

# Стоячие волны

*Углы стоячей волны — неперемещающиеся точки волны, амплитуда колебаний которых равна нулю.*

Расстояние между соседними узлами стоячей волны одинаково и равно половине длины волны внешнего гармонического воздействия.

Для шнура, закрепленного с одного конца, расстояние между узлами стоячей волны не зависит от длины шнура.

**Моды колебаний.** Если закреплены оба конца шнура (или струны), отражение волны происходит от обоих концов. В этом случае расстояние между узлами образующейся в шнуре (струне) стоячей волны не может быть произвольным и зависит лишь от длины шнура (струны).

Для объяснения этого эффекта рассмотрим распространение по струне длиной  $l$  внешнего воздействия, производимого вблизи ее левого закрепленного конца. После отражения от правого конца струны волна, достигнув ее левого конца и отразившись от него, вновь оказывается у правого конца. Такая дважды отраженная волна, распространяющаяся со скоростью  $v$ , может усилить первоначальное воздействие, если достигнет правого конца через промежуток времени  $2l/v$ , кратный периоду внешнего воздействия:

$$2l/v = Tn \quad (n=1,2,3,\dots)$$

Следовательно, в струне будут поддерживаться только такие гармонические внешние воздействия длина волны ( $\lambda = VT$ ) которых связана с длиной струны соотношением

$$l/(\lambda/2) = n \quad (n=1,2,3,\dots).$$

# Стоячие волны

*На длине струны, закрепленной на концах укладывается целое число  $n$  полуволн поперечных стоячих волн.*

Только такие волны, называемые *модами собственных колебаний*, могут длительно поддерживаться в струне.

Волны других частот (длин волн) не усиливают первоначальное воздействие при отражении от концов струны и поэтому быстро затухают в результате потерь энергии на трение.

Частота собственных колебаний струны ( $\nu = 1/T = V/\lambda$ ), связана с ее длиной соотношением

$$\nu_n = (v/2l)n \quad (n=1,2,3,\dots).$$

***Мода колебаний, соответствующая  $n=1$  называется первой гармоникой собственных колебаний или основной модой.***

Для произвольного  $n > 1$  соответствующая мода колебаний называется  $n$ -й гармоникой или  $n$ -м обертоном.

Напомним, что собственные колебания могут происходить в различных средах.

Например, в закрытом цилиндре, наполненном газом, возникают моды собственных продольных колебаний газа под действием перемещения поршня.

На рисунке 254 приведены первая и вторая гармоники отклонений молекул газа от положений равновесия, а также показаны области с повышенной концентрацией молекул (повышенным давлением газа). Стрелками отмечено направление движения молекул газа в данный момент времени.

Рассмотренные нами собственные колебания струн характерны для струнных музыкальных инструментов, а колебания в ограниченном объеме газа — для духовых инструментов.

# Звуковые волны

## **Возникновение и восприятие звуковых волн**

Звуки, воспринимаемые человеческим ухом, являются одним из важнейших источников информации об окружающем мире. Шум моря и ветра, пение птиц, голоса людей и крики животных, раскаты грома, звуки движущихся машин, воспринимаемые человеческим ухом, позволяют легче адаптироваться в изменяющихся внешних условиях. Рассмотрим процесс возникновения и восприятия звуковых волн.

*Звуковые волны — упругие волны в среде, вызывающие у человека слуховые ощущения.*

Колебания источника звука (например, струны или голосовых связок) вызывают в воздухе волны сжатия и разрежения.

Достигнув человеческого уха, звуковые волны заставляют барабанную перепонку совершать им вынужденные колебания с частотой, равной частоте колебаний источника. Свыше 20 000 нитевидных рецепторных окончаний, находящихся во внутреннем ухе, преобразуют механические колебания в электрические импульсы. При передаче импульсов по нервным волокнам в головной мозг у человека возникают определенные слуховые ощущения. Слуховые ощущения у человека вызывают звуковые волны с частотой колебаний, лежащей в пределах от 16 Гц до 20 кГц.

Изучению звука посвящена специальная область физики - *акустика*.

# Звуковые волны

*Частота колебаний обратно пропорциональна размеру колеблющегося источника, поэтому инфразвуковые волны, имеющие малую частоту, вызываются источниками, размеры которых превышают расстояния, характерные для повседневного опыта человека. Такие волны возникают при землетрясении, извержении вулкана, грозном разряде, взрыве ядерной бомбы.*

Звуковые волны создаются источниками, имеющими размеры от нескольких миллиметров до десятков метров.

Миллиметровые источники могут генерировать ультразвуковые волны, которые (так же как и инфразвук) не вызывают слуховых ощущений у человека. Ультразвук способны излучать и улавливать некоторые животные, например летучие мыши и дельфины.

Анализ отраженных сигналов, полученных при ультразвуковой локации, помогает этим животным ориентироваться в пространстве в условиях слабой освещенности или отсутствия видимого света и находить пищу.

**Распространение звуковых волн.** Необходимое условие распространения звуковых волн - наличие материальной среды.

*В вакууме звуковые волны не распространяются, так как там нет частиц, передающих взаимодействие от источника колебаний.*

Поэтому на Луне из-за отсутствия атмосферы царит полная тишина. Даже падение метеорита на ее поверхность не слышно наблюдателю.

Скорость распространения звуковых волн определяется скоростью передачи взаимодействия между частицами.

В газе скорость звука  $v_r$  оказывается порядка (точнее - несколько меньше) тепловой скорости  $V$  кв молекул и поэтому увеличивается с ростом температуры газа. В воздухе при температуре 20 °C  $V_r = 343 \text{ м/с} = 1235 \text{ км/ч}$ .

# Высота, тембр, громкость звука.

Чем больше потенциальная энергия взаимодействия молекул вещества, тем больше скорость звука, поэтому скорость звука в твердом теле  $V_{\text{т}}$ , как правило, больше скорости звука в жидкости  $V_{\text{ж}}$ , которая, в свою очередь, превышает скорость звука в газе  $V_{\text{г}}$ :  
 $V_{\text{т}} > V_{\text{ж}} > V_{\text{г}}$ .

Например, в морской воде скорость звука  $V_{\text{ж}} = 1513$  м/с. В стали, где могут распространяться как поперечные, так и продольные волны, скорость их распространения различна. Поперечные волны распространяются со скоростью 3300 м/с а продольные со скоростью 6600 м/с.

Высота звука. Слуховые ощущения человека определяются физическими параметрами звуковой волны, воздействующей на орган слуха. Традиционными физиологическими характеристиками воспринимаемого звука являются *высота, тембр и громкость*. Выясним, какие физические величины определяют подобную классификацию звуков. *Высота звука определяется частотой источника звуковых колебаний. Чем больше частота колебаний, тем выше звук. Колебаниям малых частот соответствуют низкие звуки.*

Например, писк комара соответствует 500—600 Взмахам его крыльев в секунду, жужжание шмеля 220 взмахам.

Колебания голосовых связок певцов могут создавать звуки в диапазоне от 80 до 1400 Гц (хотя в эксперименте фиксировались

# Высота, тембр, громкость звука.

**рекордно низкая (44 Гц) и высокая (2350 Гц) частоты).**

В телефоне для воспроизведения человеческой речи используется область частот от 300 2000 Гц.

Тембр звука. Звучание одной и той же ноты исполнении различных музыкальных инструментов или голоса отличает тембр. Данной ноте соответствует определенный период колебаний. Форма колебаний (или зависимость давления воздуха создаваемого источником колебаний от времени) отличается для разных инструментов.

Это объясняется тем, что любое реальное колебание складывается из гармонических колебаний основной моды и обертонов.

Если колебание струны имеет форму, близкую к треугольной, то его можно представить как сумму трех гармонических колебаний с частотами  $\nu$ ,  $3\nu$ ,  $5\nu$ . Изменение относительной амплитуды колебаний основной моды и обертонов влияет на форму результирующего колебания и соответственно на его тембр.

***Тембр звука** определяется формой звуковых колебаний. Различие формы колебаний, имеют одинаковый период, связано с разной относительной амплитудой основной моды и обертонов.*

**Громкость звука.** Изменение давления в звуковой волне определяет *громкость звука.*

***Громкость звука** зависит от амплитуды колебаний давления в звуковой волне.*

Минимальное изменение давления, которое может фиксироваться человеческим ухом, определяет *порог слышимости.*

При частоте 1 кГц порог слышимости составляет  $10^{-5}$ Па, или  $10^{-10}$ атм. Подобное изменение давления означает, что человеческое ухо фиксирует амплитуду колебаний молекул порядка 1 нм.

# Высота, тембр, громкость звука

Максимальное изменение давления, которое еще в состоянии фиксировать человеческое ухо, определяет болевой порог. Болевой порог соответствует изменению давления  $10^{-4}$  атм, или 10 Па.

На практике громкость звука характеризуется уровнем интенсивности звука.

**Интенсивность звука** — отношение падающей на поверхность звуковой мощности к площади этой поверхности.

Единица интенсивности звука *ватт на квадратный метр* (Вт/м<sup>2</sup>).

Порог слышимости соответствует интенсивности звука  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>; болевой порог  $I_6 = 1$  Вт/м<sup>2</sup>.

Следовательно, болевой порог отличается по интенсивности звука от порога слышимости на 12 порядков. На столько же порядков отличается диаметр Земли от толщины человеческого волоса. Показатель степени и числа 10, характеризующий порядок величины, называется *десятичным логарифмом*:

$$k = \lg(10^k).$$

Уровень интенсивности звука — **десятичный логарифм отношения двух интенсивностей звука**:

$$k = \lg(I/I_0)$$

На практике в качестве уровня интенсивности звука принимается величина, в 10 раз большая:

$$\beta = 10 \lg(I/I_0)$$

Подобно тому как 5 м соответствуют 50 дм, за единицу уровня интенсивности звука принят 1 дБ. В таблице 24 приведен уровень интенсивности различных звуков. Увеличение интенсивности звука на 10 дБ примерно удваивает громкость.

Уровень интенсивности 120 дБ является болевым порогом

# Основные положения

**Волновой процесс** — процесс переноса энергии без переноса вещества.

**Механическая волна** — возмущение, распространяющееся в упругой среде.

Наличие упругой среды — необходимое условие распространения механических волн. Перенос энергии и импульса в среде происходит в результате взаимодействия между соседними частицами среды.

Волны бывают продольные и поперечные.

**Продольная механическая волна** - волна, в которой движение частиц среды происходит в направлении распространения волны.

**Поперечная механическая волна** — волна, в которой частицы среды перемещаются перпендикулярно направлению распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в любой среде. Поперечные волны в газах и жидкостях не возникают, так как в них отсутствуют фиксированные положения частиц.

Периодическое внешнее воздействие вызывает периодические волны.

**Гармоническая волна** - волна, порождаемая гармоническими колебаниями частиц среды.

**Длина волны** - расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний ее источника:

$$\lambda = vt$$

[ $v$ -скорость распространения волны].

**Скорость механической волны** - скорость распространения возмущения в среде. **Поляризация** - упорядоченность направлений колебаний частиц в среде.

**Плоскость поляризации** — плоскость, в которой колеблются частицы среды в волне. **Линейно-поляризованная механическая волна** — волна, частицы которой колеблются вдоль определенного направления (линии).



# Основные положения

**Поляризатор** — устройство, выделяющее волну определенной поляризации.

**Стоячая волна** — волна, образующаяся в результате наложения двух гармонических волн, распространяющихся навстречу друг другу и имеющих одинаковый период, амплитуду и поляризацию.

**Пучности стоячей волны** — положение точек, имеющих максимальную амплитуду колебаний.

**Узлы стоячей волны** — неперемещающиеся точки волны, амплитуда колебаний которых равна нулю. На длине  $l$  струны, закрепленной на концах, укладывается целое число  $n$  полуволн поперечных стоячих волн:

$$l/(\lambda/2) = n(n=1,2,3,\dots).$$

Такие волны называются *модами колебаний*. Мода колебаний для произвольного целого числа  $n > 1$  называется  $n$ -й гармоникой или  $n$ -м обертоном. Мода колебаний для  $n = 1$  называется *первой гармоникой* или *основной модой колебаний*. **Звуковые волны** — упругие волны в среде, вызывающие у человека слуховые ощущения. Частота колебаний, соответствующих звуковым волнам, лежит в пределах от 16 Гц до 20 кГц. Скорость распространения звуковых волн определяется скоростью передачи взаимодействия между частицами. Скорость звука в твердом теле  $V_{\text{т}}$ , как правило, больше скорости звука в жидкости  $V_{\text{ж}}$ , которая, в свою очередь, превышает скорость звука в газе  $V_{\text{г}}$ :

$$V_{\text{т}} > V_{\text{ж}} > V_{\text{г}}.$$

Звуковые сигналы классифицируют по высоте, тембру и громкости.

**Высота звука** определяется частотой источника звуковых колебаний. Чем больше частота колебаний, тем выше звук; колебаниям малых частот соответствуют низкие звуки.

**Тембр звука** определяется формой звуковых колебаний. Различив формы колебаний, имеющих одинаковый период, связано с разными относительными амплитудами основной моды и обертоном.

**Громкость звука** характеризуется уровнем интенсивности звука.

**Интенсивность звука** — энергия звуковых волн, падающая на площадь  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$ .

Единица интенсивности звука — *ватт на квадратный метр* ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

**Уровень интенсивности**

$$\beta = 10 \lg(I/I_0)$$

где  $I$  — интенсивность звука,  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт}/\text{м}^2$  интенсивность, соответствующая порогу слышимости.

**Порог слышимости** характеризуется минимальной интенсивностью звука, которая может фиксироваться человеческим ухом.

Единица уровня интенсивности — *децибел* (дБ).