

ГЛАВА XII

АКУСТИКА

§ 66. Звук как физическое явление. Распространение звуковых волн

Специфическое ощущение, воспринимаемое нами как звук, является результатом воздействия на слуховой аппарат человека колебательного движения упругой среды — чаще всего воздуха. Колебания среды возбуждаются источником звука и, распространяясь в среде, доходят до приемного аппарата — нашего уха. Таким образом, бесконечное разнообразие слышимых нами звуков вызывается колебательными процессами, различающимися друг от друга частотой и амплитудой. Не следует смешивать две стороны одного и того же явления: звук как физический процесс представляет собой частный случай колебательного движения; в качестве же психофизиологического явления звук есть некоторое специфическое ощущение, механизм возникновения которого изучен в настоящее время довольно подробно.

Говоря о физической стороне явления, мы характеризуем звук его *интенсивностью (силой)*, его *составом и частотой* связанных с ним колебательных процессов; имея же в виду звуковые ощущения, мы говорим о *громкости, о тембре, о высоте* звука.

В твердых телах звук может распространяться как в виде продольных, так и в виде поперечных колебаний. Поскольку жидкости и газы не имеют упругости сдвига, очевидно, что в газообразной и в жидкой средах звук может распространяться только в виде *продольных* колебаний. В газах и в жидкостях звуковые волны представляют собой чередующиеся *сгущения и разрежения* среды, удаляющиеся от источника звука с определенной характерной для каждой среды скоростью. *Поверхностью звуковой волны* является геометрическое место частиц среды, имеющих одинаковую фазу колебаний. Поверхности звуковых волн можно провести, например, так, чтобы между поверхностями соседних волн заключались слои сгущения и слой разрежения. Направление, перпендикулярное к поверхности волны, называют *лучом*.

Звуковые волны в газообразной среде могут быть сфотографированы. Для этой цели за источником звука помещают фотографиче-

скую пластинку, на которую спереди направляют пучок света от электрической искры так, чтобы эти лучи от мгновенной вспышки света падали на фотопластинку, пройдя через воздух, окружающий источник звука. На рис. 158—160 приведены полученные по указанному способу фотографии звуковых волн. Источник звука был отделен от фотопластинки небольшим экранчиком на подставке.

На рис. 158, *а* видно, что звуковая волна только что вышла из-за экрана; на рис. 158, *б* та же волна заснята вторично спустя несколько тысячных долей секунды. Поверхностью волны в данном случае является сфера. На фотографии изображение волны получается в виде окружности, радиус которой со временем увеличивается.

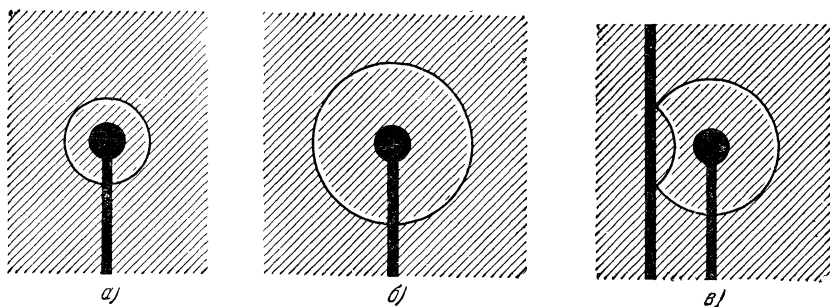


Рис. 158. Фотография звуковой волны в два момента времени (*а* и *б*). Отражение звуковой волны (*в*).

На рис. 158, *в* приведена фотография звуковой сферической волны, *отраженной* от плоской стенки. Здесь следует обратить внимание на то, что отраженная часть волны как бы исходит из точки, находящейся за отражающей поверхностью на таком же расстоянии от отражающей поверхности, как и источник звука. Общеизвестно, что явлением отражения звуковых волн объясняется *эхо*.

На рис. 159 показано изменение волновой поверхности при прохождении звуковой волны через линзообразный мешочек, наполненный водородом. Это изменение поверхности звуковой волны является следствием *преломления* (рефракции) звуковых лучей: у поверхности раздела двух сред, где скорость волн различна, направление распространения волны изменяется.

Рис. 160 воспроизводит фотографию звуковых волн, на пути распространения которых поставлен экран с четырьмя щелями. Проходя через щели, волны огибают экран. Это явление огибания волнами встреченных препятствий называют *дифракцией*.

Законы распространения, отражения, преломления и дифракции звуковых волн могут быть выведены из принципа Гюйгенса, согласно которому каждая приведенная в колебание частица

среды может рассматриваться как новый центр (источник) волн; интерференция всех этих волн дает наблюдаемую в действительности волну (способы применения принципа Гюйгенса будут пояснены в третьем томе на примере световых волн).

Звуковые волны несут с собой некоторое количество движения и вследствие этого оказывают давление на встречаемые ими препятствия.

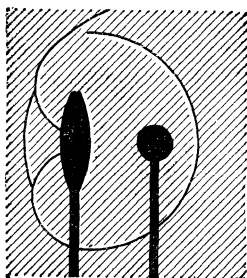


Рис. 159. Преломление звуковой волны.

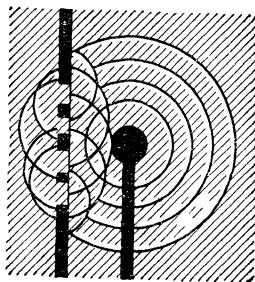


Рис. 160. Дифракция звуковых волн.

Для пояснения этого факта обратимся к рис. 161. На этом рисунке пунктиром изображена синусоида смещений частиц среды в некоторый момент времени при распространении в среде продольных волн. Скорости этих частиц в рассматриваемый момент времени изобразятся косинусоидой, или, что то же, синусоидой, опережающей синусоиду смещений на четверть периода (на рис. 161 — сплошная линия).

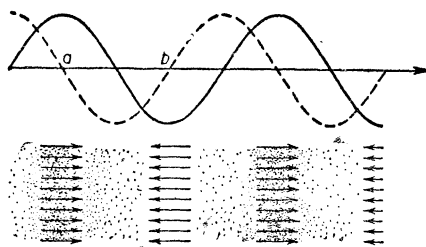


Рис. 161. В сгущениях проходящей звуковой волны частицы движутся вперед

на в сторону распространения волн ¹⁾. Наоборот, разрежения среды будут наблюдаться там, где смещение частиц тоже равно нулю или близко к нулю, но где скорость частиц направлена в сторону, противоположную распространению волн. Итак, в сгущениях частицы движутся вперед, в разрежениях — назад. Но в сгущен-

¹⁾ Синусоида смещений, изображенная на рис. 161, показывает, что частицы среды, смежные с a и лежащие слева от a , смещены направо, лежащие же справа от a — налево, т. е. навстречу друг другу. Частицы среды, смежные с b и лежащие слева от b , смещены налево, справа от b — направо, т. е. здесь вследствие смещения частицы удалены друг от друга.

ных слоях находится большее число частиц, чем в разрежениях. Таким образом, в любой момент времени в бегущих продольных звуковых волнах число частиц, движущихся вперед, несколько превышает число частиц, движущихся назад. Вследствие этого звуковая волна несет с собой некоторое количество движения, что и проявляется в давлении, которое звуковые волны оказывают на встречаемые ими препятствия.

Экспериментально *давление звука* было исследовано Рэлеем и Петром Николаевичем Лебедевым.

Теоретически *скорость звука* определяется формулой Лапласа [§ 65, формула (5)]:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (1)$$

где K — модуль всесторонней упругости (когда сжатие производится без притока и отдачи тепла), ρ — плотность.

Если сжатие тела производить, поддерживая температуру тела постоянной, то для модуля упругости получаются величины меньшие, чем в том случае, когда сжатие производится без притока и отдачи тепла. Эти два значения модуля всесторонней упругости, как доказывается в термодинамике, относятся так, как теплоемкость тела при постоянном давлении к теплоемкости тела при постоянном объеме.

Для газов (не слишком сжатых) изотермический модуль всесторонней упругости равен просто давлению газа p . Если, не изменяя температуры газа, мы сожмем газ (увеличим его плотность) в n раз, то и давление газа возрастет в n раз. Следовательно, по формуле Лапласа получается, что скорость звука в газе не зависит от плотности газа.

Из газовых законов и формулы Лапласа можно вывести (§ 134), что скорость звука в газах пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры газа:

$$c = \sqrt{g \kappa RT}, \quad (2)$$

где g — ускорение силы тяжести, κ — отношение теплоемкостей ($\kappa = C_p/C_v$) и R — универсальная газовая постоянная.

При 0°C скорость звука в сухом воздухе равна $c_0 = 332 \text{ м/сек}$; при средних температурах и средней влажности скорость звука в воздухе считают равной 340 м/сек . Скорость звука в водороде при 0°C равна 1280 м/сек .

В воде скорость звука составляет 1450 м/сек , в стекле 5600 м/сек , в железе 5170 м/сек .

Следует заметить, что ударные звуковые волны, вызываемые выстрелом или взрывом, в начале своего пути имеют скорость, зна-

чительно превосходящую нормальную скорость звука в данной среде. Ударная звуковая волна в воздухе, вызванная сильным взрывом, может иметь вблизи источника звука скорость, в несколько раз превосходящую нормальную скорость звука в воздухе, но уже на расстоянии десятков метров от места взрыва скорость распространения волны уменьшается до нормальной величины.

Как уже упоминалось в § 65, звуковые волны разной длины имеют практически одинаковую скорость. Исключение составляют те области частот, для которых характерно особенно быстрое затухание упругих волн при их распространении в рассматриваемой среде. Обычно эти частоты лежат далеко за пределами слышимости (для газов при атмосферном давлении — это частоты порядка 100 000 колебаний в секунду). Теоретический анализ показывает, что дисперсия и поглощение звуковых волн связаны с тем, что для перераспределения энергии между поступательным и колебательным движениями молекул требуется некоторое, хотя и малое, время. Это приводит к тому, что длинные волны (волны звукового диапазона) движутся несколько медленнее, чем очень короткие «неслышимые» волны. Так, в парах углекислоты при 0°C и атмосферном давлении звук имеет скорость 268 м/сек , тогда как весьма короткие, «неслышимые», волны распространяются со скоростью 280 м/сек .

Звуковая волна, распространяясь в среде, может иметь различную форму, зависящую от размеров и формы источника звука. В случаях, технически наиболее интересных, источник звука (излучатель) представляет собой некоторую колеблющуюся поверхность, — таковы, например, мембрана телефона или диффузор громкоговорителя. Если такой источник звука излучает звуковые волны в открытое пространство, то форма волны существенным образом зависит от относительных размеров излучателя; излучатель, размеры которого велики сравнительно с длиной звуковой волны, излучает звуковую энергию в одном только направлении, именно в направлении своего колебательного движения. Напротив, излучатель малого сравнительно с длиной волны размера излучает звуковую энергию по всем направлениям. Форма волнового фронта в том и другом случаях будет, очевидно, различной.

Рассмотрим сначала первый случай. Представим себе жесткую плоскую поверхность достаточно большого (сравнительно с длиной волны) размера, совершающую колебательное движение в направлении своей нормали. Двигаясь вперед, такая поверхность создает перед собой сгущение, которое благодаря упругости среды будет распространяться в направлении смещения излучателя. Двигаясь обратно, излучатель создает за собой разрежение, которое будет перемещаться в среде вслед за начальным сгущением. При длительном колебании излучателя мы будем наблюдать по обе стороны от него звуковую волну, характеризующуюся тем, что все частицы среды, находящиеся на равном расстоянии от излучающей поверхности

(причем это расстояние мы будем отсчитывать в направлении нормали к поверхности), совершают синфазные (т. е. совпадающие по фазе) колебания с одинаковой амплитудой. Такую волну мы называем *плоской*. Уравнение простейшей плоской волны нам уже знакомо (§ 63); перепишем его здесь в следующем виде:

$$\xi = a \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (3)$$

В этом уравнении введены следующие обозначения: ξ — смещение частицы среды; a — амплитуда колебания частицы; ω — угловая частота колебаний, т. е. число колебаний в 2π сек.; t — время; x — расстояние частицы от излучающей поверхности, измеренное в направлении нормали к этой последней; c — скорость звука.

Вычисления показывают, что амплитуда избыточного давления p_0 равна произведению амплитуды скорости частиц (ωa), средней плотности среды ρ и скорости звука c :

$$p_0 = c\rho \cdot \omega a. \quad (4)$$

Произведение средней плотности среды на скорость звука, $c\rho$, называют *акустическим сопротивлением среды*.

Акустические сопротивления $c\rho$ при 20°C

Материал	c , м/сек	ρ , г/см ³	$c\rho$, г/см ² ·сек
Железо	5170	7,8	4 000 000
Бетон	2200	2,2	480 000
Дерево	5000	0,5	250 000
Вода	1440	1,0	144 000
Пробка	430	0,3	13 000
Резина	60	1,0	6 000
Воздух	340	0,0013	44

Рассмотрим теперь случай *сферических* волн. Когда размеры излучающей поверхности становятся малыми сравнительно с длиной волны, волновой фронт заметно искривляется. Это происходит потому, что энергия колебаний распространяется по всем направлениям от излучателя.

Явление можно лучше всего понять на следующем простом примере. Представим себе, что на поверхность воды упало длинное бревно. Возникшие благодаря этому волны идут параллельными рядами в обе стороны от бревна. Иначе обстоит дело в том случае, когда в воду брошен небольшой камень, — при этом волны распространяются концентрическими кругами. Бревно велико сравнительно

но с длиной волны на поверхности воды; идущие от него параллельные ряды волн представляют собой наглядную модель плоских волн. Камень же имеет небольшие размеры; расходящиеся от места его падения круги дают нам модель сферических волн. При распространении сферической волны поверхность волнового фронта возрастает пропорционально квадрату его радиуса. При постоянной мощности источника звука энергия, протекающая через каждый квадратный сантиметр сферической поверхности радиуса r , обратно пропорциональна r^2 . Так как энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды, то ясно, что амплитуда колебаний в сферической волне должна убывать как величина, обратная первой степени расстояния от источника звука. Уравнение сферической волны имеет, следовательно, такой вид:

$$\xi = \frac{a}{r} \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right). \quad (5)$$

§ 67. Интенсивность звука

Силой, или интенсивностью, звука в проходящей (т. е. несостоячей) волне называется *количество энергии, ежесекундно протекающей через 1 см² площадки, перпендикулярной к направлению распространения волны.*

Интенсивность (силу) звука измеряют в *эрг/см²·сек* или же в единицах, в 10 раз больших, а именно в *мквт/см²* (микроватт — миллионная доля ватта).

Вычисления показывают, что интенсивность звука I равна отношению квадрата амплитуды избыточного давления к удвоенному акустическому сопротивлению среды:

$$I = \frac{p_0^2}{2c\rho}. \quad (6)$$

Это справедливо как для плоских, так и для сферических волн. В случае плоских волн, если пренебречь потерями, связанными с внутренним трением, сила звука не должна изменяться с расстоянием. В случае сферических волн амплитуды смещения, скорости частиц и избыточного давления убывают как величины, обратные первой степени расстояния от источника звука. Следовательно, в случае сферических волн сила звука убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника звука.

Для измерения силы звука обычно применяют микрофоны (их устройство описано во втором томе курса, в главе об электрических колебаниях). Для измерения силы звука применяют также *диск Рэлея* — это тонкий небольшой диск (изготовленный из пластинки слюды толщиной в 2—3 сотых миллиметра) диаметром в 2—5 мм, подвешенный на тончайшей нити. В поле звуковых волн на диск