT=\omega/v$. (154.3) Учитывая (154.3), уравнению (154.2) можно придать вид
$\xi(x,t)=A\cos(\omega t-kx+\varphi_0)$. (154.4)
Уравнение волны, распространяющейся вдоль отрицательного направления оси x, отличается от (154.4) только знаком члена *kx.*
Основываясь на формуле Эйлера (140.7), уравнение плоской волны можно записать в виде
$\xi(x,t)=Ae^{i(\omega t-kx+\varphi 0)}$,
где физический смысл имеет лишь действительная часть (см. § 140).
Предположим, что при волновом процессе фаза постоянна, т. е.
$\omega(t-x/v)+\varphi_0=\text{const}$. (154.5) Продифференцировав выражение (154.5) и сократив на ω, получим
$dt-(1/v)dx=0$, откуда
$dx/dt=v$. (154.6)
Следовательно, скорость *v* распространения волны в уравнении (154.6) есть не что иное, как *скорость перемещения фазы волны,* и ее называют **фазовой скоростью.**
Повторяя ход рассуждений для плоской волны, можно доказать, что **уравнение сферической волны** — волны, волновые поверхности которой имеют вид концентрических сфер, записывается как
$\xi(r,t)=A_0/r\cos(\omega t-kr+\varphi_0)$, (154.7)
где *r* — расстояние от центра волны до рассматриваемой точки среды. В случае сферической волны даже в среде, *не поглощающей* энергию, амплитуда колебаний не остается постоянной, а убывает с расстоянием по закону *1/r.* Уравнение (154.7) справедливо лишь для *r,* значительно превышающих размеры источника (тогда источник колебаний можно считать *точечным).*
Из выражения (154.3) вытекает, что фазовая скорость
$v=\omega/k$. (154.8)
Если фазовая скорость волн в среде зависит от их частоты, то это явление называют **дисперсией волн,** а среда, в которой наблюдается дисперсия волн, называется **диспергирующей средой.**
Распространение волн в *однородной изотропной* среде в общем случае описывается **волновым**

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\xi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\xi}{\partial z^2}=\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2},$$

или

$$\Delta\xi=\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}, \qquad (154.9)$$

где *v* — фазовая скорость, $\Delta=\partial^2/\partial x^2+\partial^2/\partial y^2+\partial^2/\partial z^2$ — **оператор Лапласа.** Решением уравнения (154.9) является уравнение любой волны. Соответствующей подстановкой можно убедиться, что уравнению (154.9) удовлетворяют, в частности, плоская волна (см. (154.2)) и сферическая волна (см. (154.7)). Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси *x,* волновое уравнение

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}=\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}. \qquad (154.10)$$

§ 155. Принцип суперпозиции. Групповая скорость

Если среда, в которой распространяется одновременно несколько волн, *линейна,* т. е. ее свойства не изменяются под действием возмущений, создаваемых волной, то к ним применим **принцип суперпозиции (наложения) волн:** при распространении в линейной среде нескольких волн каждая из них распространяется так, как будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частицы среды в любой момент времени равно геометрической сумме смещений, которые получают частицы, участвуя в каждом из слагающих волновых процессов.

Исходя из принципа суперпозиции и разложения Фурье (см. (144.5)) любая волна может быть представлена в виде суммы гармонических волн, т. е. в виде волнового пакета, или группы волн. **Волновым пакетом** называется суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, занимающая в каждый момент времени ограниченную область пространства.

«Сконструируем» простейший волновой пакет из двух распространяющихся вдоль положительного направления оси x гармонических волн с одинаковыми амплитудами, близкими частотами и волно-

$$\xi = A_0 \cos(\omega t - kx) + $$
$$+ A_0 \cos[(\omega + d\omega)t - (k + dk)x] = $$
$$= 2A_0 \cos\left(\frac{t\,d\omega - x\,dk}{2}\right)\cos(\omega t - kx).$$

Эта волна отличается от гармонической тем, что ее амплитуда

$$A = \left|2A_0 \cos\left(\frac{t\,d\omega - x\,dk}{2}\right)\right|$$

есть медленно изменяющаяся функция координаты x и времени t.

За скорость распространения этой негармонической волны (волнового пакета) принимают скорость перемещения максимума амплитуды волны, рассматривая

тем самым максимум в качестве центра волнового пакета. При условии, что $t d\omega - x dk = \text{const}$, получим

$dx/dt = d\omega/dk = u$. (155.1)

Скорость u есть **групповая скорость.** Ее можно определить как скорость движения группы волн, образующих в каждый момент времени локализованный в пространстве волновой пакет. Хотя выражение (155.1) получено для волнового пакета из двух составляющих, можно доказать, что оно справедливо в самом общем случае. Рассмотрим связь между групповой

$u = d\omega/dk$ (см. (155.1)) и фазовой $u = \omega/k$

(см. (154.8)) скоростями. Учитывая, что $\lambda = 2\pi/k$ (см. (154.3)), получим

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(vk)}{dk} = v + k\frac{dv}{dk} = $$
$$= v + k\left(\frac{dv}{d\lambda}\frac{d\lambda}{dk}\right) = v + k\left(-\frac{\lambda}{k}\right)\frac{dv}{d\lambda},$$

или

$$u = v - \lambda\frac{dv}{d\lambda}. \qquad (155.2)$$

Из формулы (155.2) вытекает, что u может быть как меньше, так и больше v в зависимости от знака $dv/d\lambda$. В недиспергирующей среде $dv/d\lambda = 0$ и групповая скорость совпадает с фазовой.

Понятие групповой скорости очень важно, так как именно она фигурирует при измерении дальности в радиолокации, в системах управления космическими объектами и т. д. В теории относительности доказывается, что *групповая скорость u≤c,* в то время как *для фазовой скорости ограничений не существует.*

§ 156. Интерференция волн

Согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов связывают с понятием **когерентности. Волны** называются

247

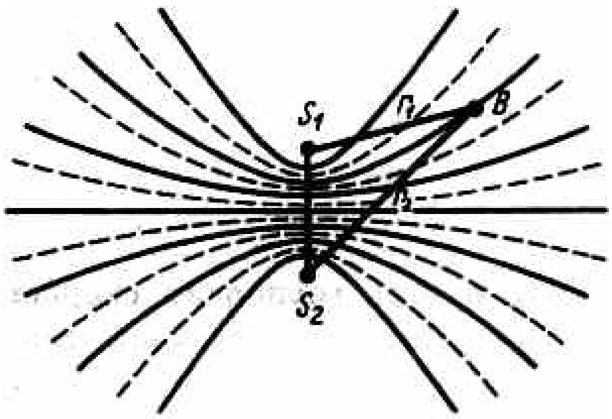

Рис. 221

когерентными, если разность их фаз остается постоянной во времени. Очевидно, что когерентными могут быть лишь волны, имеющие одинаковую частоту. При наложении в пространстве двух (или нескольких) когерентных волн в разных его точках получается усиление или ослабление результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами этих волн. Это явление называется **интерференцией волн.**

Рассмотрим наложение двух когерентных сферических волн, возбуждаемых точечными источниками S_1 и S_2 (рис.221), колеблющимися с одинаковыми амплитудой *AO* и частотой со и постоянной разно-

$$\xi_1=\frac{A_0}{r_1}\cos(\omega t-kr_1+\varphi_1),$$

$$\xi_2=\frac{A_0}{r_2}\cos(\omega t-kr_2+\varphi_2),$$

где r_1 и r_2 — расстояния от источников волн до рассматриваемой точки *B, k* — волновое число, (φ_1 и φ_2 — начальные фазы обеих накладывающихся сферических волн. Амплитуда результирующей

$$A^2=A_0^2\left\{\frac{1}{r_1^2}+\frac{1}{r_2^2}+\right.$$

$$\left.+\frac{2}{r_1r_2}\cos\left[k(r_1-r_2)-(\varphi_1-\varphi_2)\right]\right\}.$$

Так как для когерентных источников разность начальных фаз $(\varphi_1-\varphi_2)$=const, то результат наложения двух волн в различных точках зависит от величины $\Delta=r_1-r_2$, называемой **разностью хода волн.**

В точках, где

$k(r_1-r_2)-(\varphi_1-\varphi_2)=\pm 2m\pi$

(m=0, 1,2,...), (156.1)

наблюдается **интерференционный максимум:** амплитуда результирующего колебания $A=A_0/r_1+A_0/r_2$. В точках, где

$k(r_1-r_2)-(\varphi_1-\varphi_2)=\pm(2m+1)\pi$

(m=0, 1,2,...), (156.2)

наблюдается **интерференционный минимум:** амплитуда результирующего колебания $A=A_0/r_1—A_0/r_2\,|$ (m=0, 1, 2, ...,) называется соответственно **порядком интерференционного максимума** или **минимума.**

Условия (156.1) и (156.2) сводятся к тому, что

$r_1-r_2=\text{const}$. (156.3)

Выражение (156.3) представляет собой уравнение гиперболы с фокусами в точках S_1 и S_2. Следовательно, геометрическое место точек, в которых наблюдается усиление или ослабление результирующего колебания, представляет собой семейство гипербол (рис.221), отвечающих условию $\varphi_1-\varphi_2=0$. Между двумя интерференционными максимумами (на рис. 221 сплошные линии) находятся интерференционные минимумы (на рис. 221 штриховые линии).

§ 157. Стоячие волны

Особым случаем интерференции являются **стоячие волны** — это волны, образующиеся при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами. Для вывода уравнения стоячей волны предположим, что две плоские волны распространяются навстречу друг другу вдоль оси *x* в среде без затухания, причем обе волны характеризуются одинаковыми амплитудами и частотами. Кроме того, начало координат выберем в точке, в которой обе волны имеют одинаковую фазу, а отсчет времени начнем с момента, когда фазы обеих волн равны нулю. Тогда со-

ответственно уравнения волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси *x,* и

$$\begin{cases} \xi_1 = A\cos(\omega t - kx), \\ \xi_2 = A\cos(\omega t + kx). \end{cases} \qquad (157.1)$$

Сложив эти уравнения и учитывая, что $k=2\pi/\lambda$ (см. (154.3)), получим уравнение **стоячей волны:**

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A\cos kx \cos \omega t =$$

$$= 2A\cos(2\pi x/\lambda)\cos\omega t. \qquad (157.2)$$

Из уравнения стоячей волны (157.2) вытекает, что в каждой точке этой волны происходят колебания той же частоты ω с амплитудой $A_{ст}=|2A\cos(2\pi x/\lambda)|$, зависящей от координаты *x* рассматриваемой точки.

В точках среды, где

$2\pi x/\lambda=\pm m\pi$ (m=0, 1, 2, ...), (157.3)

амплитуда колебаний достигает максимального значения, равного 2 A. В точках среды, где

$2\pi x/\lambda=\pm(m+1/2)\pi$ (m=0,1,2,...),

(157.4)

амплитуда колебаний обращается в нуль. Точки, в которых амплитуда колебаний максимальна ($A_{ст}=2A$), называются **пучностями стоячей волны,** а точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю ($A_{ст}=0$), называются **узлами стоячей волны.** Точки среды, находящиеся в узлах, колебаний не совершают.

Из выражений (157.3) и (157.4) получим соответственно *координаты пучностей и узлов:*

$x_0=\pm m\lambda/2$ (m=0, 1,2, ...), (157.5)
$x_{узл}=\pm(m+1/2)\lambda/2$ (m=0, 1, 2, ...).
(157.6)
Из формул (157.5) и (157.6) следует, что расстояния между двумя соседними пучностями и двумя соседними узлами одинаковы и равны $\lambda/2$. Расстояние между соседними пучностью и узлом стоячей волны равно $\lambda/4$.
В отличие от бегущей волны, все точки которой совершают колебания с *одинаковой амплитудой,* но с *запаздыванием по фазе* (в уравнении (157.1) бегущей волны фаза колебаний зависит от координаты x рассматриваемой точки), все точки стоячей волны между двумя узлами колеблются с *разными амплитудами,* но с *одинаковыми фазами* (в уравнении (157.2) стоячей волны аргумент косинуса не зависит от x). При переходе через узел множитель $2A\cos(2\pi x/\lambda)$ меняет свой знак, поэтому фаза колебаний по разные стороны от узла отличается на π, т. е. точки, лежащие по разные стороны от узла, колеблются в противофазе.
Образование стоячих волн наблюдают при интерференции бегущей и отраженной волн. Например, если конец веревки закрепить неподвижно, то отраженная в месте закрепления веревки волна будет интерферировать с бегущей волной и образует стоячую волну. На границе, где происходит отражение волны, в данном случае получается узел. Будет ли на границе отражения узел или пучность, зависит от соотношения плотностей сред. Если среда, от которой происходит отражение, менее плотная, то в месте отражения получается пучность (рис. 222, а), если более плотная — узел (рис. 222, б). Образование узла связано *с* тем, что волна, отражаясь от более плотной среды, меняет фазу на противоположную и у границы происходит сложение колебаний противоположных направлений, в результате чего получается узел. Если же волна отражается от менее плотной среды, то изменения фазы не происходит и у границы колебания складываются с одинаковыми фазами — получается пучность.
Если рассматривать бегущую волну, то в направлении ее распространения переносится энергия колебательного движения. В случае же стоячей волны *переноса энергии нет,* так как падающая и отраженная волны одинаковой амплитуды несут одинаковую энергию в противоположных направлениях. „Поэтому полная энергия результирующей стоячей волны, заклю-

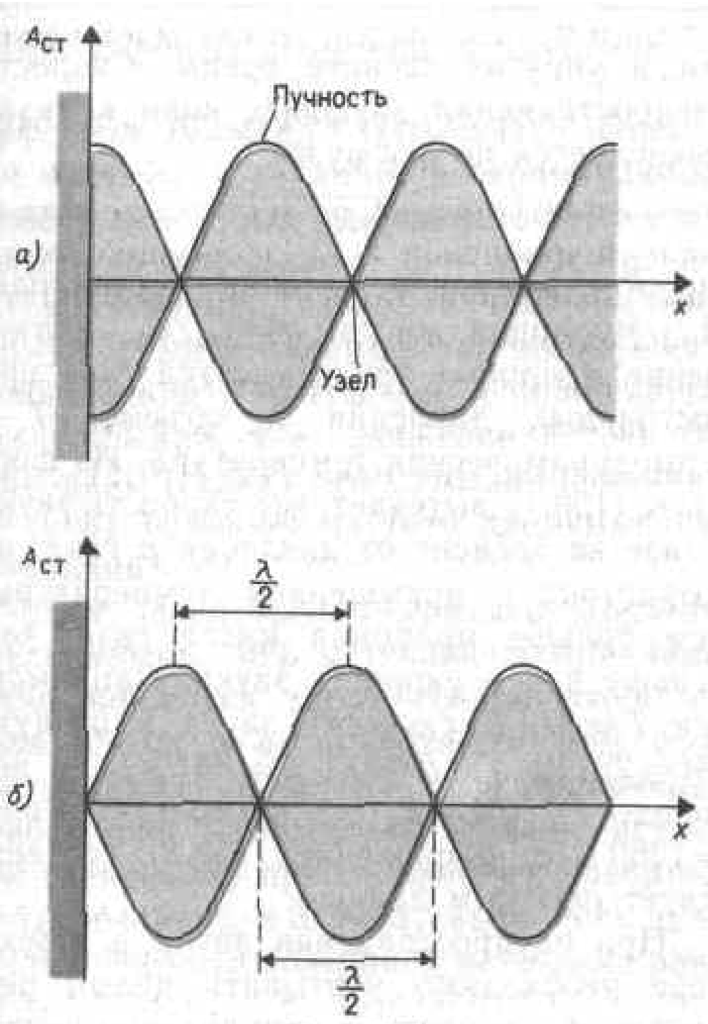

Рис. 222

ченной между узловыми точками, остается постоянной. Лишь в пределах расстояний, равных половине длины волны, происходят взаимные превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно.

§ 158. Характеристика звуковых волн

Звуковыми (или **акустическими**) **волнами**

называются распространяющиеся в среде упругие волны, обладающие частотами в пределах 16—20000Гц. Волны указанных частот, воздействуя на слуховой аппарат человека, вызывают ощущение звука. Волны с $v< 16$ Гц **(инфразвуковые) и** $v> >20$ кГц **(ультразвуковые)** органами слуха человека не воспринимаются.

Звуковые волны в газах и жидкостях могут быть только продольными, так как эти среды обладают упругостью лишь по отношению к деформациям сжатия (растяжения). В твердых телах звуковые волны могут быть как продольными, так и поперечными, так как твердые тела обладают упругостью по отношению к деформациям сжатия (растяжения) и сдвига.

Интенсивностью звука (или **силой звука)** называется величина, определяемая

средней по времени энергией, переносимой звуковой волной в единицу времени сквозь единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны:

$I=W/(St)$.

Единица интенсивности звука в СИ — **ватт на метр в квадрате** (Вт/м^2).

Чувствительность человеческого уха различна для разных частот. Для того чтобы вызвать звуковое ощущение, волна должна обладать некоторой минимальной интенсивностью, но если эта интенсивность превышает определенный предел, то звук не слышен и вызывает только болевое ощущение.

Таким образом, для каждой частоты колебаний существует наименьшая **(порог слышимости)** и наибольшая **(порог болевого ощущения)** интенсивность звука, которая способна вызвать звуковое восприятие. На рис. 223 представлена зависимость порогов слышимости и болевого ощущения от частоты звука. Область, расположенная между этими двумя кривыми, является **областью слышимости.**

Если интенсивность звука является величиной, объективно характеризующей волновой процесс, то субъективной характеристикой звука, связанной с его интенсивностью, является **громкость звука,** зависящая от частоты. По физиологическому закону Вебера — Фехнера, с ростом интенсивности звука громкость возрастает по логарифмическому закону. На этом основании вводят объективную оценку громкости звука по измеренному значению его интенсивности:

$L=\lg(I/I_0)$,

где I_0 — интенсивность звука на пороге слышимости, принимаемая для всех зву-

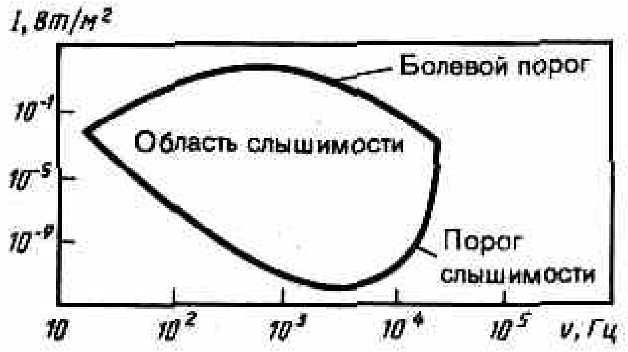

Рис. 223

ков равной 10^{-12} Вт/м^2. Величина L называется **уровнем интенсивности звука** и выражается в **белах** (в честь изобретателя телефона Белла). Обычно пользуются единицами, в 10 раз меньшими,— **децибелами** (дБ).

Физиологической характеристикой звука является **уровень громкости,** который выражается в **фонах** (фон). Громкость для звука в 1000 Гц (частота стандартного чистого тона) равна 1 фон, если его уровень интенсивности равен 1 дБ. Например, шум в вагоне метро при большой скорости соответствует ≈90 фон, а шепот на расстоянии 1 м— ≈20 фон.

Реальный звук является наложением гармонических колебаний с большим набором частот, т. е. звук обладает **акустическим спектром,** который может быть **сплошным** (в некотором интервале присутствуют колебания всех частот) и **линейчатым** (присутствуют отделенные друг от друга определенные частоты).

Звуковое ощущение характеризуется помимо громкости еще высотой и тембром. **Высота звука** — качество звука, определяемое человеком субъективно на слух и зависящее от частоты звука. С ростом частоты высота звука увеличивается, т. е. звук становится «выше». Характер акустического спектра и распределения энергии между определенными частотами определяет своеобразие звукового ощущения, называемое **тембром звука.** Так, различные певцы, берущие одну и ту же ноту, имеют различный акустический спектр, т. е. они имеют различный тембр.

Источником звука может быть всякое тело, колеблющееся в упругой среде со звуковой частотой (например, в струнных инструментах источником звука является струна, соединенная с корпусом инструмента).

Совершая колебания, тело вызывает колебания прилегающих к нему частиц среды с такой же частотой. Состояние колебательного движения последовательно передается к все более удаленным от тела частицам среды, т. е. в среде распространяется волна с частотой колебаний, равной частоте ее источника, и с определенной скоростью, зависящей от плотности и упругих свойств среды. Скорость распространения звуковых волн в газах вычисляется по формуле

$v=\sqrt{(\gamma RT/M)}$, (158.1)

где R — молярная газовая постоянная, M — молярная масса, $\gamma = C_p/C_v$ — отношение молярных теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме, T — термодинамическая температура. Из формулы (158.1) вытекает, что скорость звука в газе не зависит от давления *р газа,* но возрастает с повышением температуры. Чем больше молярная масса газа, тем меньше в нем скорость звука. Например, при Т=273 К скорость звука в воздухе ($M=29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) v=331 м/с, в водороде ($M=2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) v=1260 м/с. Выражение (158.1) соответствует опытным данным.

При распространении звука в атмосфере необходимо учитывать целый ряд факторов: скорость и направление ветра, влажность воздуха, молекулярную структуру газовой среды, явление преломления и отражения звука на границе двух сред. Кроме того, любая реальная среда обладает вязкостью, поэтому наблюдается затухание звука, т. е. уменьшение его амплитуды и, следовательно, интенсивности звуковой волны по мере ее распространения. Затухание звука обусловлено в значительной мере его поглощением в среде, связанным с необратимым переходом звуковой энергии в другие формы энергии (в основном в тепловую).

Для акустики помещений большое значение имеет **реверберация звука** — процесс постепенного затухания звука в закрытых помещениях после выключения его источника. Если помещения пустые, то происходит медленное затухание звука и создается «гулкость» помещения. Если звуки затухают быстро (при применении звукопоглощающих материалов), то они воспринимаются приглушенными.

Время реверберации — это время, в течение которого интенсивность звука в помещении ослабляется в миллион раз, а его уровень— на 60 дБ. Помещение обладает хорошей акустикой, если время реверберации составляет 0,5—1,5с.

§ 159. Эффект Доплера в акустике

Эффектом **Доплера** называется изменение частоты колебаний, воспринимаемой приемником, при движении источника этих колебаний и приемника друг относительно друга. Например, из опыта известно, что тон гудка поезда повышается по мере его приближения к платформе и понижается при удалении, т. е. движение источника колебаний (гудка) относительно приемника (уха) изменяет частоту принимаемых колебаний.

Для рассмотрения эффекта Доплера предположим, что источник и приемник звука движутся вдоль соединяющей их прямой; $v_{ист}$ и $v_{пр}$ — соответственно скорости движения источника и приемника, причем они положительны, если источник (приемник) приближается к приемнику (источнику), и отрицательны, если удаляется. Частота колебаний источника равна ν_0.

1. Источник и приемник покоятся относительно среды, т.е. $v_{ист}=v_{пр}=0$. Если v — скорость распространения звуковой волны в рассматриваемой среде, то длина волны $\lambda=vT=v/\nu_0$. Распространяясь в среде, волна достигнет приемника и вызовет колебания его звукочувствительного элемента с частотой

$\nu=v/\lambda=v/(vT)=\nu_0$

Следовательно, частота ν звука, которую зарегистрирует приемник, равна частоте ν_0, с которой звуковая волна излучается источником.

2. Приемник приближается к источнику, а источник покоится, т.е. $v_{пр}>0$, $v_{ист}=0$. В данном случае скорость распространения волны относительно приемника станет равной $v+v_{пр}$. Так как длина волны при этом не меняется, то

$$\nu=\frac{v+v_{пр}}{\lambda}=\frac{v+v_{пр}}{vT}=\frac{(v+v_{пр})\nu_0}{v},$$

т. е. частота колебании, воспринимаемых приемником, в $(v+v_{пр})/v$ раз больше частоты колебаний

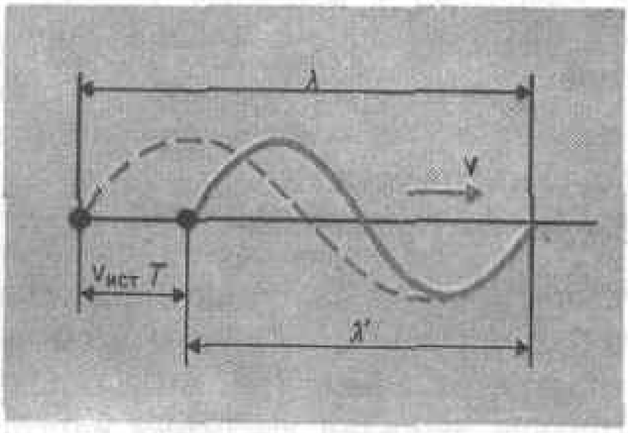

Рис. 224

3. Источник приближается к приемнику, а приемник покоится, т.е. $v_{ист}>0$, $v_{пр}=0$. Скорость распространения колебаний зависит лишь от свойств среды, поэтому за время, равное периоду колебаний источника, излученная им волна пройдет в направлении к приемнику расстояние vT (равное длине волны Я) независимо от того, движется ли источник или покоится. За это же время источник пройдет в направлении волны расстояние $v_{ист}T$ (рис.224), т.е. длина волны в направлении

$$\nu = v/\lambda' = \frac{v}{(v - v_{ист})T} = \frac{v\nu_0}{v - v_{ист}},$$

т. е. частота ν колебаний, воспринимаемых приемником, увеличится в $v/(v-v_{ист})$ раз. В случаях 2 и 3, если $v_{ист}<0$ и $v_{пр}<0$, знак будет обратным.

4. Источник и приемник движутся относительно друг друга. Используя результаты, полученные

$$\nu = \frac{(v \pm v_{пр})\,\nu_0}{v \mp v_{ист}}, \qquad (159.1)$$

причем верхний знак берется, если при движении источника или приемника происходит их сближение, нижний знак — в случае их взаимного удаления.

Из приведенных формул следует, что эффект Доплера различен в зависимости от того, движется ли источник или приемник. Если направления скоростей $v_{пр}$ и $v_{ист}$ не совпадают с проходящей через источник и приемник прямой, то вместо этих скоростей в формуле (159.1) надо брать их проекции на направление этой прямой.

§ 160. Ультразвук и его применение

По своей природе ультразвук представляет собой упругие волны, и в этом он не отличается от звука (см. §158). Однако ультразвук, обладая высокими частотами (ν>20кГц) и, следовательно, малыми длинами волн, характеризуется особыми свойствами, что позволяет выделить его в отдельный класс явлений. Из-за малых длин волн ультразвуковые волны, как и свет, могут быть получены в виде строго направленных пучков.

Для генерации ультразвука используются в основном два явления.

Обратный пьезоэлектрический эффект (см. также §91) — это возникновение деформации в вырезанной определенным образом кварцевой пластинке (в последнее время вместо кварца применяется титанат бария) под действием электрического поля. Если такую пластинку поместить в высокочастотное переменное поле, то можно вызвать ее вынужденные колебания. При резонансе на собственной частоте пластинки получают большие амплитуды колебаний и, следовательно, большие интенсивности излучаемой ультразвуковой волны. Идея кварцевого ультразвукового генератора принадлежит французскому физику П. Ланжевену (1872—1946).

Магнитострикция — это возникновение деформации в ферромагнетиках под действием магнитного поля. Поместив ферромагнитный стержень (например, из никеля или железа) в быстропеременное магнитное поле, возбуждают его механические колебания, амплитуда колебаний которых максимальна в случае резонанса.

Ультразвуки широко используются
в технике, например для направленной подводной сигнализации, обнаружения подводных предметов и определения глубин (гидролокатор, эхолот). Например, в эхолоте от пьезокварцевого генератора, укрепленного на судне, посылаются направленные ультразвуковые сигналы, которые, достигнув дна, отражаются от него и возвращаются обратно. Зная скорость их распространения в воде и определяя время прохождения (от подачи до возвращения) ультразвукового сигнала, можно вычислить глубину. Прием эха также производится с помощью пьезокварца. Звуковые колебания, дойдя до пьезокварца, вызывают в нем упругие колебания, в результате чего на противоположных поверхностях кварца возникают электрические заряды, которые измеряются.

Если пропускать ультразвуковой сигнал через исследуемую деталь, то можно обнаружить в ней дефекты по характерному рассеянию пучка и по появлению ультразвуковой тени. На этом принципе создана целая отрасль техники—**ультразвуковая дефектоскопия,** начало которой положено С. Я. Соколовым (1897— 1957). Применение ультразвука легло также в основу новой области акустики — **акустоэлектроники,** позволяющей на ее основе разрабатывать приборы для обработки сигнальной информации в микрорадиоэлектронике.

Ультразвук применяют для воздействия на различные процессы (кристаллизацию, диффузию, тепло- и массообмен в металлургии и т. д.) и биологические объекты (повышение интенсивности процессов обмена и т.д.), для изучения физических свойств веществ (поглощения, структуры вещества и т.д.). Ультразвук используется также для механической обработки очень твердых и очень хрупких тел, в медицине (диагностика, ультразвуковая хирургия, микромассаж тканей) и т. д.