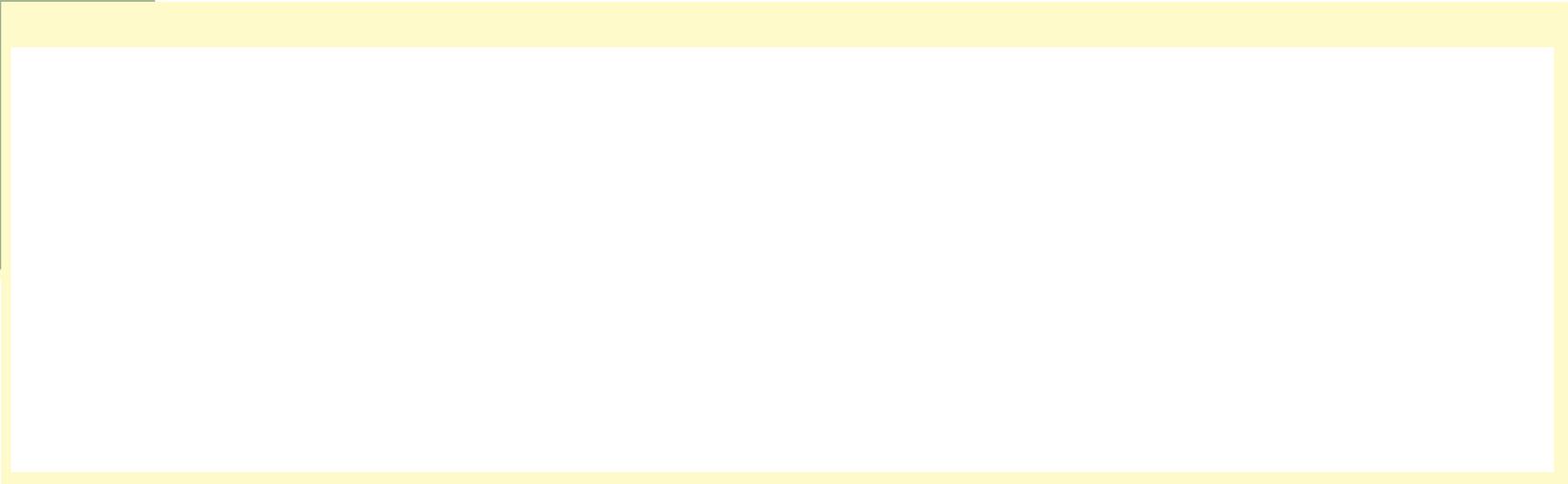




Звук



Звук

- Определение
- Шкала звуковых частот
- Виды звуков
- Диапазон частот
- Источники
- Приемники
- Скорость звука в разных средах
- Сравнение звуковых и электромагнитных волн
- Характеристики звука
- Свойства звука

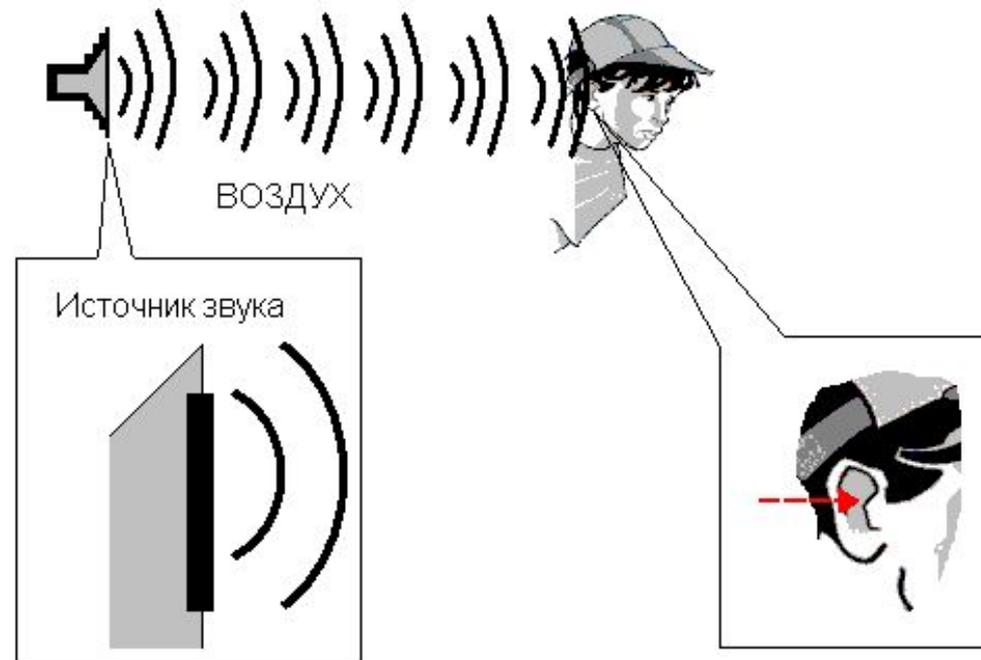


Звук - это воспринимаемые органами слуха колебания частиц среды.

- Колеблущаяся поверхность **источника** звука вызывает изменения давления (плотности) **окружающего воздуха**, распространяющиеся во все стороны в виде чередующихся областей повышенного и пониженного давления, называемых звуковыми волнами.
- Достигнув **уха**, звуковые волны вызывают механические колебания барабанной перепонки, которые затем преобразуются в электрические сигналы нервной системы и передаются в **головной мозг**, интерпретирующий их как звуки.

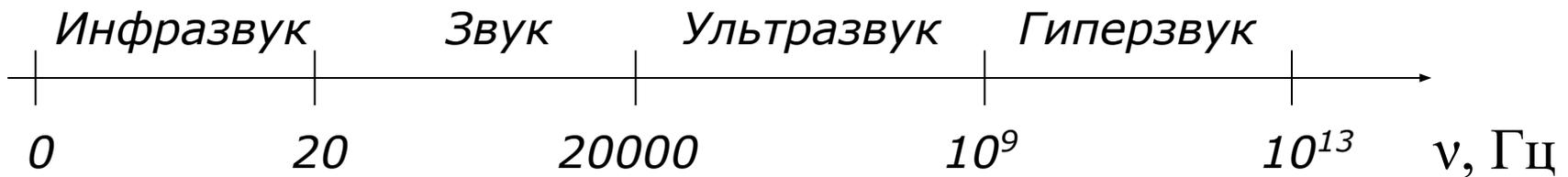
Для возникновения звукового ощущения необходимы:

- Источник звука
- Среда для распространения звука
- Приёмник звука



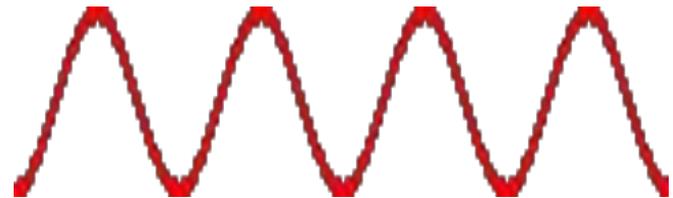
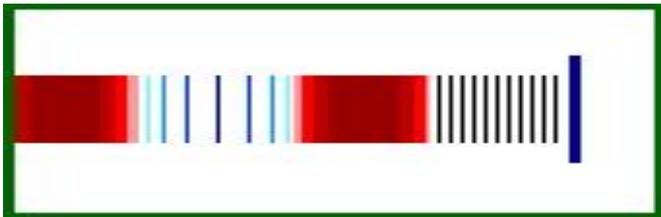
Звуковая шкала

- Инфразвук
 - Звук
 - Ультразвук
 - Гиперзвук
- 0,001 – 20 Гц
 - 20 – 20 000 Гц
 - 20 000 – 10^9 Гц
 - 10^9 – 10^{13} Гц



Виды звуковых волн

- *Продольная волна (в твердых, жидких и газообразных средах):*
- *Поперечная волна (только в твердых средах):*



Виды звуков

- Чистый звук, тон (гармоническое колебание с одной частотой)
- Сложный звук, звучание (колебание, разлагаемое на основной тон и обертоны)
- Воющий тон – звук, частота которого периодически изменяется около среднего значения
- Шум (набор частот, непрерывно заполняющих некоторый интервал)

Диапазон воспринимаемых частот (Гц)

■ Человек	■ 20 – 20000
■ Птицы	■ 20 – 20000
■ Собака	■ 200 – 160000
■ Кошка	■ 240 – 180000
■ Летучая мышь	■ 2000 – 180000
■ Бабочка	■ 10000 – 180000
■ Дельфин	■ 60 – 200000

Диапазоны частот слышимых звуков для людей разного возраста

Дети	20 лет	35 лет	50 лет
16 – 22000 Гц	16 – 20000 Гц	25 – 15000 Гц	30 – 12000 Гц

Частота, соответствующая разным нотам первой октавы

Тон	до	ре	ми	фа	соль	ля	си	до
Частота, Гц	264	297	330	352	396	440	495	528
Диезы	277	311		370	415	460		

Музыкальная запись первой октавы в нотном и гитарном вариантах. Ноты: ми, фа, соль, ля, си, до, ре, ми, фа, соль, ля, си, до, ре, ми. Фигурные скобки обозначают малую, первую, вторую и третью октавы. Цифры 1-6 над нотами указывают на пальцы. Цифры под струнами (Т, А, В) указывают на fret-позиции.



Источники звука

Источники звука – тела или системы тел, движения которых относительно окружающей среды периодически или импульсивно (резко) нарушают её равновесное состояние.

Классификации источников звука

- По способу возбуждения звуковой волны:
 - Колебательные системы (струны, пластины)
 - Автоколебательные системы (музыкальные инструменты, голосовой аппарат человека, электрический звонок, сигналы на транспорте)
 - Источники звукового вращения (винты самолета, корабля, вертолета)
 - Источники вихревого звука (свист растяжки, звук провода, обдуваемого ветром, свист хлыста)
 - Электроакустический.

Классификации источников звука

- По происхождению (естественные и искусственные)
- По закону колебаний (периодические, импульсивные, гармонические, негармонические)



Приемники звуковых волн

Искусственные:

Микрофон

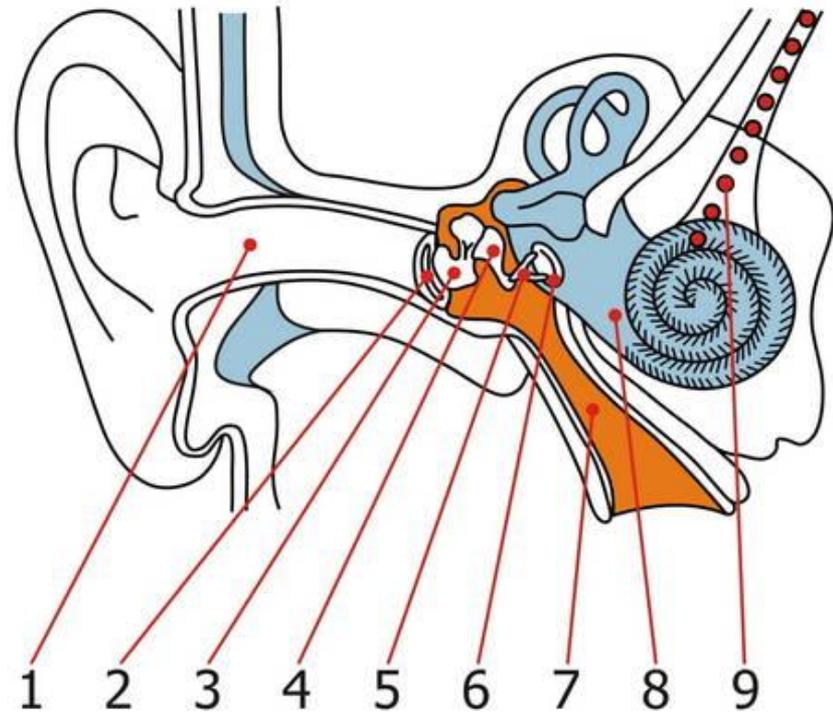
Естественные:

Ухо

Обладает высокой чувствительностью ($\Delta p = 10^{-6}$ Па) и избирательностью (например, дирижер улавливает звуки отдельных инструментов оркестра).

Строение человеческого уха

1. Слуховой канал
2. Барабанная перепонка
3. Молот
4. Наковальня
5. Стремечко
6. Овальное окно
7. Евстахиева труба
8. Улитка
9. Слуховой нерв



Скорость звука в твёрдых телах

Вещество	$v \parallel$, м/с	$v \perp$, м/с
Алюминий	6400	3130
Вольфрам	5174	2842
Кварц	5980	3760
Латунь	4280–4700	2020–2110
Серебро	3700	1694
Стекло	5260–6120	3050–3550
Сталь	5740	3092

Скорость звука в жидкостях

Вещество	t, °C	v, м/с
Азот	-199,0	962
Ацетон	25	1170
Бензол	25	1295
Вода	25	1497
Глицерин	26	1930
Керосин	25	1315
Ртуть	20	1451
Спирт этиловый	20	1177

Скорость звука в газах (при 0 °С)

Вещество	v, м/с
Азот	333,64
Аммиак	415,0
Водород	1286,0
Воздух	331,46
Гелий	970
Кислород	314,84
Метан	430
Пары воды (100 °С)	405
Углекислый газ	260,3

Сравнение ЗВУКОВЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

- **Механические**
- **Для распространения нуждаются в среде**
- $U_{\text{в воздухе}} \approx 340 \text{ м/с}$
- **Поперечные или продольные**
- **Воспринимаются непосредственно органом слуха**
- **Электромагнитные**
- **Могут распространяться и в вакууме**
- $U_{\text{в воздухе}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
- **Поперечные**
- **Для восприятия необходимо преобразовать в звук, ток, цвет и т.д.**

Физические характеристики звука

Объективные

- Звуковое давление
- Интенсивность
(сила звука)
- Амплитуда
- Частота
- Длина волны
- Период
- Скорость

Субъективные

- Громкость
- Высота
- Тембр
- Длительность

Звуковое давление – это давление, оказываемое звуковой волной на стоящее перед ней препятствие

$$p = \frac{F}{S} \qquad [p] = 1\text{Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

Звуковое давление – это избыточное давление, связанное с волной, оно намного меньше статического давления газа.

В противном случае возникает другое явление — ударная волна.



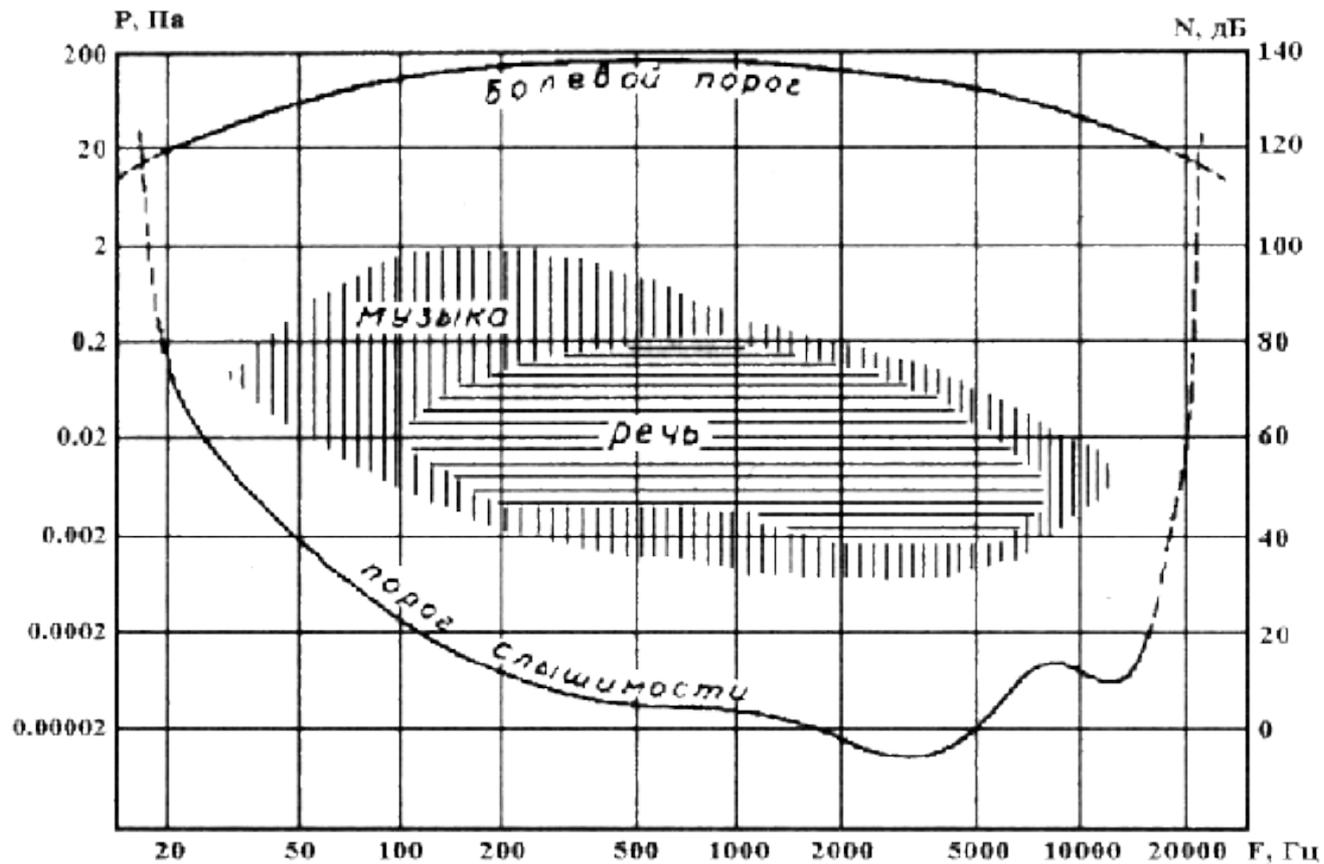
Человеческое ухо способно воспринимать волны, в которых звуковое давление изменяется в десять миллионов раз!

- **Порог слышимости** соответствует значению p_0 порядка $10^{-10} p_{\text{атм.}}$, то есть 10^{-5} Па. При таком слабом звуке молекулы воздуха колеблются в звуковой волне с амплитудой всего лишь 10^{-7} см!
- «Если бы порог слышимости был порядка 10^{-6} Па, мы слышали бы броуновское движение. Природа защитила нас от непрерывных звуковых перегрузок, вызываемых «толкотней» молекул воздуха с пылинками. Вот когда бы мы всем миром боролись за чистоту воздуха».

Т.В. Романова

- **Болевой порог** соответствует значению p_0 порядка $10^{-3} p_{\text{атм.}}$ или 100 Па.

Порог слышимости, болевой порог и частота звука



Интенсивность звука, воспринимаемая человеком

Минимальная

■ 10^{-12} Вт/м²

Максимальная
(вызывает болевые
ощущения)

■ ≈ 100 Вт/м²

Отличие на 14 порядков!

Интенсивность и уровень интенсивности звука

Формула

$$I = \frac{W}{S \cdot t}$$

Смысл

какая энергия, переносится звуковой волной через единицу площади поверхности за единицу времени

$$k = \lg \frac{I}{I_0}$$

если интенсивность I изменяется на порядок (в 10 раз), то уровень интенсивности при этом изменяется на единицу.

Единица измерения

$$[I] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$[k] = \lg \frac{I}{I_0} = 1 \text{бел} = 1 \text{Б}$$

если $I = 10I_0$

На практике неудобно пользоваться, так как большой разброс значений (10^{14} !)

На практике удобно, так как шкала значений сужается

Сравнение шкал

	p , атм	p , Па	I , Вт/м ²	k , Б	k , дБ
Минимальное (порог слышимости)	10^{-10}	10^{-5}	10^{-12}	0	0
Максимальное (болевой порог для частоты 1000 Гц)	10^{-3}	100	10^2	14	140
Разброс	10^7	10^7	10^{14}	14	140

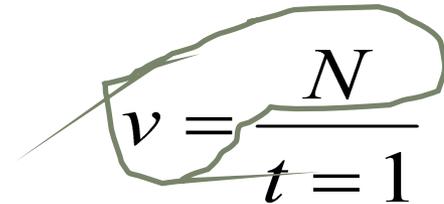
Уровни интенсивности звука

- 10 дБ шелест листвы на дереве;
- 20 дБ шорох падающей листвы;
- 30 дБ предельно допустимый уровень шума в квартире ночью (холодильник);
- 50 дБ негромкий разговор;
- 70 дБ пишущая машинка на расстоянии 1 м;
- 80 дБ шум работающего двигателя;
- 90 дБ тяжёлый грузовик на расстоянии 5 м;
- 100 дБ отбойный молоток;
- 110 дБ дискотека;
- 120 дБ работающий трактор на расстоянии 1 м
- 140 дБ болевой порог.

Частота звука

- Частота – это физическая величина численно равная отношению числа полных колебаний ко времени, за которое эти колебания были совершены

- Частота показывает сколько колебаний совершается за единицу времени



A hand-drawn equation $v = \frac{N}{t} = 1$ is shown, with a green scribble around it and a line pointing to the left.

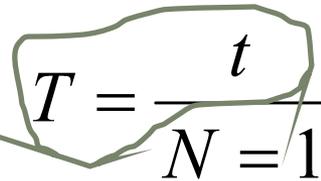
$$v = \frac{N}{t}$$

$$[v] = 1 \frac{1}{c} = 1 \text{ герц} = 1 \text{ Гц}$$

Период звуковых колебаний

Период колебаний – это физическая величина численно равная отношению времени полных колебаний к их числу.

$$T = \frac{t}{N}$$


$$T = \frac{t}{N=1}$$

Период показывает за какое время совершается одно колебание.

$$[T] = 1\text{с}$$

Скорость звука – скорость распространения звуковых волн в среде.

$$v = \lambda \nu$$

v – скорость звука

λ – длина волны

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

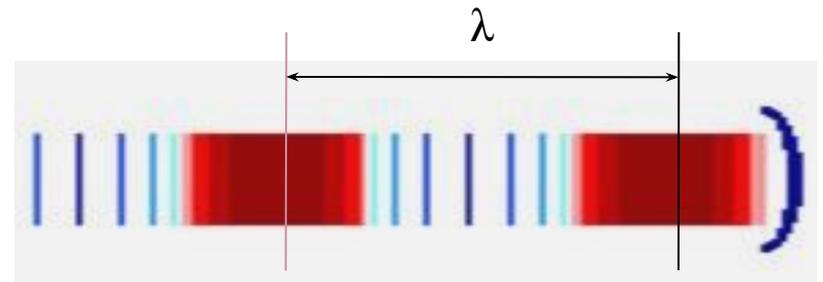
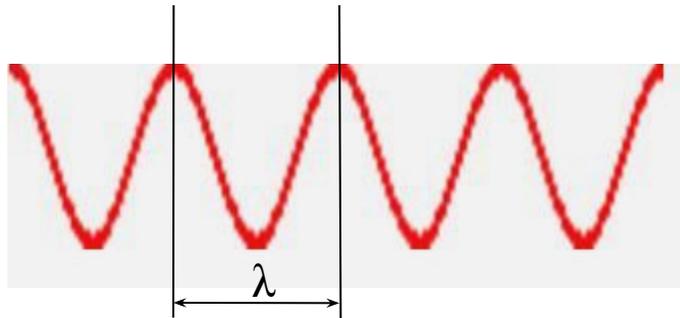
ν – частота звука

T – период звуковых колебаний

Длина волны – это расстояние между точками волны, колеблющимися одинаково (с разностью фаз в 2π).

λ – длина волны

$$[\lambda] = 1\text{м}$$



Диапазон длин звуковых волн в различных средах

Среда	Длина волны
Воздух	17 м – 0,017 м
Вода	75 м – 0,075 м
Стекло	215 м – 0,215 м
Алюминий	320 м – 0,32 м

Громкость – это субъективное ощущение силы звука, возникающее у слушателя под воздействием звуковых колебаний.

Громкость в основном зависит от амплитуды колебательных движений источника звука: чем больше амплитуда, тем громче звук, и наоборот.

Тихий



Малая амплитуда

Громкий

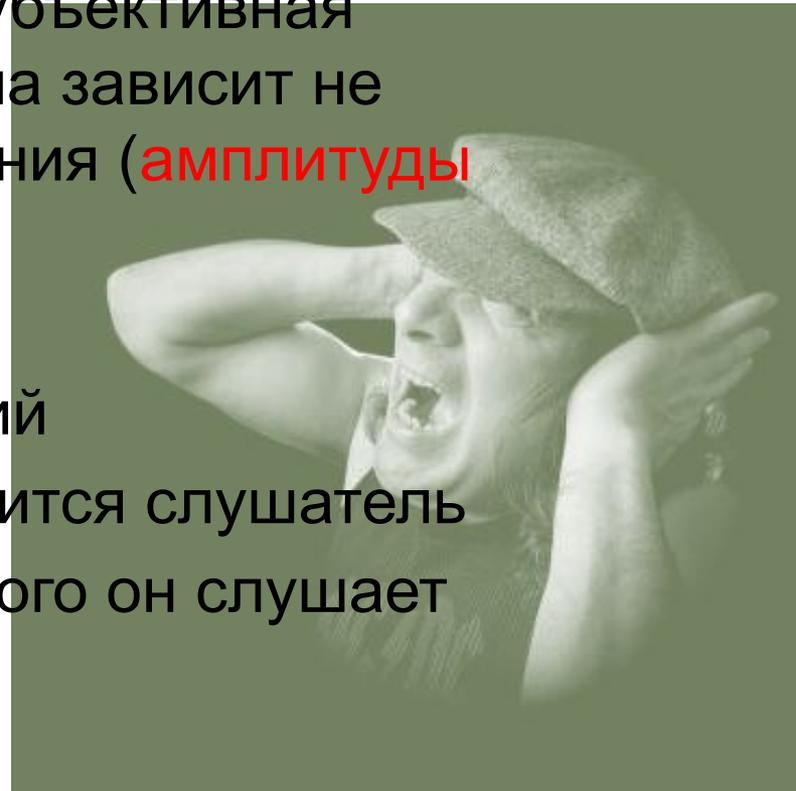


Большая амплитуда



Громкость звука

- Громкость – это именно субъективная характеристика, так как она зависит не только от звукового давления (**амплитуды колебаний**), но и от
 - частотного состава звука
 - формы звуковых колебаний
 - условий, в которых находится слушатель
 - времени, в течение которого он слушает звук.



Громкость звука и уровень громкости звука

Громкость

- Абсолютная величина
- Единица измерения – сон
- 1 сон — это громкость непрерывного чистого синусоидального тона частотой 1 кГц, создающего звуковое давление 2 мПа.

Уровень громкости

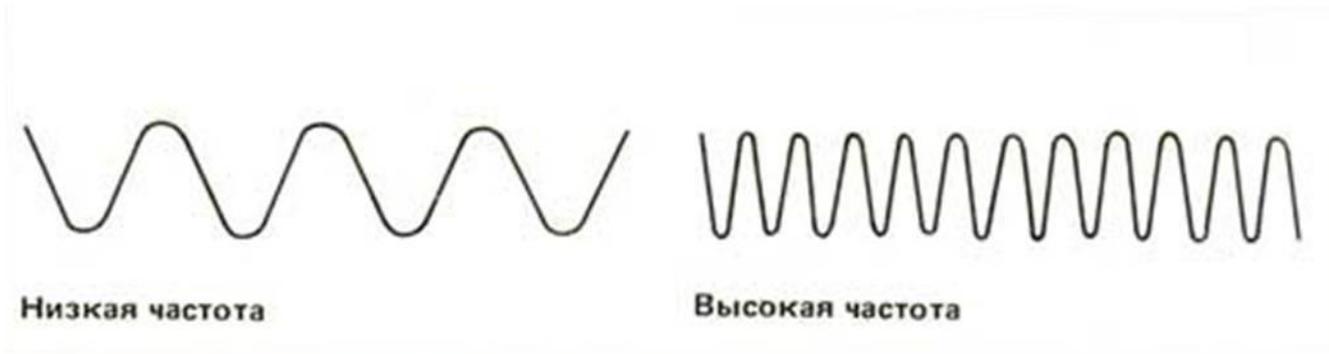
- Относительная величина
- Единица измерения – фон
- 1 фон численно равен уровню звукового давления (в децибелах — дБ), создаваемого чистым (синусоидальным) тоном частотой 1 кГц такой же громкости, как и измеряемый звук (равногромким данному звуку)

Высота тона

Высота в основном зависит от частоты колебаний: чем больше частота, тем выше звук.

Низкий

Высокий

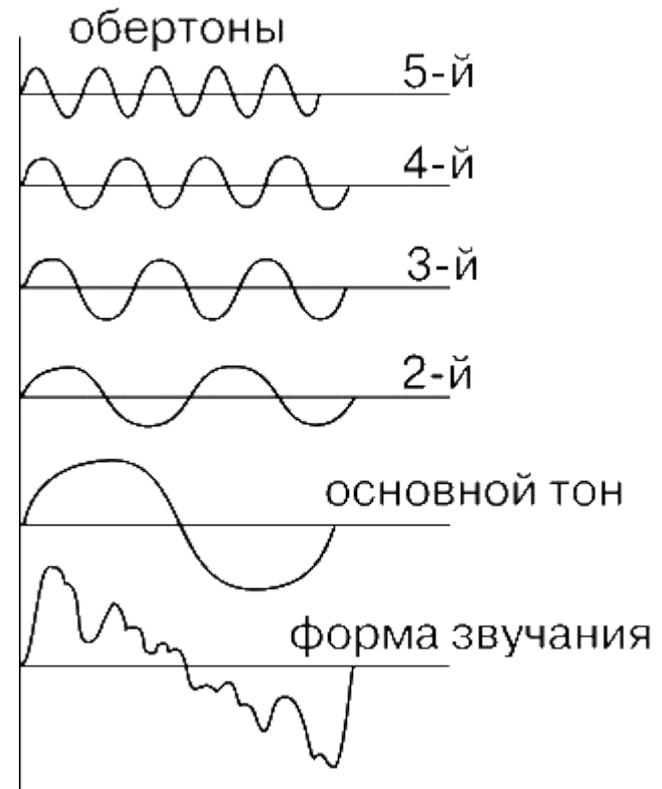


Высота звука

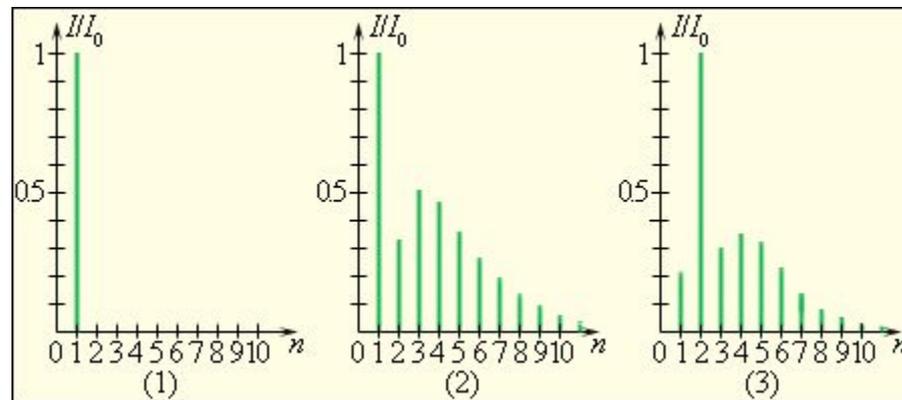
- Высота звука – это именно субъективная характеристика, так как она зависит не только от **частоты основного тона**, но и от
 - интенсивности звука
 - общей формы звуковой волны
 - ее сложности (форма периода)
- Высота звука может определяться слуховой системой для сложных сигналов, но только в том случае, если основной тон сигнала является *периодическим* (в звуке хлопка или выстрела тон не является периодическим, и слух не способен оценить его высоту)
- Высота звука измеряется в мелах.
 - Один мел равен ощущаемой высоте звука частотой 1000 Гц при уровне 40 дБ (иногда для оценки высоты тона используется другая единица, барк = 100 мел).

Тембр

- Тембр звука зависит от наличия в нем "частичных" тонов (обертонов, гармоник), а также от их соотношения по громкости и присутствию или отсутствию в спектре звучания основного тона. Самая низкочастотная синусоидальная составляющая сложного звука, (обычно наиболее громкая) называется основной составляющей (основным тоном).

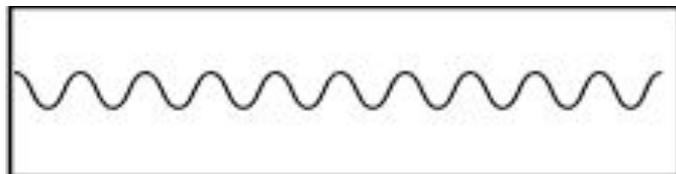


Одна и та же высота, но различные тембры

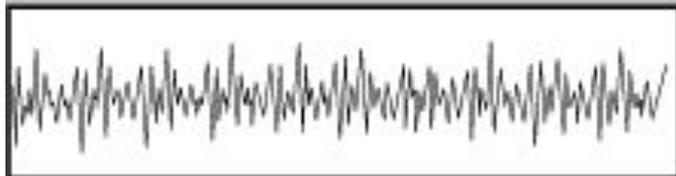


Относительные интенсивности гармоник в спектре звуковых волн, испускаемых камертоном (1), пианино (2) и низким женским голосом (альт) (3), звучащими на ноте «ля» контроктавы ($\nu = 220$ Гц). По оси ординат отложены относительные интенсивности.

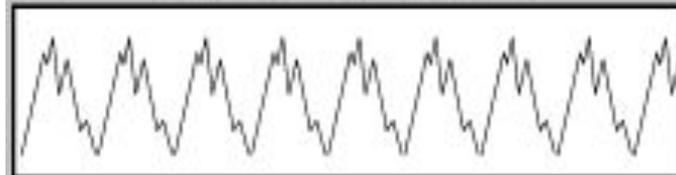
Одна и та же высота, но различные тембры



Камертон



Скрипка, открытая струна «ля»

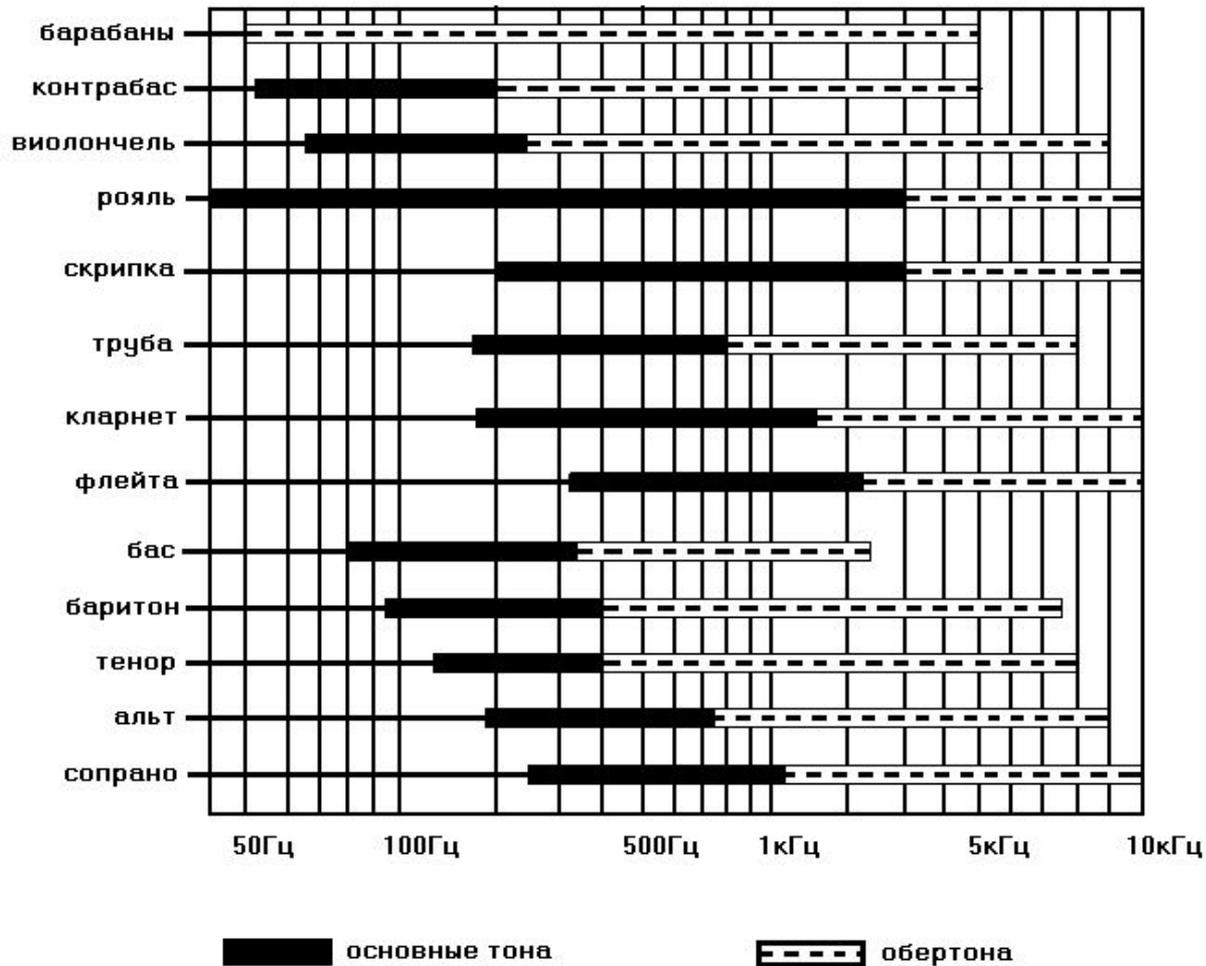


Фортепиано



Флейта

Тона и обертона



Тембр

В самых общих чертах известно следующее:

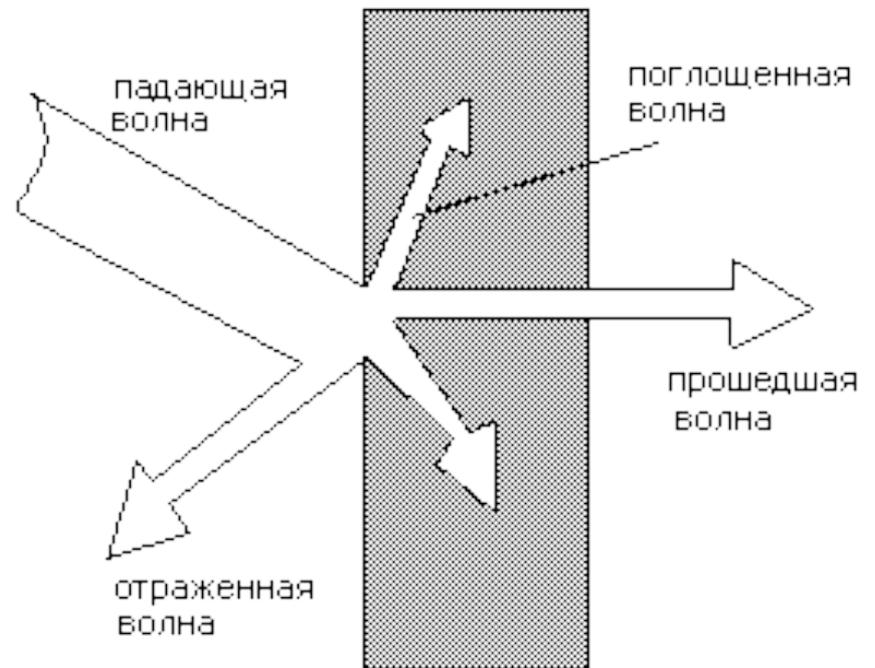
- а) звук, лишенный обертонов, звучит неокрашено, глухо, пусто; это особенно заметно у звуков с небольшими частотами;**
- б) звук, у которого сильно выражены несколько первых обертонов, характеризуется как сочный, полный;**
- в) звук, у которого сильно выражены высокие обертоны, попадающие в область частот 3000-6000 Гц, характеризуется как пронзительный металлический, резкий, яркий; при недостатке этих составляющих он расценивается как тусклый.**

Свойства звука

- Отражение
- Преломление
- Поглощение
- Дифракция
- Интерференция

Взаимодействие звуковой волны с преградой

- Отражение
(размер преграды больше длины волны)
- Огибание
(дифракция)
(размер преграды сравним или меньше длины волны)
- Преломление
- Поглощение



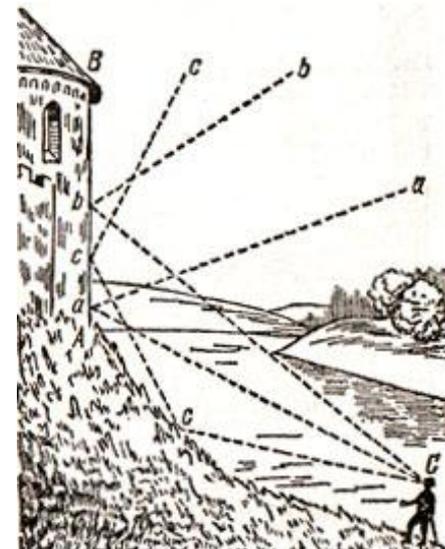
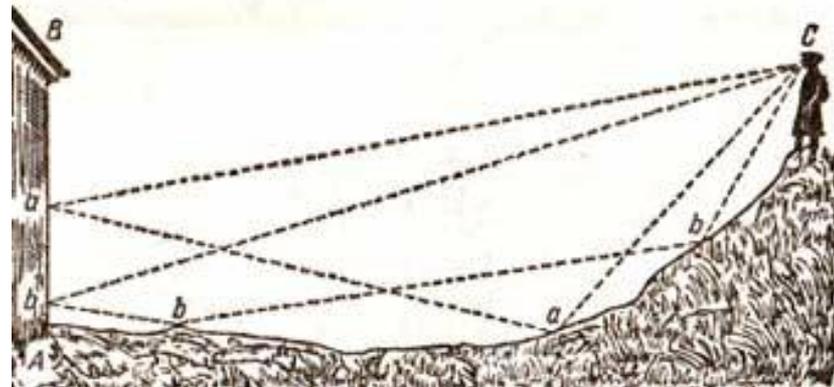
Опыт по отражению звука



- Звук отражается от любой поверхности,
- Вогнутая поверхность сосредотачивает звук.
- Поставьте на стол глубокую тарелку на дно положите источник тихого звука (тикающие часы или таймер)
- Другую тарелку держите около уха так, как показано на фотографии.
- Если положение часов, уха и тарелок найдено верно, то вы услышите тиканье часов, словно оно исходит от той тарелки, которую вы держите около уха.

Отражение звука

- Если местность между источником звука и отражающим препятствием имеет углубление, то это способствует возникновению эха, если же наоборот - выпуклой, то эха не будет.



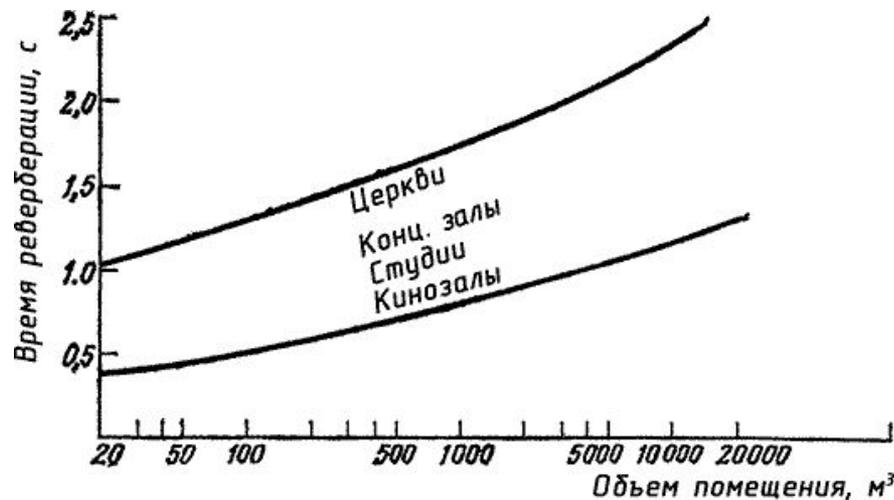
Пример отражения звуковых волн от твердых поверхностей - ЭХО.

- Наиболее отчетливое эхо возникает от резкого отрывистого звука, человеческий голос менее пригоден для этого, особенно мужской, высокие женские и детские голоса дают более отчетливое эхо.

Известные эхо:

- в замке Вудсток в Англии эхо отчетливо повторяет 17 слогов,
- развалины замка Деренбург возле Гальберштадта давали 27-сложное эхо, до тех пор, пока одна из стен не была взорвана.
- Скалы, раскинутые кругом возле Адерсбаха в Чехословакии, повторяют в определенном месте трехкратно 7 слогов, но в нескольких шагах от этой точки даже выстрел не производит никакого эха.

Реверберация – (от латинского reverberatus, «повторный удар») — это процесс продолжения звучания после окончания звукового импульса или колебания благодаря многократным отражениям звуковых волн от разных поверхностей



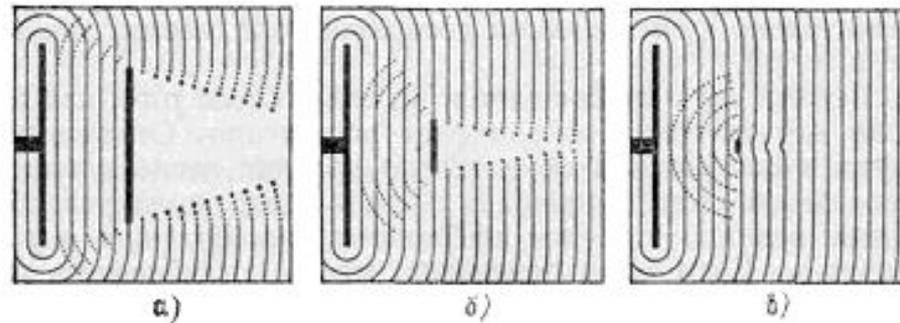
- Наблюдается в закрытых помещениях, пещерах, узких ущельях, иногда на стадионах, городских площадях
- Воспринимается слитно, если промежутки между отраженными сигналами менее 100 мс.
- При увеличении интервала между приходящими звуками свыше 100 мс субъективное восприятие человека отмечает уже отдельное эхо.
- Проявляется в более сочном гулком объемном звучании, обычно более приятном для восприятия, чем исходный «сухой» звук.

Дифракция звука

- Образование тени в случае световых волн — часто наблюдаемое и привычное явление. Иначе обстоит дело со звуковыми волнами. От них очень трудно заслониться. Мы слышим звук из-за угла дома или стоя за забором, за деревом и т. п. Почему эти препятствия не отбрасывают «звуковой тени»?

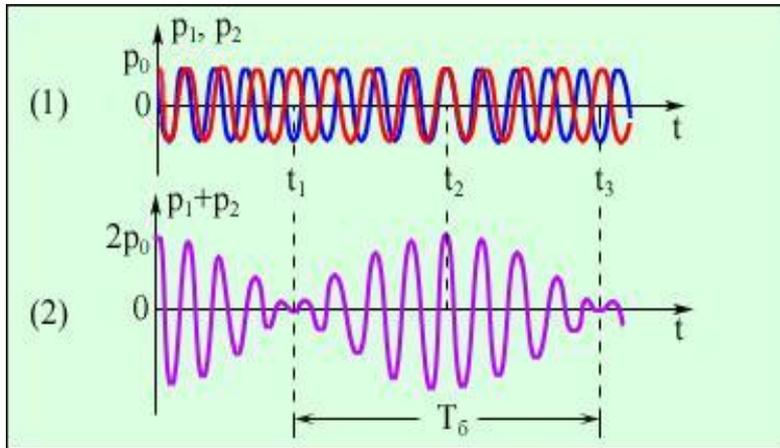
Длина звуковой волны в воздухе при частоте 1000 Гц равна 33,7 см, а при частоте 100 Гц она составляет уже 3,37 м. Таким образом, размеры обычно окружающих нас предметов (за исключением больших домов) отнюдь не велики по сравнению с длиной звуковой волны.

$$v = \lambda \nu$$



Позади малого препятствия тени нет

Интерференция гармонических волн разных частот – биения



- Когда две частоты мало различаются, возникают так называемые биения.
- Биения — это изменения амплитуды звука, происходящие с частотой, равной разности исходных частот.

- Даже если частота биений очень мала, человеческое ухо способно уловить периодическое нарастание и убывание громкости звука. Поэтому биения являются весьма чувствительным методом настройки в звуковом диапазоне.
- Если настройка не точна, то разность частот можно определить на слух, подсчитав число биений за одну секунду.
- В музыке на слух воспринимаются и биения высших гармонических составляющих, что применяется при настройке фортепиано.

Интерференция звуковых волн – наложение двух или большего числа волн

- Стоячие волны – результат наложения двух волн одинаковой амплитуды, фазы и частоты, распространяющихся в противоположных направлениях.
- Амплитуда в пучностях стоячей волны равна удвоенной амплитуде каждой из волн.
- Поскольку интенсивность волны пропорциональна квадрату ее амплитуды, это означает, что интенсивность в пучностях в 4 раза больше интенсивности каждой из волн или же в 2 раза больше суммарной интенсивности двух волн.
- Здесь нет нарушения закона сохранения энергии, поскольку в узлах интенсивность равна нулю.

Происхождение слов

- Ультразвук (от лат. ультра – сверх)
- Инфразвук (от лат. инфра – под)
- Гиперзвук (от греч. гипер – над)
- Акустика (от греческого akustikos – слуховой, слышимый)

Источники инфразвука

Естественные источники:

- Землетрясения
- Бури
- Ураганы
- Цунами

Техногенные источники:

- Станки
- Вентиляторы
- Котельные
- Транспорт
- Подводные и подземные взрывы
- Ветряные электростанции

Частоты колебаний, опасные для живых организмов

Частота, Гц

- 0,02
- 0,6
- 1-3 (дельта-ритм мозга)
- 5-7 (тета -ритм мозга)
- 8-12 (альфа-ритм мозга)
- 5-17 (бета-ритм мозга)
- 40-70
- 1000-12000

Отрицательный эффект

- Увеличение времени ответной реакции
- Стойкое психическое торможение
- Стресс
- Стресс, умственное утомление
- Эмоциональное возбуждение
- Ухудшение процессов обмена, беспокойство
- Снижение слуха

Инфразвук

Действия инфразвука

- Головные боли
- Осязаемое движение барабанных перепонки
- Вибрации внутренних органов
- Появление чувства страха
- Нарушение функции вестибулярного аппарата

Борьба с инфразвуком:

- Повышение быстроходности машин
- Повышение жесткости конструкций
- Устранение низкочастотных вибраций
- Установка глушителей

Инфразвук (от лат. *infra* — ниже, под) — упругие волны, аналогичные звуковым, но с частотами ниже области слышимых человеком частот.

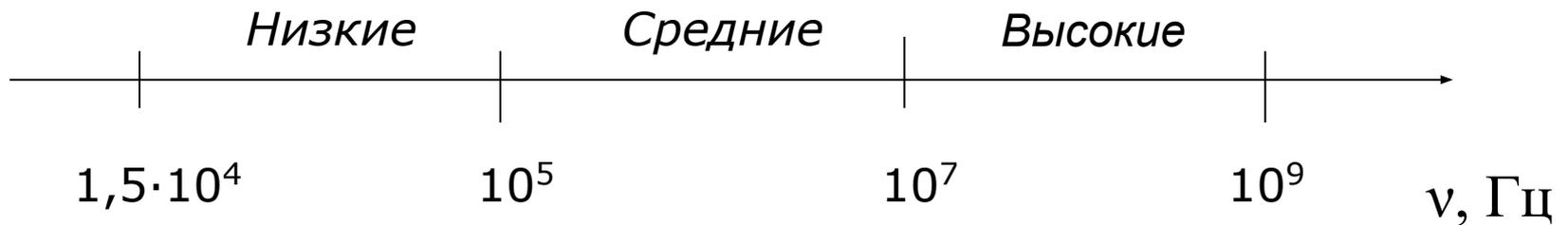
- За верхнюю границу инфразвуковой области принимают минимально воспринимаемую человеческим ухом частоту ,16 Гц.
- Нижняя граница инфразвукового диапазона условно определена в 0.001 Гц.

Ультразвук

- Ультразвук — звуковые колебания с частотами от 20 кГц до 1 ГГц, обладающие значительно более короткими длинами волн, которые легче фокусировать и, соответственно, получать более узкое направление изучения, т. е. сосредотачивать всю энергию в нужном направлении и концентрироваться в небольшом объеме.
- Ультразвук распространяется на значительные расстояния в твёрдых телах и жидкостях.
- Переносит энергию значительно большую, чем звуковая волна.

Область ультразвуковых частот

- Низкие ($1,5 \cdot 10^4 - 10^5$ Гц) ;
- Средние ($10^5 - 10^7$ Гц) ;
- Высокие ($10^7 - 10^9$ Гц).



Защита от ультразвука

- Изготовление оборудования, излучающего ультразвук, в звукоизолирующем исполнении
- Устройство экранов (сталь, дюралюминий, оргстекло)
- Размещение ультразвуковых установок в специальных помещениях
- Применение индивидуальных защитных средств.

Гиперзвук

- Гиперзвук — упругие волны с частотами 10^9 — 10^{13} Гц. По физической природе гиперзвук не отличается от ультразвука (частота $\gg 2 \cdot 10^4$ — 10^9 Гц).
- Гиперзвук характеризуется частотами, соответствующими частотам электромагнитных колебаний дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов (это сверхвысокие частоты СВЧ) .
- Частота гиперзвуковой волны : 10^9 — 10^{13} Гц.
- Тепловые колебания атомов вещества — естественный гиперзвук, искусственно гиперзвук генерируют с помощью специальных излучателей.
- В кристаллах гиперзвук распространяется до частот 10^{12} — 10^{13} Гц. В воздухе при нормальных условиях гиперзвук не распространяется вследствие сильного поглощения.

Летучая мышь

(материал взят с сайта <http://ru.wikipedia.org/wiki/Ультразвук>)

- Летучие мыши, использующие при ночном ориентировании эхолокацию, испускают при этом ртом или имеющим форму параболического зеркала носовым отверстием сигналы чрезвычайно высокой интенсивности.
- На расстоянии 1 — 5 см от головы животного давление ультразвука достигает 60 мбар, то есть соответствует в слышимой нами частотной области давлению звука, создаваемого отбойным молотком.
- Эхо своих сигналов летучие мыши способны воспринимать при давлении всего 0,001 мбар, то есть в 10000 раз меньше, чем у испускаемых сигналов.
- При этом летучие мыши могут обходить при полете препятствия даже в том случае, когда на эхолокационные сигналы накладываются ультразвуковые помехи с давлением 20 мбар. Механизм этой высокой помехоустойчивости еще неизвестен

Летучая мышь

- При локации летучими мышами предметов, решающую роль играют сдвиг во времени и разница в интенсивности между испускаемым и отраженным сигналами.
- Мыши могут ориентироваться и с помощью только одного уха (моноурально), что существенно облегчается крупными непрерывно движущимися ушными раковинами.
- Они способны компенсировать даже частотный сдвиг между испускаемыми и отражёнными сигналами, обусловленный эффектом Доплера (при приближении к предмету эхо является более высокочастотным, чем посылаемый сигнал).
- Понижая во время полёта эхолокационную частоту таким образом, чтобы частота отражённого ультразвука оставалась в области максимальной чувствительности их «слуховых» центров, они могут определить скорость собственного перемещения.

Летучая мышь

- Если летучая мышь издаёт сигналы, то **начинает каждый сигнал с частотой 90 кГц, и заканчивает с частотой 45 кГц**
- (сигнал длится около 2 мс, изменение частоты – очень быстрое).



Дельфины могут воспринимать как звук, так и инфразвук такой частоты, которые сами не в состоянии воспроизвести.

- Наиболее распространённый звук – от 7 до 18 кГц;
- «Лай» – от 100 до 10 кГц.



Ночная бабочка

У ночных бабочек из семейства медведиц развился генератор ультразвуковых помех, «сбивающий со следа» летучих мышей, преследующих этих насекомых.



Шум

Ущерб здоровью

- Глухота
- Психические расстройства
- Повышение артериального давления
- Уменьшение способности сосредотачиваться
- Раздражение
- Усталость или истощение
- Боли в желудке
- Бессонница
- Головокружение

Методы борьбы

- Уменьшение шума в источнике его возникновения (точность изготовления узлов, замена стальных шестерен пластмассовыми и т.д.).
- Звукопоглощение (применение материалов из минерального войлока, стекловаты, поролона и т.д.).
- Звукоизоляция. Звукоизолирующие конструкции изготавливаются из плотного материала (металл, дерево, пластмасса).
- Установка глушителей шума.
- Рациональное размещение цехов и оборудования, имеющих интенсивные источники шума.
- Зеленые насаждения (уменьшают шум на 10 – 15 дБ).
- Индивидуальные средства защиты (вкладыши, наушники, шлемы).