

Лекция 30 Акустика. Волновая природа звука. источники и приемники звука. Скорость звука в твердых телах, жидкостях и газах. Архитектурная акустика. Акустический резонанс. Анализ звуков.

Л-1: 11.1-11.6; Л-2: с.390-403

Упругие волны частотой от 16 Гц до 20 кГц, распространяющиеся в воздухе, достигнув человеческого уха, вызывают специфическое ощущение звука. В соответствии с этим упругие волны в газах, твердых телах и жидкостях, которые имеют частоту, лежащую в указанных пределах, называют *звуковыми волнами* или просто *звуком*. Волны с частотой, меньшей 16 Гц, называются *инфразвуком*, а с частотой, большей 20 кГц, – *ультразвуком*. Самые высокочастотные упругие волны в диапазоне 10^9 – 10^{13} Гц относятся к *гиперзвуку*.

Область инфразвуковых частот снизу практически не ограничена – в природе встречаются инфразвуковые колебания с частотой в сотые и тысячные доли герца. Частотный диапазон гиперзвуковых волн сверху имеет принципиальное ограничение, обусловленное атомным и молекулярным строением сред, в которых они распространяются.

Область физики, которая изучает способы возбуждения звуковых волн, их распространение и взаимодействие со средой, называется *акустикой*.

Источниками звука могут быть любые явления, вызывающие колебания упругой среды.

Известный опыт со звонком, помещенным под колпак воздушного колокола, из которого выкачивают воздух, доказывает, что для распространения звука необходима упругая среда.

Рассмотрим некоторый объем газа, в который помещен источник колебаний звуковой частоты. Представим себе, что под действием этого источника в каком-нибудь месте произошло сжатие газа, т.е. в это место перешли частицы из других мест. Тогда в области уплотнения давление газа увеличивается, в результате чего возникает сила, направленная в сторону меньших уплотнений, куда и начнут переходить частицы с места первоначального уплотнения. При этом там, где бы-

ло сжатие, наступит разрежение, и наоборот, в соседних местах, где сначала возникло разрежение, произойдет сжатие.

При прохождении звуковой волны образующиеся в среде сгущения и разрежения создают добавочные изменения давления по отношению к среднему внешнему (статическому) давлению. Эти изменения давления и обуславливают избыточное давление в среде.

С давних времен звук служит средством связи и сигнализации. Изучение всех его характеристик позволяет разработать более точные системы передачи информации, повысить дальность систем сигнализации, улучшить качество звучания музыкальных инструментов. Звуковые волны являются практически единственным видом сигналов, которые распространяются в водной среде, где они служат средством подводной связи, используются в навигации, локации. Это обусловлено тем обстоятельством, что никакие виды электромагнитных волн не распространяются в воде (из-за ее электропроводности) на сколько-нибудь значительные расстояния. Низкочастотный звук является инструментом исследования земной коры. Практическое применение ультразвука создало целую отрасль современной техники – ультразвуковую. Ультразвук используется как для контрольно-измерительных целей, так и для активного воздействия на вещество. Высокочастотные звуковые волны и особенно гиперзвук служат важнейшим средством исследования в физике твердого тела.

В зависимости от механизма возникновения и поддержания колебаний все источники звука можно подразделить на следующие три вида.

1. Источники, которые излучают звук в результате собственных колебаний. Такие источники представляют собой колебательные системы с распределенными параметрами. Колебания могут происходить только при условии внешнего воздействия за счет первоначально накопленной энергии (в результате начального смещения или начальной скорости). Получаемые от них звуковые волны являются синусоидальными или близкими к ним. Очевидно, что характер этих колебаний будет определяться главным образом собственными параметрами колебательной системы – массой и упругостью. К источникам этого вида принад-

лежат: камертоны, различные пластины, стержни, колокола, струны, возбуждаемые ударом (рояль) или щипком (гитара, балалайка, арфа и др.).

В качестве примера рассмотрим струну, закрепленную на обоих концах. Струнами называют упругие твердые тела, поперечные размеры которых очень малы по сравнению с их длиной. Если струне сообщить импульс силы, перпендикулярный ее длине, то он будет распространяться вдоль струны. В результате отражения от мест закрепления в струне установятся стоячие волны с узлами в этих местах. При этом на длине струны укладывается целое число полуволн:

$$l = (n+1) \frac{\lambda}{2}, \text{ где } n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{2l}{n+1} \text{ или } v = (n+1) \frac{v}{2l},$$

где v – скорость звука в струне.

Таким образом, свободные колебания струны возникают в виде стоячих волн с собственными частотами, которые определяются приведенной формулой. Частота $\nu_0 = v/2l$ называется *основной частотой*, а соответствующий ей тон звука, который излучается струной, – *основным тоном*. Звуки, соответствующие более высоким частотам, называются *обертонами*.

В камертоне и пластинах устанавливаются волны только основного тона, потому что их конструкция делает возникновение обертонов невозможным.

2. Источники звука, в которых колебательная система совершает автоколебания за счет пополнения энергии извне. Это *органные трубы, свистки, смычковые и духовые инструменты*.

Рассмотрим механизм возникновения звука в органной трубе (рис. 30.1, а). Фотографирование струи воздуха с взвешенными в нем частицами показало, что в щели происходит сложный процесс периодического образования вихрей, схематически изображенный на рис. 30.1, б. Возникающие периодические вихри проходят друг за другом то слева, то справа от клина. На столб воздуха в трубе действуют периодические толчки, в результате чего в нем возникают колебания. Эти

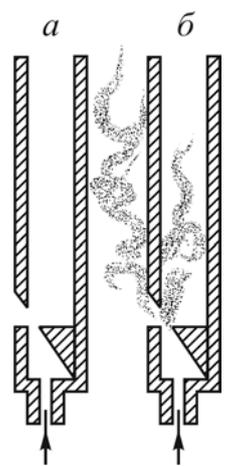


Рис. 30.1

другом то слева, то справа от клина. На столб воздуха в трубе действуют периодические толчки, в результате чего в нем возникают колебания. Эти

колебания в свою очередь оказывают обратное воздействие на процесс вихреобразования около щели. Колебания столба воздуха в трубе приобретают частоту, близкую к одной из его собственных частот, в зависимости от скорости продувания воздуха через щель.

Частота и характер колебаний столба воздуха в органной трубе определяется свойствами колебательной системы, регулирование поступления энергии на поддержание колебаний выполняется самой системой. Поэтому колебания столба воздуха в органной трубе представляют собой типичный случай автоколебаний.

Довольно совершенный тип автоколебательной системы представляет собой голосовой орган человека. Рассмотрим его работу. Верхний конец дыхательного горла, который играет роль воздушной трубки, закрыт эластичными голосовыми связками. Выталкиваемый из легких воздух проходит через щель, которую образуют связки, и приводит их в колебание. Воздушный поток прерывается с частотой собственных колебаний связок, в результате чего возникает звук. Изменяя натяжение голосовых связок, мы изменяем частоту их собственных колебаний и, значит, частоту издаваемого нами звука.

3. Источники звука, в которых колебательные системы совершают вынужденные колебания под действием внешней периодической силы. Это *динамические громкоговорители, мембраны электромагнитных телефонов и сирены*. Источниками ультразвуковых колебаний, которые также относятся к этому виду, служат чаще всего *пьезоэлектрические и магнитострикционные излучатели*. Наиболее распространенные в наше время динамические громкоговорители состоят из магнита, создающего радиальное магнитное поле, и токовой катушки, способной двигаться в этом поле и связанной с большой конусообразной мембраной – диффузором. При пропускании тока звуковой частоты катушка под действием силы Ампера приходит в вынужденные колебания, вызывая движение диффузора, который создает в окружающей среде упругие волны звуковой частоты.

Аналогичное устройство имеют и электромагнитные телефоны, состоящие из постоянного магнита, размещенного вблизи стальной мембраны.

В сирене поток воздуха периодически прерывается диском, который имеет ряд отверстий.

Рассмотрим принцип действия пьезоэлектрических и магнитострикционных излучателей ультразвуковых волн.

Если из некоторых кристаллов (*кварца, турмалина, сегнетовой соли* и др.) определенным образом вырезать пластинку, то при сжатии или растяжении такой пластинки на ее поверхности появляются электрические заряды: на одной стороне положительные, на другой – отрицательные. Говорят, что такой кристалл обладает *пьезоэлектрическими* (от греч. *Piezō* – жму) *свойствами*. Возникновение зарядов на поверхности кристаллической пластинки при давлении на нее называется *прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Прямой пьезоэлектрический эффект используется в приемниках ультразвуковых и звуковых колебаний. Существует также *обратный пьезоэлектрический эффект*, который заключается в том, что размеры пластинки изменяются под действием переменного электрического поля.

Для получения звука используют обратный пьезоэлектрический эффект. Если к пьезоэлектрической пластинке приложить с помощью металлических обкладок переменное электрическое напряжение, то пластинка начнет колебаться. Колебания пластинки становятся особенно интенсивными, если частота изменений электрического напряжения совпадает с частотой собственных механических колебаний пластинки. В результате резонанса амплитуда вынужденных колебаний пластинки достигает максимума и в ней устанавливаются продольные стоячие волны.

Собственная частота пластинки определяется формулой $\nu = v/2l$, где v – скорость распространения продольных упругих волн в материале пластинки (для кварца $v = 5600$ м/с).

Как видим, предел получения высоких частот основного тона пластинки ограничен ее толщиной l . Для повышения частоты ультразвуковых волн используются так называемые *гармоники*, которые соответствуют обертонам.

Нужно отметить, что пьезопластинки создают волны сравнительно небольшой интенсивности. Для получения ультразвука значительной интенсивности используют магнитострикционные излучатели. Магнитострикция заключается в том, что ферромагнитные вещества (железо, никель, некоторые сплавы) при действии на них магнитного поля слегка деформируются. Поместив ферромагнитный стержень в переменное магнитное поле (например, внутрь катушки, по которой протекает переменный ток), можно возбудить его механические колебания, которые будут особенно интенсивными при резонансе.

Скорость распространения волн в упругой среде не зависит от их частоты. Это в полной мере относится и к звуковым волнам.

Таким образом, звуковые волны разной длины и, значит, разной частоты распространяются в воздухе с одной и той же скоростью. Мы не могли бы получать удовольствие от музыки, если бы это было не так: сначала до нас доходили бы звуки одной частоты (одного тона), а затем другой.

Только для многоатомных газов и жидкостей была обнаружена дисперсия при ультразвуковых частотах.

Рассмотрим вопрос о скорости распространения звука в газе. Как было показано ранее, скорость распространения продольного импульса волн в упругом стержне определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Для деформируемого упругого стержня длиной l модуль Юнга

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\Delta l/l},$$

где σ – упругое напряжение в стержне; $\Delta l/l$ – относительное удлинение.

Для случая ограниченного объема газа напряжение σ должно быть заменено на дополнительное давление Δp , которое вызывает сжатие газа. Допуская, что

выделенный объем газа сжимается только вдоль своей длины при неизменном поперечном сечении, относительную линейную деформацию $\Delta l/l$ можно заменить относительной объемной деформацией $\Delta V/V$.

Таким образом, имеем

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta V/V}.$$

Считая изменение давления и объема бесконечно малыми, обозначим их dp и dV . Учтем также, что приращение объема и приращение давления всегда имеют разные знаки (увеличению давления соответствует уменьшение объема). В результате последнее соотношение примет вид:

$$E = -V \frac{dp}{dV}.$$

Величина dp/dV зависит от характера процесса сжатия (либо расширения) газа. Как известно, при сжатии воздуха увеличивается давление и, значит, растет упругость. Кроме этого воздух, как и любой газ, при сжатии нагревается, а при расширении охлаждается. Изменение температуры воздуха приводит к дополнительному изменению его упругости. При сжатии за счет увеличения температуры упругость возрастает, а при расширении – уменьшается.

Дополнительное изменение упругости воздуха при сжатии может возникнуть только в том случае, если сжатие происходит так, что выделившаяся тепловая энергия не успеет рассеяться. Если процесс расширения осуществлять достаточно быстро, то возникшая разность температур не успевает выровняться. Процесс, при котором не происходит теплообмена с окружающей средой, называется *адиабатическим*.

Первые расчеты скорости звука выполнил И. Ньютон в конце XVII ст. Он считал сжатия и разрежения в звуковой волне изотермическими (протекающими при постоянной температуре). Полученная Ньютоном скорость звука в воздухе (около 290 м/с) ниже реальной приблизительно на 20 % (342 м/с при $t = 20$ °C). Более точный расчет скорости звука получается в том случае, если процесс распространения звуковых волн рассматривать как адиабатический ($pV^\gamma = const$, где

$\gamma = c_p / c_v$ – отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме – *коэффициент Пуассона*).

Дифференцируя *уравнение адиабатического процесса*, получим:

$$V^\gamma dp + \gamma V^{\gamma-1} p dV = 0.$$

Откуда

$$\frac{dp}{dV} = -\gamma \frac{p}{V}.$$

Подставим это выражение в формулу для E

$$E = \gamma p.$$

После подстановки E в формулу для скорости продольного импульса получим

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}.$$

Подставив в формулу вместо p его выражение, полученное из *уравнения состояния идеального газа Клапейрона–Менделеева* ($pM = \rho RT$, где $\rho = m/V$ – плотность газа; M – молярная масса; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная), приходим к следующей формуле для скорости звука в газе:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}.$$

Отсюда следует, что скорость звука в газе зависит от температуры и величин γ и M . На первый взгляд может показаться, что скорость звука в газе зависит от давления. Однако это не так, потому что при изменении давления изменяется также и плотность. Экспериментально установлено, что в широком диапазоне изменения давлений скорость звука не зависит от давления. Только при очень высоких давлениях (~ 100 атм) скорость звука увеличивается.

Скорость звука в газах увеличивается с повышением температуры. При комнатных температурах (около 20°C) скорость звука в воздухе растет приблизительно на $0,6$ м/с на градус. В жидкостях скорость звука, как правило, умень-

шается с увеличением температуры. Исключением из этого правила является вода, в которой скорость звука увеличивается с повышением температуры и достигает максимума при 74 °С, а с дальнейшим повышением температуры – уменьшается. В упругих твердых телах кроме продольных волн могут распространяться поперечные и поверхностные звуковые волны. Скорость распространения этих волн значительно отличается от скорости распространения продольных волн.

Скорость звука в газах меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях меньше, чем в твердых телах.

Архитектурная акустика, акустика помещений – область акустики, которая изучает распространение звуковых волн в помещении, отражение и поглощение их поверхностями, влияние отраженных волн на слышимость речи и музыки. Целью исследований в этой области является проектирование помещений (концертных залов, аудиторий, радиостудий и т.п.) с хорошими условиями слышимости.

Акустическое качество помещений определяется в первую очередь *временем реверберации* и ее частотной характеристикой. В закрытых помещениях значительного объема слушатель воспринимает кроме прямого звука еще и ряд его запоздалых повторений, обусловленных отражением от стен, пола, потолка помещения и т.п. В результате поглощения звуковой энергии при каждом отражении эти повторения ослабляются тем сильнее, чем больше их задержка относительно прямого звука. После выключения источника звука количество отраженной энергии в помещении уменьшается до того времени, пока она не будет поглощена. Это постепенное затухание называется *реверберацией*. Ее можно рассматривать как затухание собственных колебаний замкнутого воздушного объема, возбужденных источником звука до его выключения.

Время реверберации – время, за которое интенсивность звука ослабляется в миллион раз по отношению к первоначальной интенсивности ($I/I_0 \sim 10^{-6}$). В акустических отношениях помещение имеет наилучшие качества, если время реверберации τ_p составляет 0,5–1,5 с. Если τ_p меньше, чем 3 с, помещение счита-

ется хорошим. Если же время реверберации превышает 5 с, то акустика такого помещения плохая. Она характеризуется «гулким звучанием».

При слишком медленном затухании (τ_p большое) звучание речи и музыки оказывается недостаточно выразительным, при короткой реверберации речь слышна отрывисто глухо, а музыкальные звуки утрачивают выразительность.

Оптимум реверберации достигается размещением в зале звукопоглощающих материалов и конструкций. В результате средний коэффициент поглощения увеличивается до нужных значений.

В залах большой вместительности условия слышимости могут быть улучшены с помощью электроакустических систем усиления и искусственной реверберации. Примером электроакустически оснащенного зала универсального назначения (для конгрессов, концертов, звукового кинопоказа и т.п.) может служить большой зал Дворца Республики в г. Минске.

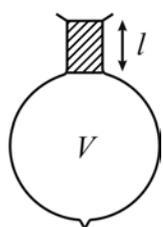
Большинство реальных колебательных систем излучает звуковые волны небольшой интенсивности. Поэтому для увеличения интенсивности звука обычно создают объемные колебательные системы, настроенные в резонанс с источником. Например, камертон в руке звучит очень слабо, но если его поставить на крышку открытого деревянного ящика, который настроен на частоту камертона, то звук становится достаточно сильным, чтобы слышать его на расстоянии нескольких метров. Нужно отметить, что продолжительность звучания при этом сокращается.

Для увеличения интенсивности звука струнные музыкальные инструменты имеют специальные деревянные корпуса – *резонаторы*. Эти резонаторы являются самой ответственной частью инструмента, которая характеризует качество его звучания.

Форма этих резонаторов разная для каждого инструмента и обусловлена требуемым набором собственных частот объемной колебательной системы. Акустические характеристики инструмента определяются его способностью резонировать на звуки всех частот, которые создают струны. Для струнных музыкальных инструментов высокого качества характерна их способность резонировать

не только на своей основной частоте, но и на частоте обертонов. В технологии производства резонаторов высокие требования предъявляют к сортам дерева, клеям, лакам, краскам и т.д.

Акустический резонанс широко используется при гармоническом анализе сложного звука, основанном на методе Фурье, который состоит в разложении реальных звуковых колебаний на гармонические составляющие. Анализ звука имеет в акустике большое значение.



Явление акустического резонанса позволяет опытным путем находить гармонические составляющие звуковых колебаний сложной формы. Для этой цели немецкий естествоиспытатель Герман Гельмгольц (1821–1894) впервые использовал сосуды шаровой формы с узким входным горлом (рис. 30.2), которые в дальнейшем получили

Рис. 30.2 название *резонаторов Гельмгольца*.

Поскольку диаметр горла резонатора мал, то при колебаниях скорость воздуха в нем значительно больше, чем в сосуде, поэтому роль колеблющейся массы выполняет главным образом масса воздуха в горле. Можно считать, что воздух в горле резонатора выполняет роль поршня или колеблющейся массы, а воздух в сосуде – роль пружины. Собственная частота колебаний резонатора Гельмгольца

$$\nu = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}},$$

где v – скорость звука; S – площадь входного отверстия горла; l – его длина; V – объем резонатора.

Изменяя размеры сосуда и горла, можно получить резонаторы с собственными частотами, охватывающими весь диапазон звуковых частот. Имея большое количество резонаторов, частоты которых лежат достаточно близко друг к другу, можно определить амплитуды разных гармоник составляющих сложного звука, т. е. сделать гармонический анализ звуков. Но этот способ анализа используется редко. Современные анализаторы спектра звука преобразуют звуковые колебания в электрические, а затем анализируют полученные электрические колебания.