

# 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.

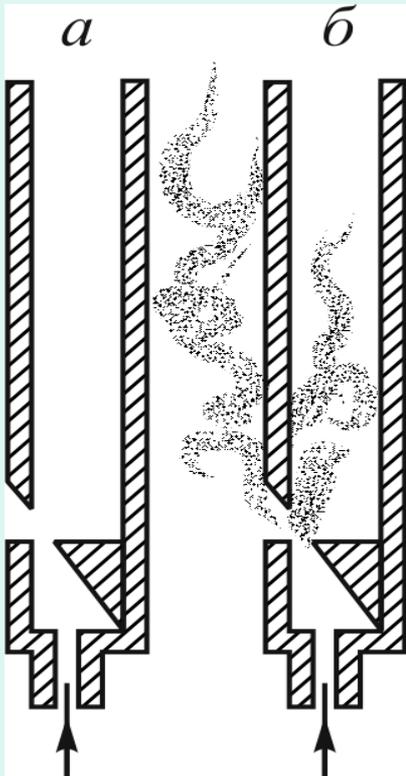
2. Источники звука, в которых колебательная система совершает автоколебания за счет пополнения энергии извне.

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**.

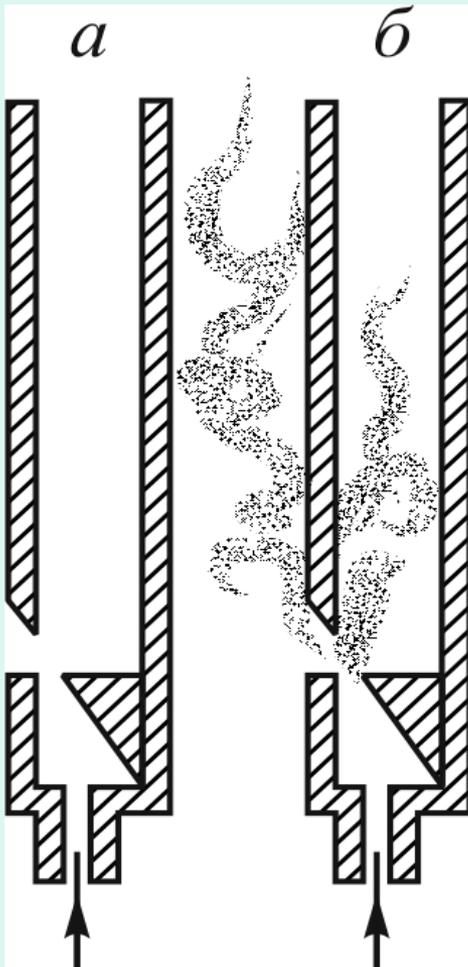
Довольно совершенный тип автоколебательной системы представляет собой **голосовой орган человека**.

**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  $\sigma$  — упругое напряжение в стержне;  $\Delta l/l$  — относительное удлинение.

Для случая ограниченного объема газа напряжение должно быть заменено на дополнительное давление  $\Delta p$ , 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  $\rho$  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  $\gamma$  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  $\tau_p$  составляет 0,5—1,5 с.

Если  $\tau_p$  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.

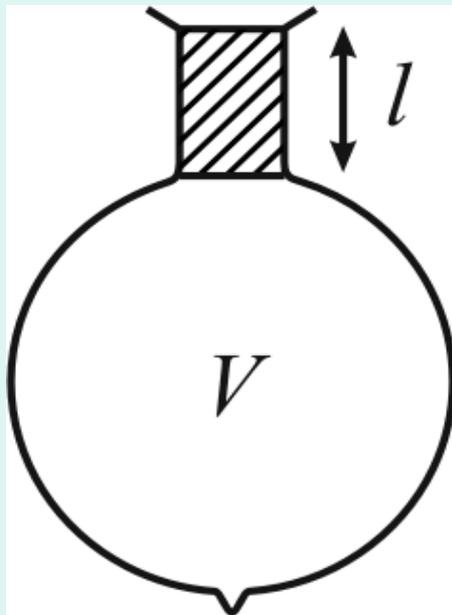
Нужно отметить, что продолжительность звучания при этом сокращается. Для **увеличения интенсивности** звука струнные музыкальные инструменты имеют специальные деревянные корпуса — **резонаторы**.

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.



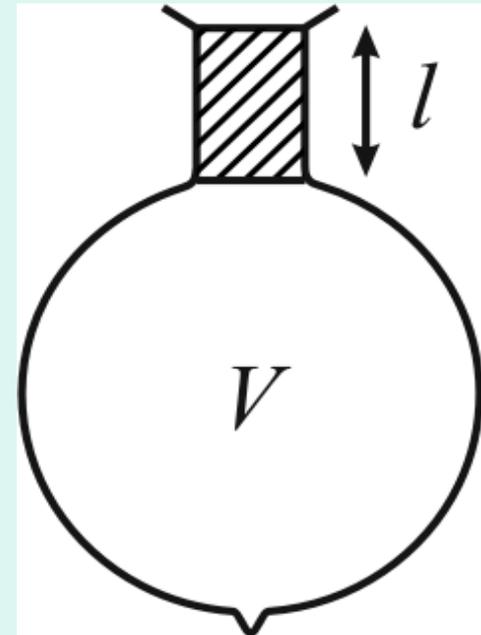
Для этой цели немецкий естествоиспытатель Гельмгольц (1821—1894) впервые использовал сосуды шаровой формы с узким входным горлом, которые в дальнейшем получили название резонаторов Гельмгольца.

## 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.