

ГЛАВА XV

ЗВУК

§ 61. Природа звука

Звук представляет собой колебания упругой среды, воспринимаемые нашими органами слуха.

Физиологическое восприятие звука является отражением соответствующих физических его характеристик. Так, гармоническое колебание определенной частоты воспринимается нами как определенный музыкальный тон. Физической характеристике — частоте колебаний — соответствует физиологическое понятие — высота звука. Малые частоты колебаний вызывают ощущение так называемого низкого тона (бас, баритон). Большие частоты колебаний вызывают ощущение звука высокого тона (сопрано, дискант). *Чем больше частота колебаний, тем больше высота тона воспринимаемого звука.*

Следует отметить, что благодаря своему устройству нормальное человеческое ухо способно воспринимать не любые колебания, а лишь такие, частота которых лежит в пределах от 16 до 20 000 колебаний в секунду. Этот интервал частот носит название собственно звуковых колебаний. Колебания с частотами, большими 20 000 герц (Гц), носят название ультразвуков и могут быть восприняты специальными приборами. Колебания с частотами, меньшими 16 Гц, носят название инфразвуков, и для их восприятия также сконструированы специальные приборы, расширяющие возможности наших органов чувств.

Несколько одновременно приходящих звуковых колебаний, частоты которых находятся в определенном соответствии, создают впечатление созвучия, приятного (консонанс) или неприятного (диссонанс). Большое число одновременных звуковых колебаний с самыми различными частотами создает впечатление шума.

Интенсивность звука может быть охарактеризована различными величинами. В звуковом поле периодически колеблются частицы среды, периодически меняются их скорости и силы давления (в жидкости или газе) или нормальные и касательные напряжения

(в твердых телах). Интенсивность звука может характеризовать амплитуда колебаний любой из этих величин. Однако, поскольку все эти величины, как показано в гл. XIII, связаны между собой определенными соотношениями, то целесообразно ввести единую энергетическую характеристику. Такая характеристика для волн любого типа была предложена в 1877 г. Н. А. Умовым.

В § 52 было показано, что полная энергия гармонически колеблющейся точки остается постоянной. В случае бегущей волны можно мысленно вырезать из фронта волны площадку dS (рис. 4.42). За время dt волна распространится на расстояние $v dt$ перпендикулярно к этому фронту. Если обозначить через W Дж/м³ энергию единицы объема колеблющейся упругой среды, то энергия всех ее частиц, пришедших в колебательное движение в объеме $dSv dt$, будет равна $WdSv dt$ Дж. Эта энергия была принесена за время dt в данный объем волной, распространяющейся через площадку dS . Разделив полученную объемом энергию на dS и dt , мы получим величину потока энергии

$$I = Wv, \quad (61.1)$$

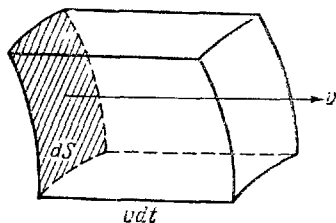


Рис. 4.42.

т. е. энергию, переносимую распространяющейся волной через единицу площади за единицу времени. Вектор I направлен в сторону распространения волны и носит название вектора Умова. Величина I измеряется в Вт/м² и для звукового поля называется силой звука.

Сила звука является физической характеристикой интенсивности звуковых колебаний. Мы оцениваем ее субъективно как громкость звука. Нормальное человеческое ухо способно воспринимать звуки, сила которых превышает некоторое минимальное значение, различное для различных частот,

$$I_{\text{мин}} = f(\nu). \quad (61.2)$$

Величина $I_{\text{мин}}$ называется порогом слышимости звука и для средних частот $\nu \approx 10^3$ Гц, лучше всего воспринимаемых ухом, составляет около 10^{-12} Вт/м². При очень большой силе звука порядка 10 Вт/м² звук начинает восприниматься, кроме уха, органами осязания, а в ушах вызывает болевое ощущение.

Поскольку наше ухо способно воспринимать звуки, отличающиеся по силе в 10^{13} раз, то оно нечувствительно к малым изменениям силы звука и замечает прирост громкости звука при увеличении силы последнего не менее, чем на 10 — 20% . Поэтому в качестве характеристики интенсивности звука выбирают обычно не силу

звука I , а десятичный логарифм последней, точнее, величину

$$\beta = \lg I/I_0, \quad (61.3)$$

где I_0 — условно выбранный нулевой уровень $I_0 = 10^{-12}$ Дж/(м²·с) = = 10^{-12} Вт/м². Величина β называется уровнем силы звука и измеряется в б е л а х (Б). Из (61.3) следует, что уровень силы звука в 1 Б соответствует силе звука, равной $I = 10 I_0$. Наряду с этой единицей пользуются в 10 раз более мелкой единицей, называемой д е ц и б е л о м (дБ):

$$\beta = 10 \lg I/I_0 \text{ дБ}. \quad (61.4)$$

Для человеческих ощущений приближенно справедлив психологический закон — *интенсивность ощущения пропорциональна логарифму степени раздражения*. Это означает, что уровень громкости звука пропорционален β .

Скорость распространения звука в различных средах различна. Как мы видели выше (в § 56), в твердых телах могут распространяться звуковые упругие колебания двух типов: продольные и поперечные. В изотропных твердых телах скорости этих двух типов колебаний равны соответственно

$$v_{\text{прод}} = \sqrt{E/\rho}, \quad (61.5)$$

$$v_{\text{попер}} = \sqrt{G/\rho}, \quad (61.6)$$

где E — модуль упругости, G — модуль сдвига и ρ — плотность среды. В анизотропных кристаллах упругие свойства и модули упругости различны по разным направлениям. Поэтому скорость звука в анизотропных телах зависит от направления распространения волны по отношению к кристаллографическим осям, а для поперечных волн — еще и от ориентации плоскости их поляризации.

В жидкостях могут распространяться практически только продольные звуковые волны сжатия и разрежения. Их скорость равна

$$v_{\text{ж}} = \sqrt{K/\rho}, \quad (61.7)$$

где K — объемный модуль упругости жидкости. В твердых телах скорость звука составляет от 2 до 5 км/с, а в жидкостях от 0,7 до 2 км/с (в воде $v_{\text{зв}} = 1,34$ км/с).

Для скорости распространения упругих колебаний в газе мы вели в гл. XIV два выражения (56.12) и (56.13) в зависимости от термических характеристик процесса. Формула (56.12) принадлежит Ньютону, который предполагал, что звук распространяется изотермически. Однако опыт показал, что даже для звуковых колебаний с минимальными частотами за время одного колебания ($\sim 0,1$ с) температура между сжатыми (и тем самым разогретыми) и разреженными (и тем самым охлажденными) областями волны не успевает выравняться. Практически процесс распространения звука можно считать адиабатическим, так что скорость распространения

звука в идеальном газе определяется выражением

$$v_c = \sqrt{\gamma p/\rho} = \sqrt{\gamma RT/\mu}, \quad (61.8)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ — отношение теплоемкостей при постоянном объеме и постоянной температуре.

Для одноатомных газов $\gamma = 1,67$, а для многоатомных γ приближается к единице. Поэтому, сравнивая выражение (61.8) со скоростью хаотического теплового движения молекул газа

$$\bar{v}_{\text{мол}} = \sqrt{3RT/\mu}, \quad (61.9)$$

мы видим, что $v_{\text{мол}}$ лишь ненамного превышает скорость звука. В частности, для воздуха при 0°C $v_{\text{мол}} = 500$ м/с, а $v_{\text{зв}} = 331$ м/с.

Анализируя выражение (61.8), видим, что скорость звука в газе зависит не от давления p и плотности ρ по отдельности, а от их отношения, т. е. в конечном счете от абсолютной температуры газа T . Если поместить звонок под колокол воздушного насоса и откачивать воздух, то одновременное уменьшение плотности и давления не изменит скорости распространения звука под колоколом. Откачка воздуха будет уменьшать лишь интенсивность звука, поскольку по мере разрежения язычок звонка будет приводить в колебание все меньшие и меньшие массы воздуха. Наконец, в полном вакууме распространение звука прекратится вовсе из-за отсутствия упругой среды.

Таким образом, скорость звука в газах зависит от температуры и состава газа, поскольку последний влияет на величину γ и μ . В частности, для наиболее легкого газа — водорода ($\mu = 2$) скорость звука максимальна и при 0°C равна 1263 м/с.

§ 62. Распространение звука. Источники и приемники звука

Если размеры источника малы по сравнению с длиной волны, то от него распространяется во все стороны сферическая звуковая волна (рис. 4.43). Если же размеры источника велики по сравнению с длиной волны, то вследствие интерференции и дифракции он излучает направленную звуковую волну (рис. 4.44). В воздухе при $v = 331$ м/с и $\nu_{\text{мин}} = 16$ Гц соответственно длина волны $\lambda_{\text{макс}} = 331$ м/с/16 с⁻¹ = 20,7 м. При $\nu_{\text{макс}} = 20\,000$ Гц соответствующая длина волны в воздухе $\lambda_{\text{мин}} = 331$ м/с/20 000 с⁻¹ = 0,0165 м = 16,5 мм.

Поэтому для получения направленного звукового пучка на обычных речевых частотах (300—2000 Гц) необходимо применять рупоры диаметром порядка 1 м. Для получения же направленных ультразвуковых пучков ($\lambda_{\text{уз}} < 0,0165$ м) применяются

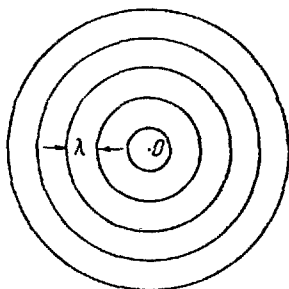


Рис. 4.43.