

Лекция 30. Акустика

Содержание

1. Звуковые волны
2. Источники звука
3. Скорость звука
4. Архитектурная акустика
5. Акустический резонанс

Звуковые волны

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

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.

Источники звука

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.

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

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

Отсюда $\lambda = \frac{2l}{n + 1}$, 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.

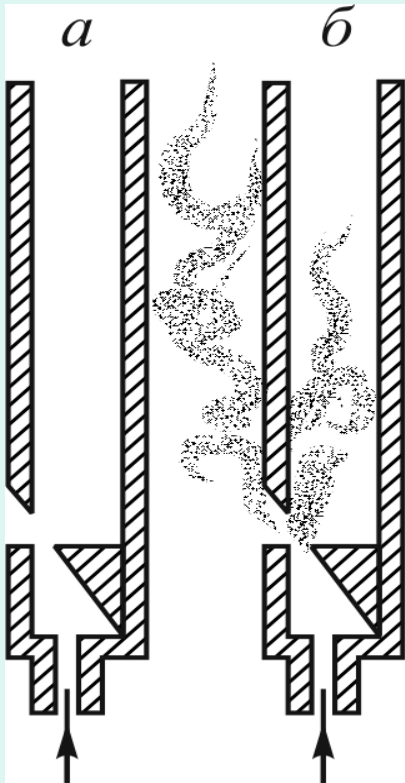
2. Источники звука, в которых колебательная система совершает автоколебания за счет пополнения энергии извне.

Это органные трубы, свистки, смычковые и духовые инструменты.

Фотографирование струи воздуха с взвешенными в нем частицами (рис. а). показало, что в щели органной трубы происходит сложный процесс периодического образования вихрей, схематически изображенный на рис. б.

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**.

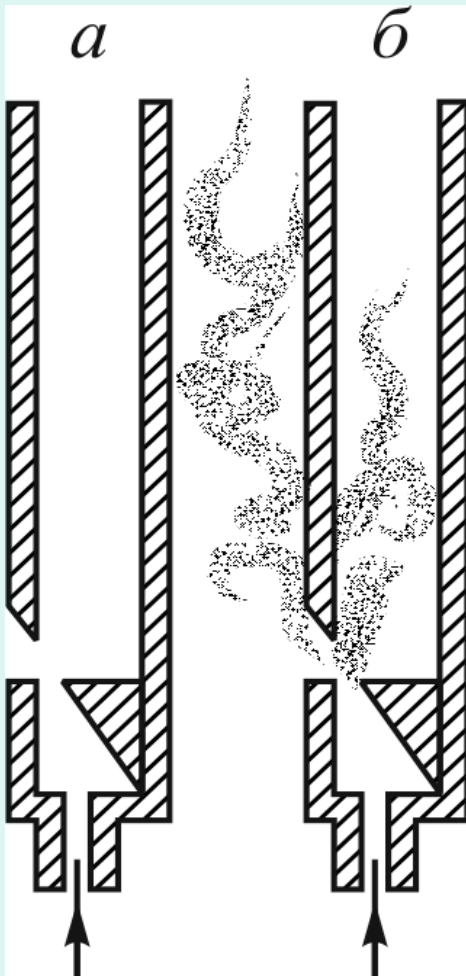
Довольно совершенный тип автоколебательной системы представляет собой **голосовой орган человека**.

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.

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**.

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.

Скорость звука

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.

Как было показано ранее, скорость распространения продольного импульса волн в упругом стержне определяется по формуле

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

Для деформируемого упругого стержня 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 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 изменения 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:

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

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 18 % (342 м/с при $t=20^{\circ}\text{C}$).

Дифференцируя уравнение **адиабатического** процесса $pV^{\gamma} = \text{const}$, 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 $v = \sqrt{\gamma p / \rho}$.

Подставив в эту формулу вместо ρ его выражение, полученное из уравнения состояния идеального газа Клапейрона—Менделеева $pM = \rho RT$, 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 T и величин γ и M .

Скорость звука в газах увеличивается с повышением температуры.

При комнатных температурах (около $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) скорость звука в воздухе растет приблизительно на $0,6\text{ м/с}$ на градус.

В жидкостях скорость звука, **как правило**, уменьшается с увеличением температуры.

Исключением является вода, в которой скорость звука **увеличивается** с повышением температуры и достигает максимума при $74\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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

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.

Акустическое качество помещений определяется в первую очередь **временем реверберации** и ее частотной характеристикой.

Время реверберации — время, за которое интенсивность звука ослабляется в миллион раз по отношению к первоначальной интенсивности ($I / I_0 \approx 10^{-6}$).

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 считается **хорошим**.

Если же время реверберации превышает 5 с, то акустика такого помещения **плохая**.

Она характеризуется «**гулким звучанием**».

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.

Акустический резонанс

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.

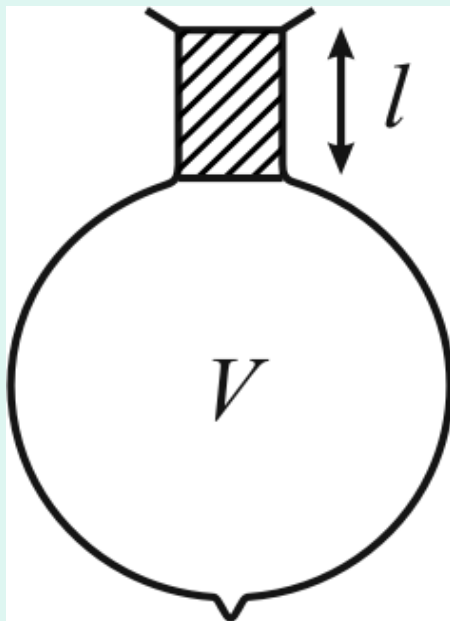
Нужно отметить, что продолжительность звучания при этом сокращается. Для **увеличения интенсивности** звука струнные музыкальные инструменты имеют специальные деревянные корпуса — **резонаторы**.

Эти резонаторы являются самой ответственной **частью инструмента**, которая характеризует **качество** его звучания.

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.



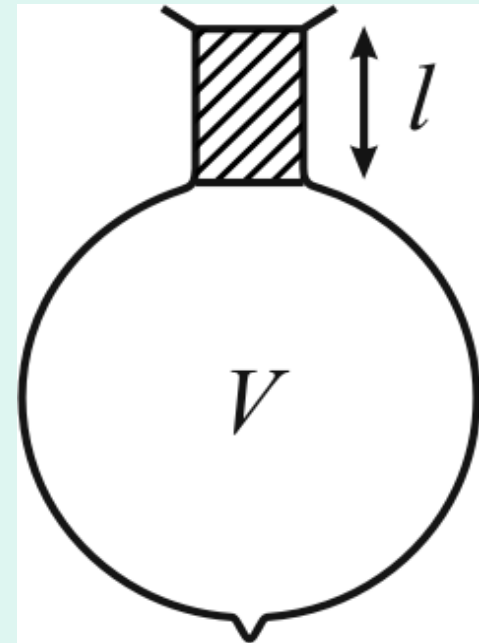
Для этой цели немецкий естествоиспытатель Гельмгольц (1821—1894) впервые использовал сосуды шаровой формы с узким входным горлом, которые в дальнейшем получили название резонаторов Гельмгольца.

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.