

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

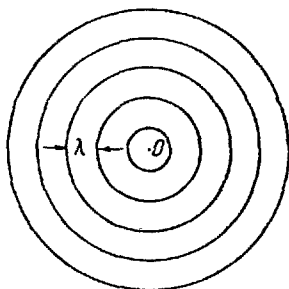


Рис. 4.43.

излучающие пластинки диаметром в несколько сантиметров. При указанных выше длинах волн звука можно наблюдать дифракционные явления, в частности огибание звуком препятствия даже большой протяженности (стена, дом).

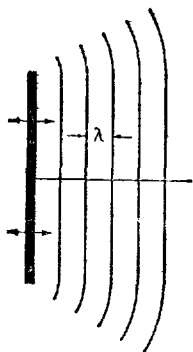


Рис. 4.44.

При встрече с препятствием больших размеров звуковые волны отражаются и возвращаются обратно. Это явление называется эхо. В гористой местности благодаря многократному отражению звука наблюдается длительное эхо, иногда до 5—10 с.

Человек обладает довольно сложным аппаратом для восприятия звуков. Звуковые колебания собираются *ушной раковиной* и через слуховой канал воздействуют на *барабанную перепонку*. Колебания последней через систему маленьких косточек передаются второй упругой мембране, так называемому *овальному окну*, закрывающему небольшую полость *улитки*, заполненной жидкостью (*лимфой*). Внутри улитки расположено большое число специальных *волокон*, имеющих различную длину и натяжение, а следовательно, различные собственные частоты колебаний. При действии сложного звука каждое из этих волокон резонирует на тот составляющий тон, частота которого совпадает с собственной частотой волокна, и раздражает соответствующее окончание слухового нерва. Набор резонансных частот в слуховом аппарате и определяет область воспринимаемых нами звуковых колебаний (16—20 000 Гц).

Наличие у человека двух ушей позволяет определять направление приходящего звука (*бинауральный эффект*). Как

видно из рис. 4.45, разность хода двух звуковых лучей при угле между направлением на источник звука и плоскостью симметрии человеческого тела, равном φ , составляет $\Delta l = a \sin \varphi$, где $a \approx 20$ см — среднее расстояние между ушами.

При $\varphi = 3^\circ$ разность хода $\Delta l \approx 1$ см, а разность времен достижения сигналом обеих ушей $\Delta t = \Delta l/v_{\text{зв}} \approx 3 \cdot 10^{-5}$ с. При периоде колебания $T = 10^{-4}$ с сдвиг фазы между обоими звуковыми ощущениями достигает 0,3 от периода и вполне ощутим. Для высоких частот и малых длин волн голова создает

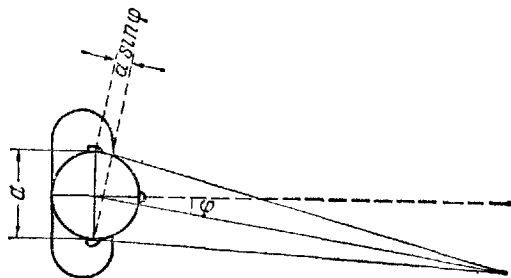


Рис. 4.45.

уже значительную акустическую «тень», что вызывает заметную разность амплитуд сигналов в обоих ушах.

Если от источника малых размеров звук распространяется одинаково во все стороны, то сила звука будет убывать с ростом расстояния от источника. Считая источник практически точечным, опишем из него сферу произвольного радиуса r м. Пусть мощность источника равна Π Дж/с. Тогда сила звука I на расстоянии r от источника, очевидно, равна

$$I = \frac{\Pi}{4\pi r^2} \text{ Вт/м}^2, \quad (62.1)$$

т. е. убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. В противоположность этому, для направленного звукового пучка площадь поперечного сечения пучка, а следовательно, и сила звука должны практически не зависеть от расстояния до источника.

Однако и в этом случае наблюдается затухание звука, связанное с различными необратимыми процессами, происходящими в звуковой волне. При колебательных движениях частиц упругой среды между ними возникают силы внутреннего трения (вязкость), и за счет работы последних часть звуковой энергии непрерывно переходит в тепло. Кроме того, как уже указывалось выше, в звуковой волне в каждый данный момент в соседстве находятся разогретые области сжатия и охлажденные области разрежения. Вследствие теплопроводности среды разность температур между этими областями выравнивается, что снижает максимальное давление и максимальное разрежение, т. е. амплитуду звуковой волны. Это в свою очередь связано с уменьшением энергии колебаний, переходящей в тепло. Таким образом, внутреннее трение (вязкость) и теплопроводность среды приводят к поглощению звуковой энергии и непрерывному уменьшению интенсивности распространяющейся звуковой волны. Если $I(x)$ есть сила (поток) звука, прошедшего в поглощающей среде путь x , то при прохождении следующего элементарного слоя dx часть этого потока, пропорциональная dx , поглотится и поток изменится на величину

$$dI = -\alpha I dx,$$

где α — линейный коэффициент поглощения звука данной средой. Полученное соотношение для дифференциалов можно преобразовать к виду

$$0 = dI/I + \alpha dx = d(\ln I) + d(\alpha x) = d[\ln I + \alpha x],$$

откуда

$$\ln I + \alpha x = \text{const} = \ln I_0,$$

где I_0 есть начальная сила звука, входящего в среду, при $x = 0$. Потенцируя последнее равенство, получаем окончательное

выражение для изменения силы звука с расстоянием:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}. \quad (62.2)$$

Величина α возрастает примерно пропорционально квадрату частоты звука, поэтому низкие звуки распространяются дальше высоких. Особенно сильно поглощаются ультразвуки. Так, при частоте 1 МГц = 10^6 Гц ультразвук распространяется в воздухе на 5 см. Коэффициент поглощения звука в воде примерно в 700 раз меньше, чем в воздухе. Соответственно во столько же раз больше дальность распространения звука. Так, при частоте 0,1 МГц = 10^5 Гц она равна в воде 3 км. Это обстоятельство позволяет осуществлять связь и гидролокацию в воде на ультразвуковых частотах, при которых легче создать направленные пучки и избежать уменьшения интенсивности с расстоянием по закону (62.2).

При частотах $\nu \sim 10^9$ Гц в газах длина волны ультразвука $\lambda = v/\nu = 3 \cdot 10^3 / 10^9 = 3 \cdot 10^{-6}$ м, т. е. становится сравнимой с длиной свободного пробега молекул при атмосферном давлении. Поскольку механическая связь между соседними объемами газа осуществляется обменом молекул и взаимными столкновениями последних (см. теорию явлений переноса), то при столь коротких волнах газ уже нельзя рассматривать как сплошную упругую среду. Практически в этом случае вся энергия ультразвука будет поглощаться на протяжении одной длины волны.

В пористых материалах (войлок, бархат, штукатурка и т. п.) воздух заключен в огромном числе канальцев неправильной формы. При звуковых колебаниях эти отдельные объемы воздуха испытывают сильное трение о стенки канальцев, поэтому подобные материалы интенсивно поглощают падающие на них звуковые волны.

В архитектурной акустике для больших помещений (залы, аудитории) играет существенную роль так называемая г у л к о с т ь, или р е в е р б а ц и я этих помещений. Звуки испытывают многократное отражение (эхо) от ограждающих поверхностей и воспринимаются слушателем в течение некоторого довольно длительного промежутка времени. Подобная гулкость помещения увеличивает силу доходящего до нас звука, однако при слишком длительной реверберации отдельные звуки речи начинают накладываться один на другой и речь перестает восприниматься членораздельно. Поэтому стены залов и аудиторий покрывают специальными звукопоглощающими материалами для уменьшения гулкости.

Источником звуковых колебаний может служить любое колеблющееся тело: язычок звонка, камертон, струна скрипки или рояля, столб воздуха в духовых инструментах и т. п. Те же самые тела могут служить и приемниками звука, когда они приходят в движение под действием колебаний окружающей их упругой среды. Когда источником или приемником звука служит протяженное тело, обладающее множеством степеней свободы, то характер его колебаний

отличается от рассмотренного выше идеализированного случая колебаний материальной точки с одной степенью свободы.

Для выяснения возникающих в этом случае качественно новых явлений рассмотрим пример колебаний струны длины l , закрепленной по краям и натягиваемой с силой S ньютон (рис. 4.46). Из условий закрепления струны вытекает, что концы струны должны оставаться неподвижными, т. е. на краях струны всегда должны быть узлы колебаний. Если других узлов точек на всей длине

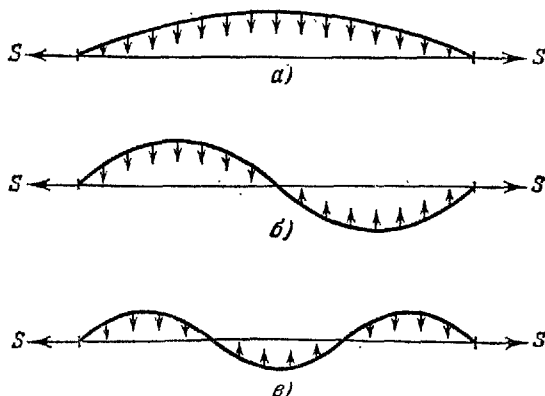


Рис. 4.46.

струны нет, то струна будет колебаться как целое (рис. 4.46, а) и длина стоячей волны λ_0 будет равна удвоенной длине струны:

$$\lambda_0 = 2l. \quad (62.3)$$

По аналогии с формулами (61.5) и (61.6) скорость распространения колебаний вдоль натянутой струны будет равна

$$v_c = \sqrt{S/\rho'}, \quad (62.4)$$

где ρ' — масса единицы длины струны (кг/м). Следовательно, частота колебаний возникающего звука, так называемого основного тона струны, равна

$$\nu_0 = \frac{v_c}{\lambda_0} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{S}{\rho'}} \quad (62.5)$$

и зависит от длины струны l , ее массы ρ' и натяжения S .

По условиям возбуждения струна может начать колебаться и так, как это изображено на рис. 4.46, б, т. е. с одним дополнительным узлом посередине. Тогда на расстоянии l будет укладываться уже одна стоячая волна длиной $\lambda_1 = \lambda_0/2$, а соответствующая частота колебаний $\nu_1 = 2\nu_0$. Если по длине струны возникнут два дополни-

тельных узла, как показано на рис. 4.46, в, то соответствующая длина стоячей волны $\lambda_2 = \lambda_0/3$, а частота колебаний струны $\nu_2 = = 3\nu_0$ и т. д. Таким образом, колеблющаяся струна наряду с основным тоном частоты ν_0 издает еще целый ряд так называемых обертонов, или высших гармоник с частотами

$$\nu_n = (n + 1) \nu_0. \quad (62.6)$$

Примесь этих гармоник к основному тону создает «окраску», или тембр звука. Различные тела, издающие один и тот же основной тон, или различные люди, поющие одну и ту же музыкальную ноту, по-разному окрашивают ее примесью свойственных им гармоник, т. е. их звуки обладают различным тембром. Тембр звука характеризуется так называемым спектром частот, изображенным на рис. 4.47. По оси абсцисс на этом рисунке отложены частоты, а по оси ординат — амплитуды отдельных составляющих гармонических колебаний.

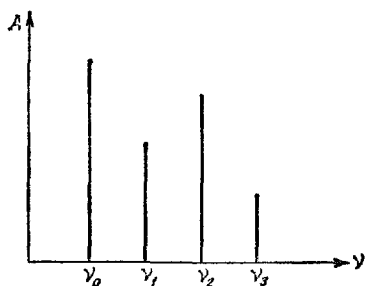


Рис. 4.47.

За последние десятилетия широко развилась область техниче-

ских применений электроакустики, т. е. преобразования электрических колебаний в звуковые, ультразвуковые и обратного их превращения в электрические колебания. Эти методы будут описаны в томе II. Сейчас же укажем лишь на некоторые технические применения ультразвука.

Малая длина волны ультразвука обуславливает легкость получения направленных ультразвуковых пучков. Пропуская пучок ультразвуковых лучей через металлическую деталь, можно обнаружить в ней раковины и другие внутренние дефекты по характерному рассеянию пучка от границ дефекта и появлению ультразвуковой тени. На этом принципе основана так называемая ультразвуковая дефектоскопия, созданная С. Я. Соколовым.

Для определения глубины моря под кораблем применяют так называемый эхолот. Источник ультразвука в днище корабля периодически посылает сигналы. Отражаясь от поверхности дна моря, звук возвращается к кораблю и попадает в соответствующий приемник. По времени прохождения сигнала до дна и обратно Δt определяется глубина моря

$$h = v_{зв} \cdot \Delta t / 2. \quad (62.7)$$

Применение обычных звуковых частот может привести к ошибкам в случае неровного дна, так как волна, отраженная от бо-

ковых выступов дна, может вернуться раньше, чем от точек, расположенных непосредственно под кораблем. Поэтому в эхолоте существенно применение направленных ультразвуковых пучков. Таким же образом может быть обнаружено присутствие под водой посторонних тел, например подводной лодки или рыбного косяка. Эти методы ультразвуковой гидролокации были изобретены П. Ланжевеном.

Ультразвуковые волны большой амплитуды широко применяются в настоящее время в технике для механической обработки твердых материалов и т. п.

Как указывалось выше, ультразвуковые волны в воздухе сильно затухают. Это обстоятельство несколько затрудняет осуществление связи с помощью ультразвуковых сигналов и передачи их на большие расстояния.

В природе ультразвуковой локацией пользуются летучие мыши. Как показали наблюдения, слепые летучие мыши охотятся за насекомыми, легко минуя преграды — ветки деревьев, натянутые провода и т. д. Оказалось, что летучие мыши в полете периодически выпускают свист в диапазоне не улавливаемых человеческим ухом ультразвуковых частот. В отличие от обычных звуковых волн сравнительно большой длины короткие ультразвуковые волны хорошо рассеиваются на самых незначительных преградах. Прослушивая в паузы между выпускаемыми сигналами отраженные и возвращающиеся к ней ультразвуки, летучая мышь легко ориентируется в пространстве.

Колебания с частотами меньше 16 Гц — инфразвуки — также могут найти практическое применение. Укажем лишь на пример так называемого «голоса моря», обнаруженного В. В. Шулейкиным. Шторм на море создает длинные звуковые волны, имеющие низкую частоту (8—13 Гц). Скорость ветра и передвижение шторма порядка 20—30 м/с, скорость же звука и в воздухе и в воде значительно больше. Поэтому инфразвуковой, очень низкий «голос моря» опережает шторм и сигнализирует о его приближении. Некоторые морские животные способны воспринимать столь низкие звуки и прячутся задолго до приближения бури, когда даже барометр еще не предсказывает шторма. С. В. Доброклонским были сконструированы соответствующие приборы, сигнализирующие о приближении шторма.