

Лекция 31. Объективные и субъективные характеристики звука

Содержание

1. Распространение звуковых волн
2. Характеристики звука
3. Отражение и поглощение звуковых волн
4. Ультразвук и его применение
5. Инфразвук

Распространение звуковых волн

Изменение температуры воздуха и скорости ветра с высотой делают **атмосферу неоднородной** средой с переменной скоростью распространения звука.

Это приводит к искривлению (**рефракции**) звуковых лучей.

Поскольку скорость распространения звука зависит от температуры, в разных слоях атмосферы, температура слоев которых различна, **звук** будет иметь **разную скорость**.

В среде с переменным показателем преломления звуковые волны будут распространяться по **кривым линиям**.

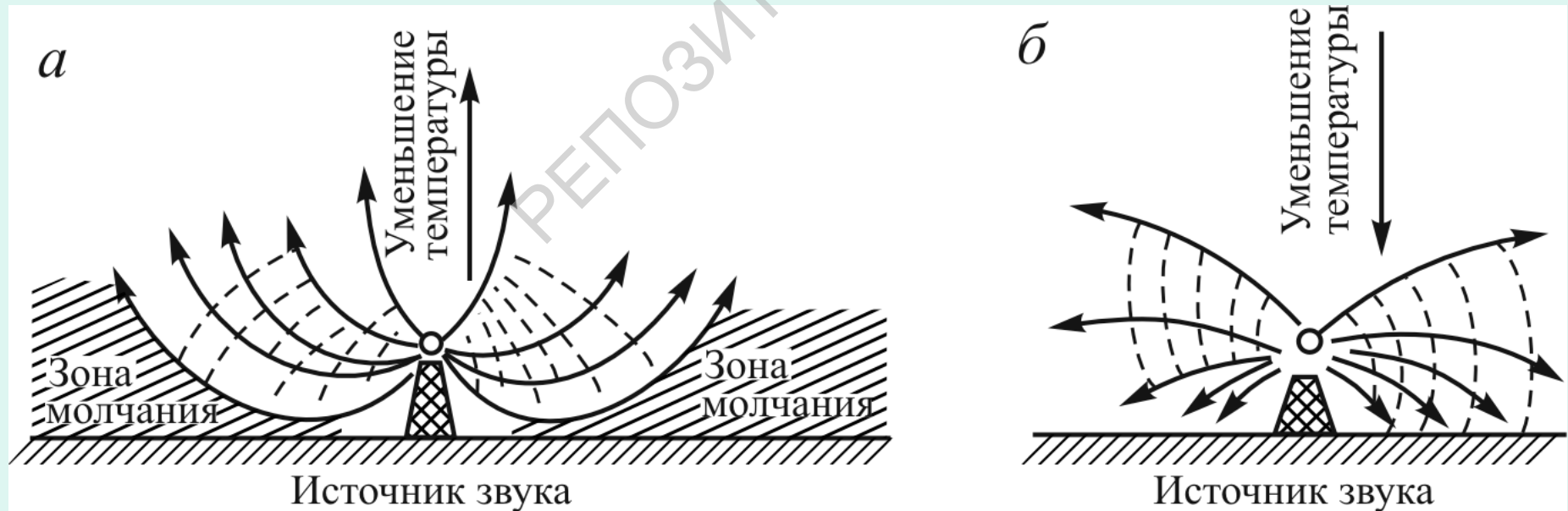
При этом, как показывают многочисленные опыты, **луч** **загибается** всегда так, что расстояние от точки к точке волна проходит за самое короткое время.

Данное положение носит название принципа Ферма.

Если температура понижается с высотой, что обычно бывает днем, то звуковые лучи при этом загибаются **вверх** (рис. *а*).

В результате на некотором небольшом расстоянии от источника звук перестает быть слышимым.

Если же с высотой температура увеличивается (температурная инверсия), звуковые лучи загибаются **вниз** (рис. *б*) и звук доходит до более отдаленных точек земной поверхности.



Этим объясняется тот часто наблюдаемый факт, что **ночью** звук слышен на **бóльшем** расстоянии, чем **днем**.

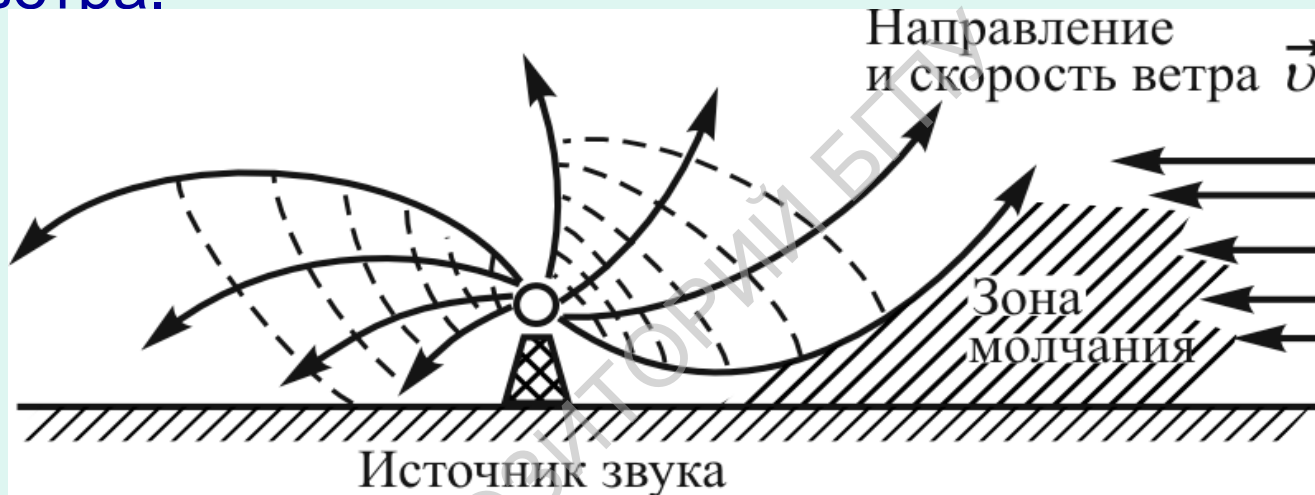
При **большой температурной инверсии** звуковые лучи, испытав значительное преломление, возвращаются к поверхности земли, **отражаются** от нее и снова поднимаются вверх.

Таких отражений может быть несколько, звуковая энергия в этом случае концентрируется в некотором слое, который играет роль **звукового канала**.



При наличии ветра его скорость и скорость звуковой волны складываются.

Разный характер загибания звуковых лучей в этом случае объясняет тот факт, что по ветру звук слышен дальше, чем против ветра.



Многие источники звука (взрыв, шум двигателя, ветер и т. п.) излучают волны **низких частот**: инфразвуковые и близкие к ним.

Такие низкочастотные звуки **поглощаются слабо** и в результате могут распространяться на сравнительно большие расстояния.

Это можно объяснить следующим образом.

Рассмотрим звуковую волну, которая возникла в результате **взрыва**.

Идущие вдоль поверхности земли звуки **сильно поглощаются** и рассеиваются благодаря неровностям земной поверхности, а также неоднородностям температуры и скорости ветра.

Поэтому звук даже от мощного взрыва можно слышать на расстояниях, не превышающих 20—30 км.

Однако этот звук становится **снова слышимым** на еще бóльших расстояниях.

Объясняется это тем, что на высоте 50—70 км располагаются **слои** атмосферного **озона** с температурой 50—70 °С.

Звук, который идет под некоторым углом к земной поверхности, **достигнув этого слоя**, описывает дугу и снова **возвращается** на землю.

Поэтому после зоны молчания на расстоянии около 150—200 км и более можно снова услышать звук взрыва.

Зон слышимости может быть несколько, поскольку звуковые волны, которые пришли сверху, могут **множественно отражаться** от земной поверхности, подниматься вверх и снова возвращаться к ней.

При ядерных взрывах возникают ударные волны огромной силы, которые в результате затухания на некотором расстоянии переходят в мощные инфразвуковые волны, распространяющиеся на большие расстояния.

Эти волны можно зарегистрировать инфразвуковыми приемниками.

Таким образом, может быть обнаружен ядерный взрыв, совершенный в воздухе или воде на большом расстоянии от места наблюдения.

Существенная особенность подводных звуков — их малое затухание, в результате чего под водой они могут распространяться на гораздо большие расстояния, чем в воздухе.

Так, в области слышимых звуков дальность распространения под водой звуков средней интенсивности достигает 15—20 км, а в области ультразвука — 3—5 км.

Характеристики звука

Первый подход описания физических параметров звука основан на исследовании так называемых **объективных** (не зависящих от восприятия звука человеком) **характеристик** при помощи физических приборов.

Объективные характеристики — это частота и интенсивность звука.

Второй подход базируется на восприятии звука слуховым аппаратом человека — ухом (**субъективные характеристики**).

Количество энергии, которая переносится за одну секунду через площадку в один квадратный метр, размещенную перпендикулярно направлению распространения волны, называют интенсивностью звука или силой звука

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 \nu \quad .$$

Интенсивность звука связана с давлением звукового излучения (звуковым давлением).

Давление звукового излучения представляет среднее по времени избыточное давление на препятствие, помещенное в звуковое поле.

Это давление определяется импульсом, который передается волной в единицу времени на единицу площади препятствия.

Соотношение $p_0 = \rho v A \omega$ называют амплитудой звукового давления.

Произведение $\rho v = R_a$ называется акустическим сопротивлением среды.

Измеряется R_a в акустических омах и зависит только от свойств среды.

Выражению для амплитуды звукового давления можно придать вид

$$p_0 = R_a A \omega \quad .$$

В результате выражение для **интенсивности звука** имеет вид:

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{R_a} .$$

Интенсивность звука в СИ измеряется в Вт/м².

Другая объективная характеристика звуковой волны — **частота** — определяет спектральный состав звука.

Линейчатые спектры имеют периодические колебания, **сплошные** — колебания, которые не имеют периода.

К первым относятся **музыкальные звуки**, ко вторым — разного рода **шумы**.

По **субъективному** восприятию звуки отличаются высотой, тембром и громкостью.

Высота звука определяется частотой колебаний: чем больше частота колебаний, тем выше звук.

Слуховой аппарат человека наиболее чувствителен к звукам средней частоты (около 1 кГц).

Однако **чистые звуковые тона**, которым соответствуют монохроматические звуковые волны, можно возбудить только в специальных условиях.

Реальные звуки представляют собой суперпозицию упругих волн разной частоты.

Субъективная оценка спектрального состава звука определяет его **тембр**, или окраску.

Тембр зависит от набора частот и отношений амплитуд составляющих колебаний.

Один и тот же музыкальный тон, взятый на разных инструментах, будет иметь одинаковую основную частоту, **но разный тембр**.

Громкость является **субъективной** оценкой интенсивности звука.

Для того чтобы вызвать звуковое ощущение, волна должна обладать некоторой минимальной интенсивностью, которая называется **порогом слышимости**.

Порог слышимости для разных людей несколько разный и зависит от частоты звука.

Самый **низкий порог** слышимости по интенсивности равен примерно 10^{-16} Вт/см², а по звуковому давлению $\approx 10^{-5}$ Па в пределах 1—5 кГц.

Максимальная интенсивность, превышение которой вызывает в ухе болевые ощущения, называется **порогом болевого ощущения**.

Максимальное его значение составляет приблизительно 10^{-4} Вт/см².

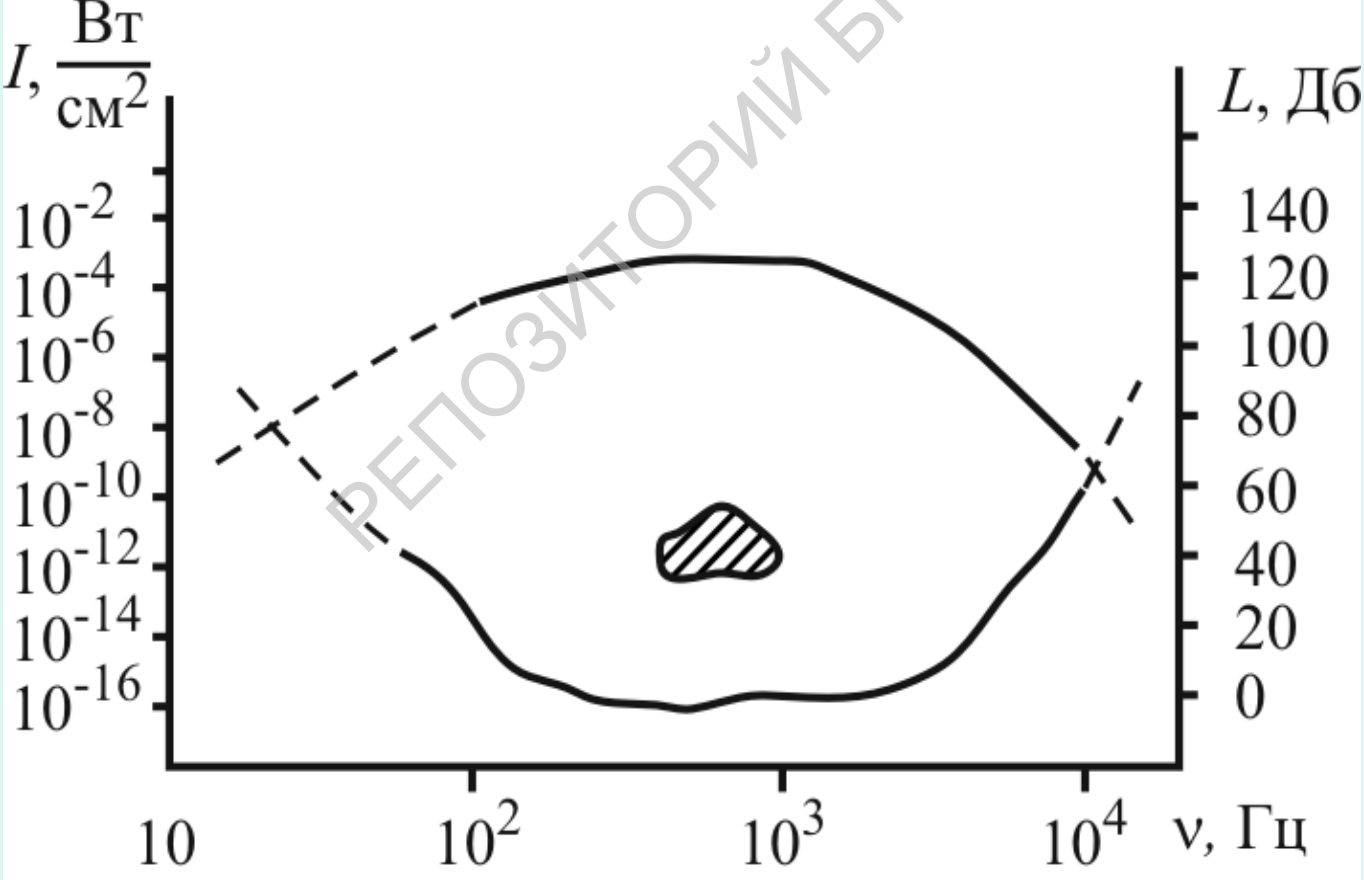
Порог болевого ощущения меньше зависит от частоты.

Совокупность точек, соответствующих порогу слышимости, и точек, соответствующих порогу болевого ощущения, создает **на диаграмме** две кривые $I = f(\nu)$, которые ограничивают область, называемую **областью слышимости**.

Разговорная речь использует только небольшую ее часть (на рис. эта область заштрихована).

Из диаграммы видно, что интенсивности звуков, воспринимаемые человеческим ухом, отличаются в 10^{12} раз.

При возрастании интенсивности в геометрической прогрессии громкость увеличивается приблизительно линейно.



На этой основе **громкость** L выражают в логарифмической шкале:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \text{ где } I_0 = 10^{-16} \text{ Вт/см}^2 \text{ - интенсивность,}$$

условно принятая за **исходную**.

Эта интенсивность близка к **порогу слышимости** человеческого уха при частоте звука 1 кГц.

Громкость в соответствии с формулой при этом равна нулю (звук не воспринимается).

Единица измерения громкости в данной шкале — **децибел** (дБ).

Возможность оценивать направление распространения звуковых волн слуховым аппаратом человека обусловлена главным образом одновременным воздействием звуковой волны **на оба уха**.

Ощущение направления звуковых волн возникает благодаря **способности мозга** человека учитывать разность фаз колебаний, достигающих ушей.

Влияние сдвига фаз волны, которая действует на оба уха, называется **бинауральным эффектом**.

Отражение и поглощение звуковых волн

Длины волн **звукового диапазона** лежат в пределах от нескольких сантиметров до десятков метров.

Волна частотой 20 кГц имеет в воздухе длину примерно 16 мм, а частотой 20 Гц — 16 м.

Поэтому при распространении звуковых волн мы сталкиваемся с довольно **сложной картиной**.

Если при распространении звуковая волна **встречает преграду**, то в случае, когда ее длина значительно меньше преграды, будет наблюдаться явление **отражения волн**.

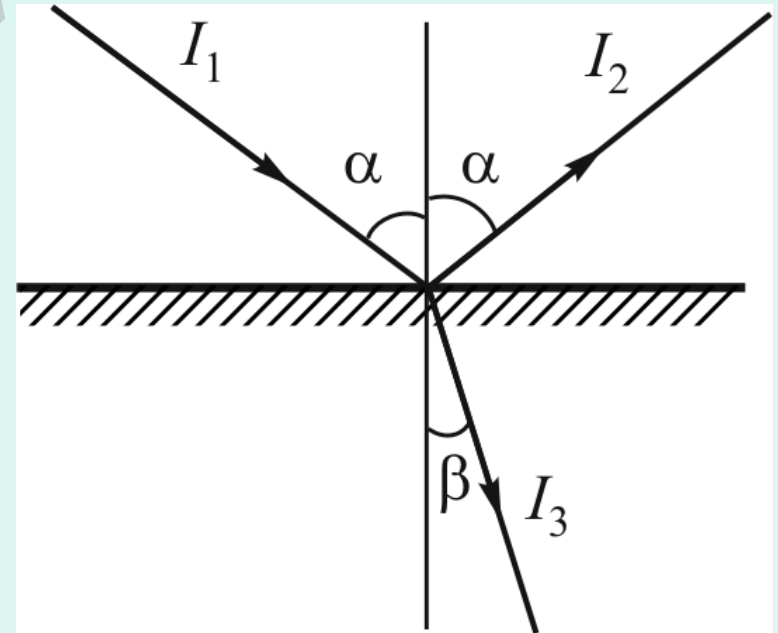
Если же размеры преграды намного **меньше длины волны**, будет наблюдаться явление **дифракции**: волны огибают преграду, заходя **в область** геометрической тени.

В тех случаях, когда размеры преграды **сравнимы с длиной волны**, законы распространения звуковой волны становятся более сложными, потому что одновременно имеет место и некоторое **отражение**, и **дифракция**.

При падении звуковой волны, распространяющейся в воздухе, на границу раздела двух сред часть ее энергии переходит в энергию отраженной волны, а часть проникает во вторую среду.

Рассмотрим случай, когда на границу раздела двух сред падает звуковая волна, интенсивность которой I_1 , под углом α к нормали.

Волна интенсивностью I_2 отразится от границы раздела под тем же углом α . Одновременно в другой среде будет распространяться волна интенсивностью I_3 .



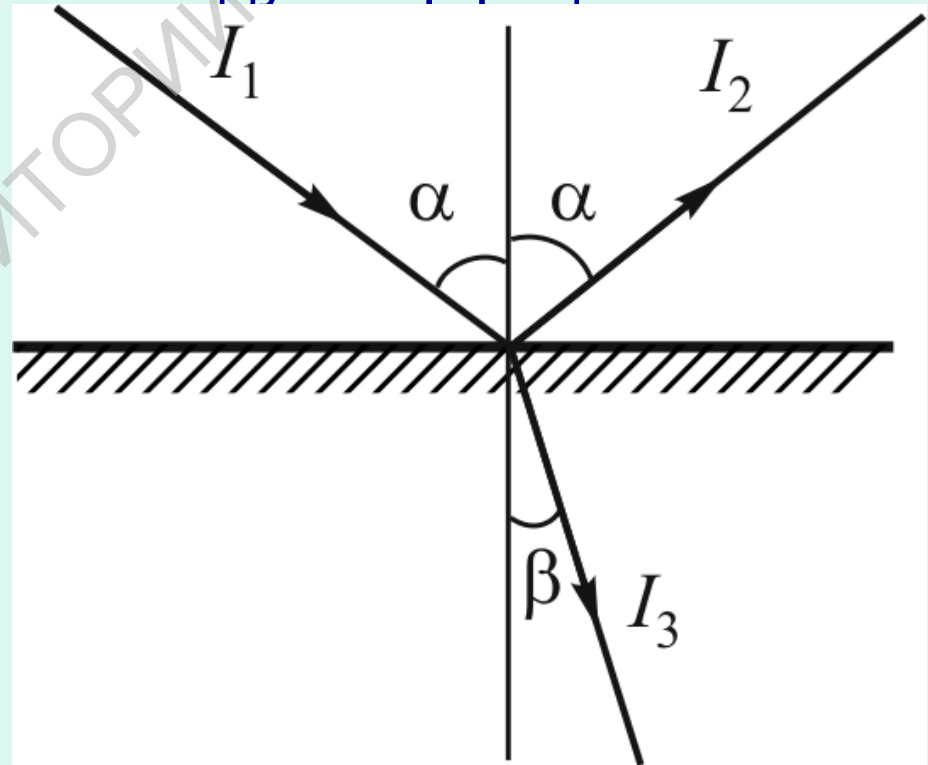
Отношение $\beta = I_3/I_1$ называется коэффициентом проникновения, который зависит от отношения акустических сопротивлений сред.

Интенсивность волны, отраженной от границы раздела двух сред, определяется соотношением: $I_2 = I_1 - I_3$.

Отношение $R = I_2/I_1$ называют коэффициентом отражения.

Очевидна следующая связь между коэффициентами R и β :

$$R = 1 - \beta .$$



Поглощение звука — уменьшение интенсивности распространяющейся звуковой волны с расстоянием, обусловленное внутренним трением и теплопроводностью.

В результате происходит необратимый переход части звуковой энергии в тепловую.

У плоской звуковой волны такое ослабление звука на расстоянии x происходит по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} .$$

Величина α носит название коэффициента поглощения.

При $x = 1/\alpha$ получим $I/I_0 = 1/e$ и
уменьшение интенсивности

$$e^{-\alpha x} = e^{-1} = 1/e .$$

Таким образом, коэффициент поглощения — величина, обратная расстоянию x , на котором амплитуда волны при ее распространении уменьшается в e раз.

Поглощение звука зависит от свойств среды, в которой распространяется звук, и от его частоты.

Коэффициент поглощения обратно пропорционален квадрату длины волны или прямо пропорционален квадрату частоты звука.

Звуки высоких тонов поглощаются в атмосфере значительно сильнее, чем низких.

Ультразвук и его применение

Два основных направления **практического использования** ультразвука в науке и технике .

Первое направление объединяет методы исследования разных явлений во многих отраслях физики, техники, биологии и т. д.

Эти методы основаны на использовании ультразвука малой интенсивности.

Второе направление объединяет методы воздействия на вещество, поскольку ультразвук большой интенсивности оказывает влияние на технологические процессы, способен изменять физические характеристики материалов.

Ультразвук имеет **преимущество** перед звуковыми волнами, благодаря **малой длине волны**.

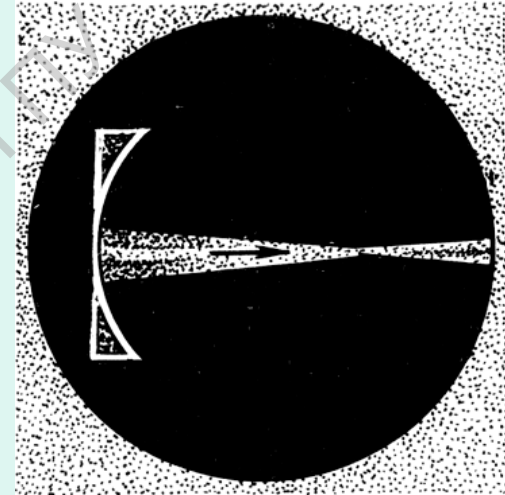
Так, например, в морской воде при частоте 500 Гц длина волны звука равна 3 м, а при частоте 500 кГц — всего 0,3 см.

Сравнительно малая длина ультразвуковых волн дает возможность для изучения их распространения в ряде случаев **методами геометрической акустики**.

Отсюда следуют такие свойства ультразвука, как возможность геометрического **отражения и преломления**, а также **фокусировки**.

На этих свойствах **базируются исследования** микроскопических неоднородностей среды.

На рисунке изображена картина фокусировки ультразвукового пучка в воде плосковогнутой линзой из пластмассы.



Большую **роль** ультразвук играет в **гидроакустике**, поскольку он является единственным видом упругих волн, которые хорошо распространяются в морской воде.

Направленные ультразвуковые пучки нашли широкое применение для целей **локации** (нахождение предметов и определение расстояния до них) в воде.

Рельеф морского дна измеряется **эхолотами**.

Приборы, которые позволяют выявить преграды в воде (подводную лодку, айсберг, косяк рыб и т. д.), называют гидролокаторами.

Явление отражения ультразвука на границе разных сред было использовано при создании приборов для определения размеров изделий (ультразвуковые толщиномеры), измерения уровня жидкости в больших емкостях, где нельзя выполнить прямые замеры.

Ультразвуковые приборы, которые служат для выявления дефектов (раковин, трещин и др.) в разных изделиях из твердых материалов, называются ультразвуковыми дефектоскопами.

Современные дефектоскопы позволяют контролировать металлические детали размерами более 10 м и обнаруживать дефекты внутри них размерами около миллиметра.

В последнее время ультразвук широко используется для диагностики, терапевтического и хирургического лечения в разных отраслях медицины.

Способность ультразвука без значительного поглощения проникать в мягкие ткани организма и отражаться от неоднородностей используются для исследования внутренних органов.

Ультразвуковые хирургические инструменты значительно **уменьшают** болевые ощущения и потери крови.

Весьма эффективным является использование ультразвука **для обработки** таких хрупких материалов, как стекло, фарфор, керамика.

На материал **воздействуют** миниатюрным долотом, соединенным с излучателем ультразвука, причем профиль долота должен соответствовать желаемому профилю изделия.

Ультразвуковым способом можно **получить** отверстия любого, самого сложного контура.

Ультразвуковая **обработка твердых** веществ используется также при резке металлов, стекла, керамики, алмаза и т. п., при обработке металлов давлением (волочении, штамповке, прессовании и др.).

Многие животные имеют **способность** воспринимать и излучать волны ультразвуковой частоты.

Метод ультразвуковой локации **позволяет летучим мышам** хорошо ориентироваться при полете в темноте. **Дельфины** излучают и воспринимают ультразвуки частотой до 70 кГц. Многие мелкие **насекомые** на лету создают ультразвуковые волны.

Опытным путем обнаружено, что птицы **болезненно реагируют** на ультразвуковые частоты выше 25 кГц.

Этот эффект используется для **отпугивания** чаек от водоемов с питьевой водой.

Инфразвук

Инфразвук (от лат. *infra* — ниже, под) — медленные изменения давления в воздухе, которые не воспринимаются на слух.

От обычных звуков инфразвук **отличается** малой частотой (меньшей 16 Гц) и большой длиной волны.

Нижний предел инфразвукового диапазона **не** выражен.

Практический интерес могут иметь колебания порядка десятых и даже сотых долей герца, т. е. с периодом в десяток секунд.

Природные источники инфразвука — это метеорологические, сейсмические и вулканические явления.

Инфразвуки возникают в результате флуктуаций давления в атмосфере и водной среде; источниками их являются ветер, морские волны (в том числе приливные), водопады, землетрясения, обвалы, извержения вулканов, газовые разряды, температурное раскалывание ледового покрова и т. д.

Инфразвуки издают многие обитатели мирового океана.

Источниками инфразвука, связанными с деятельностью человека, являются взрывы, ударные волны от сверхзвуковых самолетов, удары копров, выстрелы пушек, излучение реактивных двигателей и др.

Инфразвуковые составляющие **есть** в шуме двигателей и технического оборудования, винтов кораблей и т. п.

Характерное свойство инфразвука — весьма малое (по сравнению со слышимыми звуками) поглощение в воздухе.

Из-за большой длины волны на инфразвуковых частотах **невелико и рассеивание** звука в природной среде, более значительное рассеивание создают только очень крупные объекты: холмы, горы, высокие строения и др.

В результате инфразвуки **распространяются на очень большие расстояния**, постепенно очищаясь от слышимых звуков, которые поглощаются быстрее.

Известно, что звуки извержения вулканов, атомных взрывов могут **много раз огибать земной шар**, сейсмические волны способны пронизывать всю толщу Земли.

Последние исследования показали, что инфразвуки с высоким уровнем громкости (120 дБ и более) **оказывают вредное влияние** на организм человека и животных.

Очень вредными являются инфразвуковые вибрации, поскольку при их воздействии могут возникнуть опасные резонансные явления в отдельных органах человека.

Обычные методы для регистрации инфразвука **непригодны**.

Инфразвук очень низкой частоты можно обнаружить с помощью чувствительных **барометров**.

Для регистрации инфразвука сравнительно высоких частот, как правило, **используют специальные** низкочастотные микрофоны, приемники электрохимического, термисторного и оптического типов.