Задание по физике
для группы 10
на 17 марта 2020 года

1. **Внимательно изучить материалы по теме: «Механические волны».**
2. **Составить конспект по теме: «Механические волны».**
3. **Сфотографировать конспект, подписать Ф.И. и выслать его на e-mail: litsey-n1@yandex.ru**
   При возникновении вопросов задавайте их в сети VK: https://vk.com/natalia.zaytseva73
   Срок выполнения задания: до 24 марта 2020 года.
   Преподаватель: Зайцева Н.И.

§48. ВОЛНОВОЙ ПРОЦЕСС. ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

Существует два фундаментальных способа передачи энергии и импульса между двумя точками пространства:

- непосредственное перемещение частиц от точки к точке;
- перенос энергии без переноса вещества в результате последовательной передачи энергии и импульса по цепочке между соседними взаимодействующими друг с другом частицами среды. При этом перемещение отдельных частиц оказывается существенно меньшим, чем расстояние между точками пространства.

Волновой процесс — процесс переноса энергии без переноса вещества.

В результате внешнего воздействия на среду в ней возникает ***возмущение*** — отклонение частиц среды от положения равновесия.

Механическая волна — возмущение, распространяющееся в упругой среде.

Наличие упругой среды — необходимое условие распространения механических волн.

Одни виды волн можно визуально наблюдать (морские волны, рябь на поверхности воды), другие виды волн недоступны нашему зрению (электромагнитные, не относящиеся к диапазону видимого света, звуковые).

Рассмотрим волновой процесс передачи энергии в твердом теле (стержне) ①. Маятник 1, отклоненный от положения равновесия на некоторый угол, начинает двигаться к положению равновесия. Маятник 2, прислоненный к неподвижному, закрепленному стержню, отскакивает от него через некоторое время после удара о стержень маятника 1.

Объясним результат опыта с помощью одномерной механической модели кристалла в виде шариков, связанных между собой пружинами ②. Воздействие маятника на один из атомов (левый шарик) приводит к изменению его положения: пружина, соединяющая его с соседним шариком, сжимается. Изменение потенциальной энергии взаимодействия соседних атомов приводит к перемещению следующего атома (сжатию соседней пружины). Таким образом, внешнее воздействие в виде сжатия рапространяется со скоростью $\vec{v}$ от атома к атому вдоль стержня.

Скорость механической волны — скорость распространения возмущения в среде.

Энергия взаимодействия крайних атомов правого конца стержня длиной l маятнику 2 через промежуток времени $t = l / v$ после удара маятника 1.

В рассматриваемом случае движение частиц среды происходит вдоль направления распространения волны, т.е. возникает продольная волна.

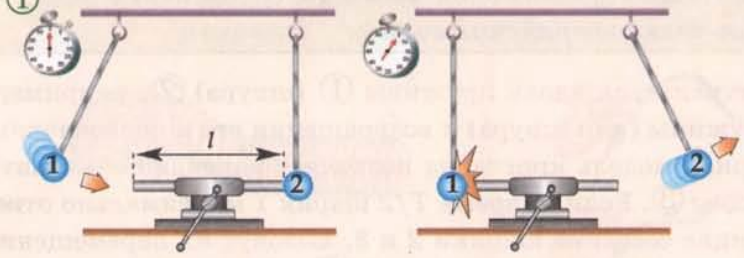
Продольная волна — волна, в которой движение частиц среды происходит в направлении распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в любой среде. Наглядным примером продольной механической волны в твердом теле является волна в пружине ③. Возможно возникновение и распространение продольной волны в газе ④. Сжатие газа поршнем изменяет компоненту скорости $\vec{v}$ молекул, направленную вдоль хода поршня. При последующих упругих столкновениях молекул одинаковой массы молекулы, движущиеся до удара со скоростью $\vec{v}$, останавливаются, а покоящиеся приобретают скорость $\vec{v}$ в направлении удара (подобно бильярдным шарам). Продольные волны могут возникать и в жидкости.

ВОЛНОВОЙ ПРОЦЕСС ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

ЭКСПЕРИМЕНТ

①

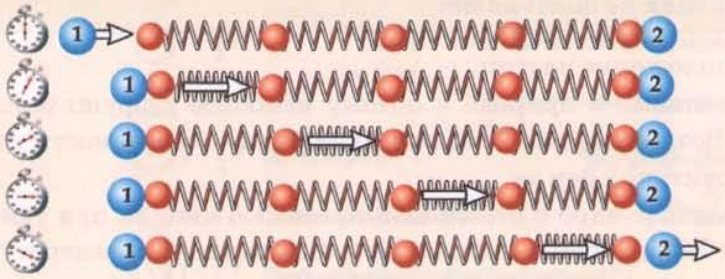


Механическая волна – *возмущение, распространяющееся в упругой среде*

Наличие упругой среды – *необходимое условие распространения механических волн*

② **Теоретическая модель распространения продольной волны в твердом теле**

Продольная волна – *волна, в которой движение частиц среды происходит в направлении распространения волны*

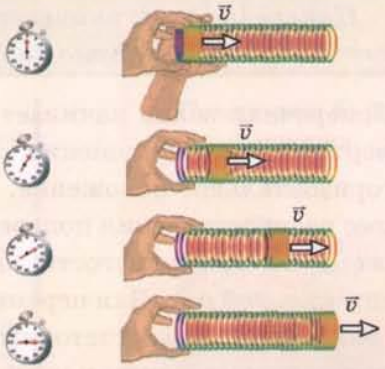


Одномерная механическая модель кристалла – *шарики (атомы), связанные между собой пружинами (электромагнитным взаимодействием)*

ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА В ПРУЖИНЕ

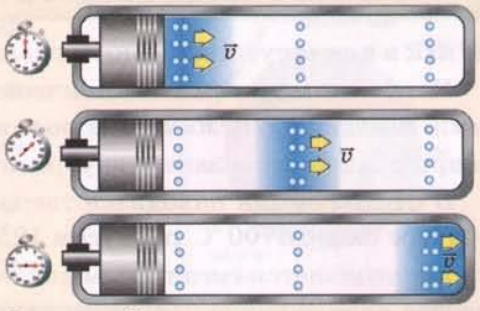
③



Скорость $\vec{v}$ механической волны – *скорость распространения возмущения в среде*

④ **ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА В ГАЗЕ**

Сжатие газа поршнем изменяет компоненту скорости $\vec{v}$ молекул, направленную вдоль хода поршня



Возникновение и распространение продольной механической волны в газе

МОРСКИЕ ВОЛНЫ

ВОЛНЫ В ОТКРЫТОМ ОКЕАНЕ

ВОЛНЫ У БЕРЕГА

§49. ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ

В твердом теле из-за сильной связи частиц между собой (большая потенциальная энергия их взаимодействия) возможно возникновение поперечных волн.

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

Поперечная волна начинает распространяться вдоль пружины ① (шнура) ②, например, при вертикальном отклонении конца пружины (или шнура) и возвращении его в первоначальное горизонтальное положение. Одномерная модель кристалла позволяет наглядно объяснить процесс распространения поперечной волны ③. Если за время $T/2$ шарик 1 максимально отведен вверх, то силы упругости, связывающие соседние шарики 2 и 3, вызовут их перемещение по вертикальной оси. Для перемещения остальных шариков возникающие силы упругости пружин оказываются недостаточными. Возвращение шарика 1 в первоначальное положение под действием внешней силы в момент времени T приведет в движение шарик 4 и связанные с ним шарики 5, 6. Шарик 4 двигается вверх, так как соседний с ним шарик 3 идет вниз, а пружина между ними, сохраняя первоначальное положение, «подбрасывает» вверх шарик 4. В момент времени $3T/2$ роль шарика 1 перейдет к шарику 4, а в движение придет следующая тройка: 7, 8, 9.

Таким образом, первоначальное возмущение в направлении оси Y начинает распространяться в виде поперечной волны по оси X.

Поперечные волны в газах и жидкостях не возникают,

так как в них отсутствует фиксированное положение частиц.

Наиболее мощными механическими волнами в природе и потому наиболее разрушительными являются ***сейсмические волны*** ④. Возникновение сейсмических волн и особенности их распространения связаны с внутренней структурой Земли.

В центре Земли находится твердое железное ядро с небольшой примесью никеля при температуре около 4700 °С радиусом 1250 км. Твердое состояние, несмотря на высокую температуру, обеспечивается гигантским давлением в центре Земли, которое может достигать 3 млн. атм. Твердое ядро окружено жидким ядром примерно такого же состава радиусом 3470 км. Жидкое ядро представляет собой вращающиеся потоки расплавленного железа и никеля, хорошо проводящие электричество. Именно с ними связывают происхождение земного магнитного поля. В ядре сосредоточено около 35% массы Земли.

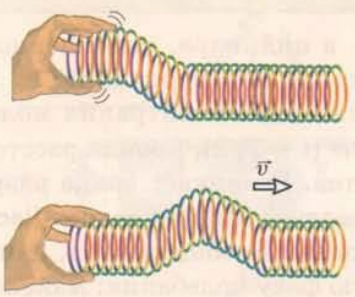
Вокруг жидкого ядра находится мантия из твердых силикатных пород, простирающаяся вплоть до глубины около 30 км от поверхности Земли. Наружный поверхностный шаровой слой составляет твердая земная кора, состоящая из силикатов и минералов.

Основная информация о внутреннем строении Земли получена в результате исследований сейсмических волн, возникающих при землетрясениях и мощных взрывах ⑤. Из-за наличия у Земли жидкого ядра поперечные сейсмические S — волны, имеющие скорость около 8 км/с, не фиксируются на стороне Земли, диаметрально противоположной месту землетрясения ⑥. Жидкое ядро — непреодолимое препятствие для поперечных сейсмических волн.

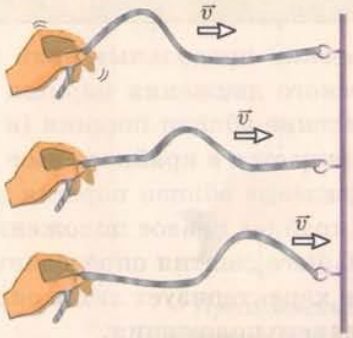
ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

ЭКСПЕРИМЕНТ

① *Поперечные механические волны в пружине*



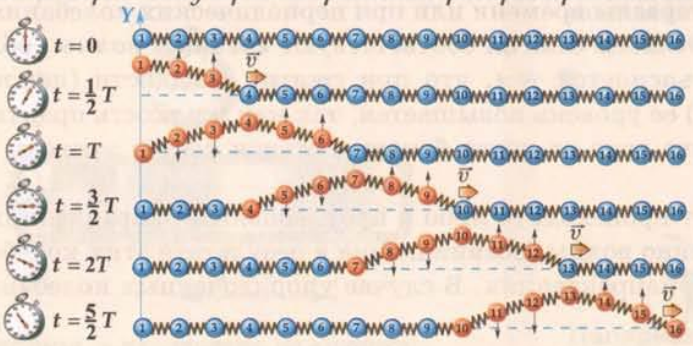
② *Поперечные механические волны в шнуре*



Теоретическая модель распространения поперечной волны в твердом теле

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

③

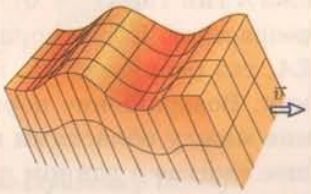


Первоначальное возмущение вдоль оси Y распространяется в виде поперечной волны по оси X. Поперечные волны в газах и жидкостях не возникают, так как в них отсутствует фиксированное положение частиц

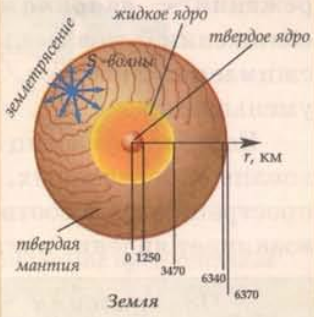
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

S – ВОЛНЫ

⑤ *Поперечные волны в мантии*



⑥ *Огибание поперечными волнами жидкого ядра Земли*



④ ## СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Последствия землетрясения в Кобе (Япония) 1995 г.

§50. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Периодическое внешнее воздействие вызывает периодические волны в упругой среде. При гармонических колебаниях физическая величина изменяется со временем синусоидально (или косинусоидально) с определенным периодом T (или частотой ν).

Гармоническая волна — волна, порождаемая гармоническими колебаниями частиц среды.

Возникновение гармонических продольных волн возможно в цилиндре, наполненном газом, в результате гармонического движения поршня с амплитудой A и периодом T. При сжатии газа ($t = 0$) его давление вблизи поршня (и соответственно концентрация молекул) возрастает. Когда поршень смещается в крайнее левое положение ($t = T/2$), пройдя расстояние $2A$, газ расширяется, а его давление вблизи поршня уменьшается. Возникает волна разрежения. Возвращение поршня в крайнее правое положение вновь создает волну сжатия. Расстояние между областями наибольшего сжатия определяет длину волны. Вообще говоря, наибольшее сжатие в данном примере характеризует лишь определенную фазу колебания: максимальное отклонение поршня от среднего положения.

Длина волны — расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний ее источника: $\lambda = vT$.

Гармонические волны на поверхности жидкости могут возникать, например, при падении в жидкость капель через равные интервалы времени или при периодических колебаниях какого-либо участка ее поверхности ②. Области сжатия соответствуют ***гребням волны***, области разрежения — ***впадинам*** ③. Это объясняется тем, что при сжатии жидкости (например, при сближении боковых стенок сосуда) ее уровень повышается, так как жидкость практически несжимаема. Наоборот, при удалении друг от друга боковых стенок сосуда уровень жидкости уменьшается.

Колебания частиц среды могут происходить либо в произвольных направлениях, либо во вполне определенных. Соответственно волны, возникающие в результате этих колебаний, распространяются в соответствующих направлениях. В случае упорядоченных колебаний частиц возникает явление поляризации.

Поляризация — пространственная упорядоченность направления колебаний частиц среды в поперечной волне.

Для создания поперечных волн в горизонтальном шнуре достаточно периодически перемещать его конец, например, вверх и вниз. В этом случае колебания частиц шнура распространяются вдоль оси X в плоскости XY, которую называют плоскостью поляризации ④.

Плоскость поляризации — плоскость, в которой колеблются частицы в среде.

Рассмотренная волна является линейно-поляризованной.

Линейно-поляризованная механическая волна — поперечная волна, вызывающая колебания частицы среды вдоль определенного направления (линии).

Для выделения волны определенной поляризации используют специальное устройство — ***поляризатор***. Простейшим поляризатором является щель ⑤. Такой поляризатор не пропускает волну, поляризованную в плоскости XZ, перпедикулярной щели.

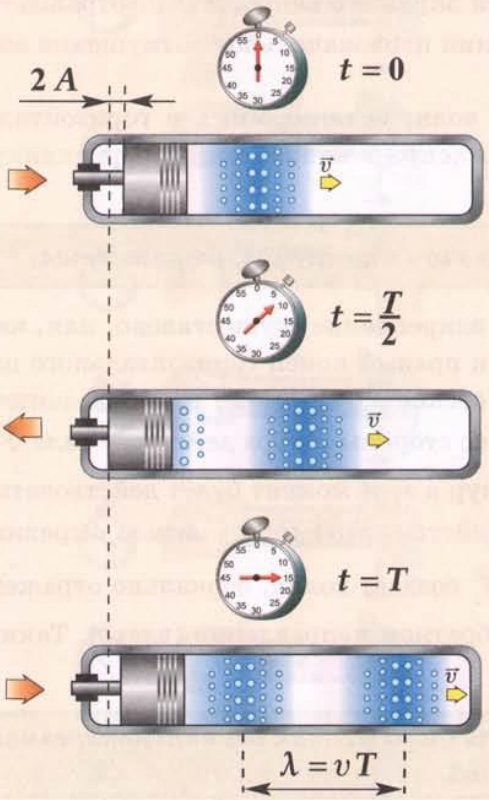
Световые волны поперечны. Это значит, что электромагнитные колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света.

ПРОДОЛЬНЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ГАЗЕ

Периодическое внешнее возмущение вызывает гармонические волны, если оно изменяется по закону синуса или косинуса

Гармоническая волна – *волна, порождаемая гармоническими колебаниями частиц среды*

①



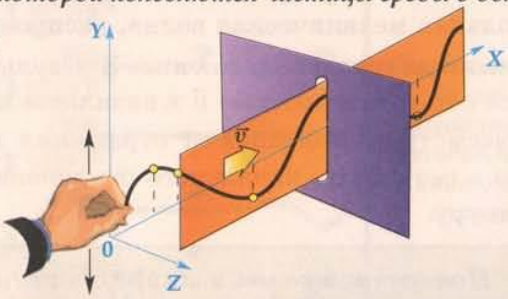
Длина волны – *расстояние, на которое распространяется волна за период колебания ее источника:* $\lambda = \upsilon T$

ПОПЕРЕЧНЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Поляризация – *пространственная упорядоченность направлений колебаний частиц среды в поперечной волне*

Плоскость поляризации – *плоскость, в которой колеблются частицы среды в волне*

④

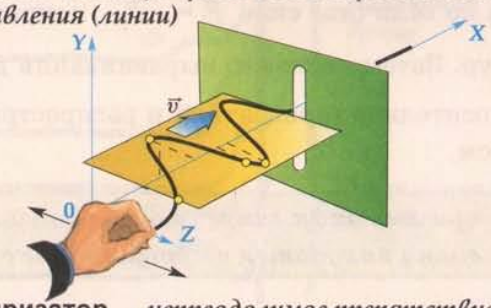


Прохождение через поляризатор (щель) гармонической поперечной механической волны

ПОЛЯРИЗАТОР

Линейно-поляризованная механическая волна - *поперечная волна, вызывающая колебания частицы среды вдоль определенного направления (линии)*

⑤



Поляризатор – *непреодолимое препятствие для проникновения гармонической поперечной механической волны, линейно-поляризованной в плоскости XZ*

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЛН

② *Гармонические волны на поверхности жидкости при падении капель через равные промежутки времени*

③ ДЛИНА ВОЛНЫ

Гармонические волны на поверхности жидкости при периодических колебаниях участка поверхности

Длина волны – *расстояние между соседними областями наибольшего сжатия*

§51. ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН

Теннисный мяч, ударяясь о стенку, упруго отражается от нее, изменяя направление движения на противоположное. Препятствие на пути распространяющейся в пространстве волны, играя роль стенки в примере с теннисным мячом, вызывает ее отражение. Рассмотрим динамику распространения продольной механической волны в горизонтально расположенной пружине, возникшей в результате начального горизонтального сжатия левого конца пружины ①. Продольная механическая волна, распространяющаяся вправо со скоростью $\vec{v}$, отражается от ее правого закрепленного конца. В результате отражения первоначальное возмущение возвращается с той же скоростью $\vec{v}$ в начальное положение.

Рассмотрим особенности отражения поперечных волн, возникающих в горизонтальном шнуре в результате начального отклонения его левого конца в направлении, перпендикулярном шнуру.

Поперечная волна в шнуре, дошедшая до точки его закрепления, отражается.

Форма отраженной волны зависит от того, как это закрепление осуществлено, или, как говорят, от граничных условий. При жестком креплении правый конец горизонтального шнура привязан к неподвижному кольцу, прикрепленному к стенке ②. В момент времени, когда волна доходит до правого конца, на фиксирующее кольцо со стороны шнура действует сила $\vec{F}_{\uparrow}$, направленная вверх. По третьему закону Ньютона на шнур в этот момент будет действовать равная по величине сила $\vec{F}_{\downarrow} = -\vec{F}_{\uparrow}$, направленная вниз. Действие этой силы сначала выравнивает шнур. Затем после его выравнивания действие силы $\vec{F}_{\downarrow}$ создает волну, зеркально отраженную относительно горизонтали и распространяющуюся в обратном направлении (влево). Таким образом,

при жестком закреплении одного из концов шнура отраженная от него поперечная волна находится в противофазе с падающей волной.

Противоположная ситуация возникает, когда правый конец горизонтального шнура подвижен и может перемещаться свободно в направлении, перпендикулярном шнуру ③. Например, легкое кольцо, привязанное к правому концу шнура, может свободно, без трения скользить по вертикальному стержню. В момент времени, когда волна доходит до правого конца, кольцо начинает подниматься по инерции вверх (подобно океанской волне, накатывающейся на вертикальную стенку пирса).

Опускаясь вниз, правый конец веревки изменяет ее форму, создавая отраженную волну, совпадающую по форме с падающей. Таким образом,

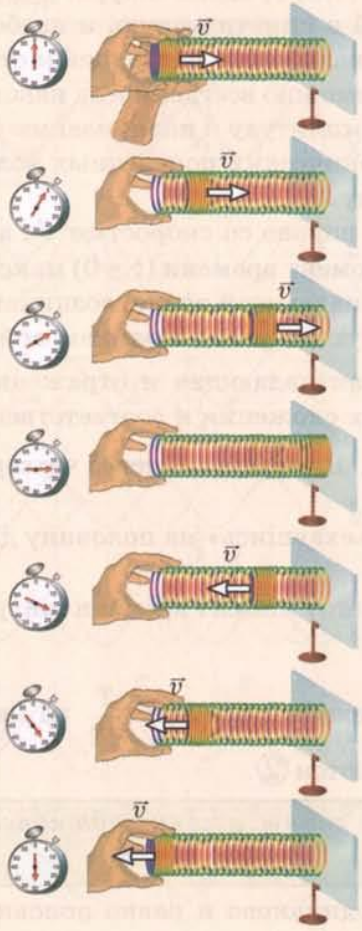
поперечная волна, отраженная от свободного конца шнура, находится в фазе с падающей волной.

Результирующая форма шнура определяется при сложении падающей и отраженной волн.

Подобное наложение падающей и отраженной волн можно наблюдать и на поверхности воды. Картина волн, возникающих на открытой воде, вдали от берега ④, например, при всплытии подводной лодки, существенно отличается от картины волн при ее движении в шлюзе ⑤. Волны, отраженные от стенок шлюза, накладываются на волны, вызванные движением подлодки на открытой воде, существенно влияя на ее движение.

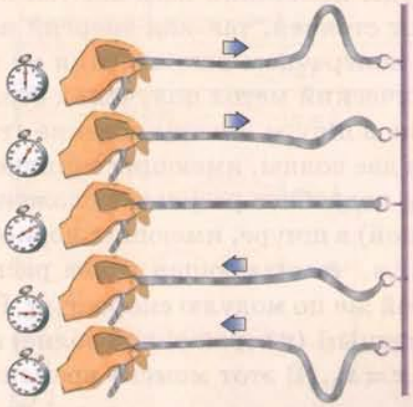
ОТРАЖЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ПРУЖИНЕ

① Правый конец пружины закреплен

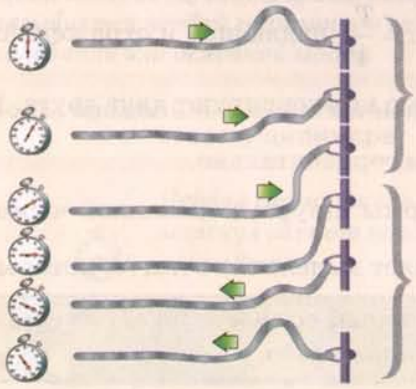


ОТРАЖЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ШНУРЕ

② Правый конец шнура закреплен



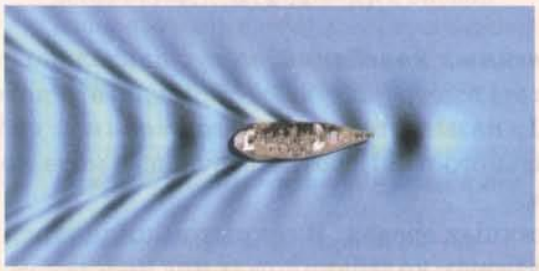
③ Правый конец шнура свободен



Отраженная волна находится в фазе с падающей волной

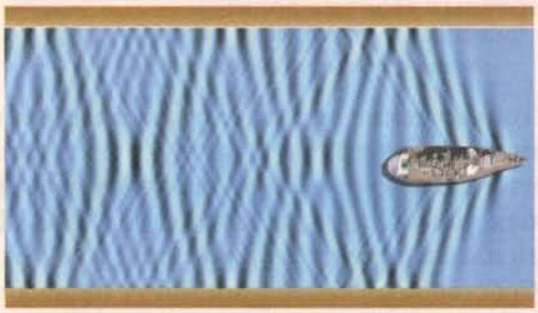
④ ВОЛНЫ НА ОТКРЫТОЙ ВОДЕ

Волны при всплытии подводной лодки



⑤ ВОЛНЫ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ (ШЛЮЗЕ)

Волны при движении корабля в шлюзе



Волны, отраженные от берегов шлюза, накладываются на волны, вызванные движением корабля на открытой воде

§52. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Стоячая поперечная волна — волна, все точки которой колеблются в одинаковой фазе.

Их амплитуды колебаний изменяются периодически от точки к точке. Подобную волну в шнуре называют стоячей, так как энергия не переносится (стоит) вдоль шнура, а лишь трансформируется в поперечном направлении из потенциальной в кинетическую, и наоборот. Простейший практический метод получения стоячей волны —наложение падающей и отраженной поперечных волн в шнуре. Возникновение стоячих волн возможно всегда, когда навстречу друг другу движутся две волны, имеющие одинаковый период, амплитуду и поляризацию ①.

Рассмотрим подробнее результат сложения двух гармонических поперечных волн (падающей и отраженной) в шнуре, имеющих период T и амплитуду A.

Предположим, что падающая волна распространяется вправо со скоростью $\vec{v}$, а отраженная — влево с той же по модулю скоростью. В начальный момент времени (t = 0) максимальные отклонения частицы 1 (в отраженной волне) и частицы 2 (в падающей волне) возникают в точке с координатой $x = x_0$. В этот момент времени сложение двух синусоид с одинаковой амплитудой A дает синусоиду с амплитудой $2A$. По мере того, как падающая и отраженная волны «разъезжаются» в разные стороны, изменяется результат их сложения и соответственно форма шнура, показанные через равные промежутки времени $\frac{T}{12}$. В частности, через четверть периода колебаний ($t = \frac{T}{4}$) падающая и отраженная волны, «разъехавшись» на половину длины волны $\frac{\lambda}{2}$, полностью компенсируют друг друга. В результате в этот момент времени шнур оказывается натянутым горизонтально.

Анализ формы шнура, показанной через равные промежутки времени $\frac{T}{12}$ на нижнем рисунке б, позволяет выделить точки N, которые не перемещаются ②.

Узлы 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.

Пучности стоячей волны — положения точек, имеющих максимальную амплитуду колебаний.

Если закреплены оба конца шнура (или струны), отражение волны происходит от обоих концов ③. На длине l струны, закрепленной на концах, укладывается целое число n полуволн поперечных стоячих волн:

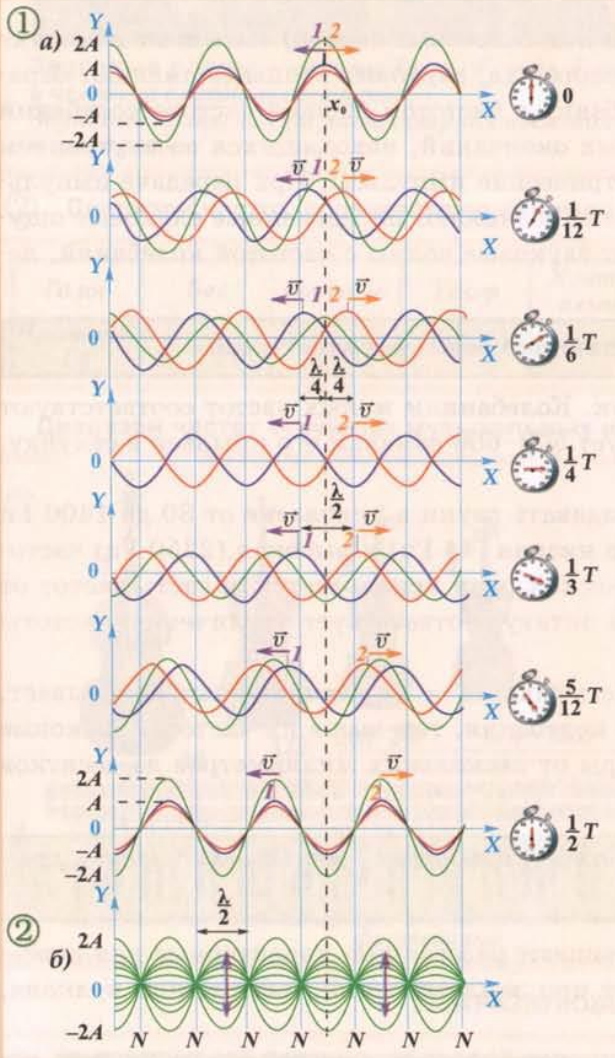
$$\frac{l}{(\lambda/2)} = n. \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$

Только такие волны, называемые ***модами собственных колебаний***, могут длительно поддерживаться в струне. Волны других длин волн (частот) быстро затухают в результате потерь энергии. ***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***.

Собственные колебания могут происходить в различных средах. В закрытом цилиндре, наполненном газом, возникают моды продольных собственных колебаний газа под действием перемещения поршня ④. Изучение собственных колебаний в ограниченном объеме необходимо, в частности, для изготовления качественных духовых музыкальных инструментов.

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ СТОЯЧИХ ВОЛН

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



а) Сложение двух гармонических поперечных волн (падающей вправо и отраженной влево), имеющих период T

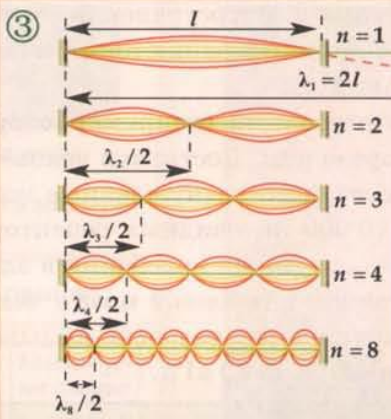
б) Пучности и узлы стоячей волны

Пучности – *положения точек, имеющих максимальную амплитуду колебаний*

Узлы – *неперемещающиеся точки стоячей волны, амплитуда колебаний которых равна нулю*

МОДЫ КОЛЕБАНИЙ

Моды собственных колебаний в струне, закрепленной на концах



$$\frac{l}{\lambda/2} = n$$

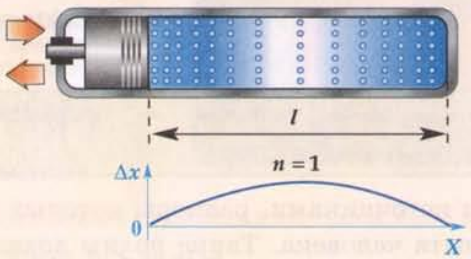
$$n = 1, 2, 3, \ldots$$

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

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

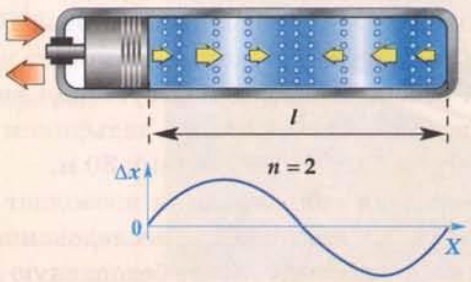
Моды продольных собственных колебаний газа в цилиндре

④ *Первая гармоника отклонений молекул газа от положения равновесия*



Δx – смещение молекул газа от положения равновесия в определенный момент времени

Вторая гармоника отклонений молекул газа от положения равновесия



§53. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. ВЫСОТА ЗВУКА

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

Необходимое условие распространения звуковых волн — ***наличие упругой среды.*** В вакууме звуковые волны не распространяются, так как там нет частиц, передающих взаимодействие от источника колебаний ①.

Колебания источника звука (например, струны или голосовых связок) вызывают в воздухе волны сжатия и разрежения. Достигнув человеческого уха, звуковые волны заставляют барабанную перепонку совершать 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.

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 экспериментально зафиксированы рекордно низкая (44 Гц) и высокая (2350 Гц) частоты) ②. В телефоне для воспроизведения человеческой речи используется область частот от 300 до 2000 Гц. На клавиатуре пианино сдвиг на октаву соответствует увеличению частоты звука вдвое ③.

Изучению звука посвящена специальная область физики — ***акустика.*** Опыт показывает, что чем меньше размер источника, вызывающего колебания, тем выше их частота. Звуковые волны создаются источниками, имеющими размеры от нескольких миллиметров до десятков метров.

Инфразвуковые волны — упругие волны, имеющие меньшую частоту ($\upsilon < 16$ Гц),

вызываются источниками, размеры которых превышают расстояния, характерные для повседневного опыта человека. Такие волны возникают при землетрясении, извержении вулкана, грозовом разряде ④, взрыве ядерной бомбы ⑤.

Ультразвуковые волны — упругие волны, имеющие большую частоту ($\upsilon > 20$ кГц),

вызываются миллиметровыми источниками. Ультразвук способны излучать и улавливать некоторые животные, например, летучие мыши и дельфины ⑥. При крике летучей мыши генерируются ультразвуковые волны с частотой 100 кГц. Анализ отраженных сигналов, принимаемых при ультразвуковой локации, помогает животным ориентироваться в пространстве в условиях слабой освещенности или отсутствия видимого света и находить пищу. Частота ультразвукового сигнала, испускаемого дельфином (порядка 1 МГц), позволяет обнаруживать дробинку диаметром 4 мм на расстоянии 30 м.

Ультразвуковая гидролокация позволяет исследовать морское дно, обнаруживать подводные объекты ⑦. Ультразвуковое исследование (УЗИ) внутренних органов позволяет проводить медицинскую диагностику, более безопасную для пациента, чем рентгенологическая.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ (16 Гц < ν < 20 кГц)

① Возникновение и восприятие звуковых волн

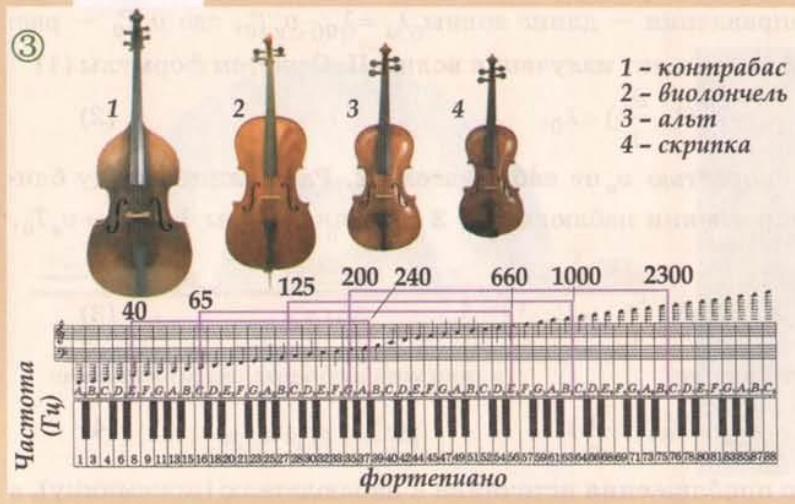
Звуковые волны – *упругие волны в среде, вызывающие у человека слуховые ощущения.*
Звуковые волны могут распространяться только в материальной среде

② Диапазон частот, соответствующий голосу певца

Голос	*Бас*	*Баритон*	*Тенор*	*Контр-альто*	*Колоратурное сопрано*
Частота, Гц	80 – 400	110 – 400	150 – 500	200 – 700	250 – 1400

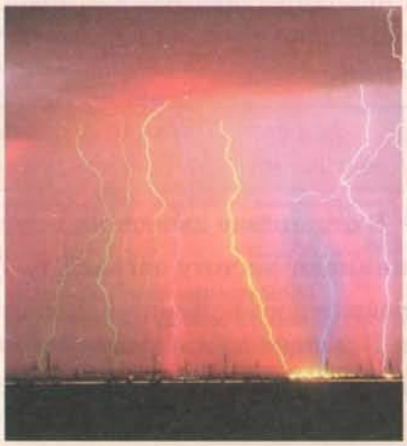
Диапазон частот струнных музыкальных инструментов

③



ИНФРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ (ν < 16 Гц)

④ ГРОЗОВОЙ РАЗРЯД



⑤ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ ВЗРЫВ

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ (ν > 20 кГц)

⑥ Ультразвуковая локация как способ ориентации в пространстве и поиска пищи в условиях слабой освещенности

При крике летучей мыши генерируется ультразвуковая волна с частотой 100 кГц

1 - *источник звука*
2 - *испускаемый сигнал*
3 - *отраженная волна*
4 - *внутреннее ухо*

Частота ультразвукового сигнала, испускаемого дельфином, порядка 1 МГц

⑦ Ультразвуковая гидролокация

§54. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Высота звука определяется частотой источника звуковых колебаний. Однако сигнал одной и той же частоты может восприниматься наблюдателем по-разному в зависимости от того, движутся источник сигнала и наблюдатель друг относительно друга или нет. Например, звук сирены приближающегося автомобиля кажется наблюдателю более высоким, чем удаляющегося от него. Впервые подобный эффект был предсказан в 1842 г. австрийским физиком ***Иоганном Доплером***.

Эффект Доплера — зависимость длина волны (частоты) сигнала, фиксируемого приемником, от скорости движения источника и приемника.

В отсутствие движения источника сигнала частотой υ_0 неподвижные наблюдатели 1 и 2 воспринимают частоту сигнала υ_0 (длину волны λ_0) ①. ***Волна сжатия*** I, распространяющаяся от неподвижного источника, попадает к наблюдателям через время t. Ближайшая к ней волна сжатия II дойдет до наблюдателей позднее на T_0 — период колебаний, генерируемых источником. Оба наблюдателя будут воспринимать одинаковую частоту сигнала $\upsilon_0 = 1/T_0$ и длину волны

$$\lambda_0 = \upsilon T_0, \qquad (1)$$

где λ_0 — расстояние между двумя волнами сжатия I и II, υ — скорость звука.

Если источник движется со скоростью $\upsilon_и$ к наблюдателю 1 ②, расстояние между ближайшими волнами сжатия I и II в этом направлении — длина волны $\lambda_1 = \lambda_0 - \upsilon_и T_0$, где $\upsilon_и T_0$ — расстояние, на которое сместился источник на момент излучения волны II. С учетом формулы (1)

$$\lambda_1 = \lambda_0\left(1 - \frac{\upsilon_и}{\upsilon}\right) < \lambda_0. \qquad (2)$$

При этом источник удаляется со скоростью $\upsilon_и$ от наблюдателя 2. Расстояние между ближайшими волнами сжатия I и II в направлении наблюдателя 2 — длина волны $\lambda_2 = \lambda_0 + \upsilon_и T_0$. С учетом формулы (1)

$$\lambda_2 = \lambda_0\left(1 + \frac{\upsilon_и}{\upsilon}\right) > \lambda_0. \qquad (3)$$

Формулы (2), (3) можно представить в виде

$$\lambda_{1,2} = \lambda_0\left(1 \pm \frac{\upsilon_и}{\upsilon}\right), \qquad (4)$$

где знак «минус» соответствует случаю приближения источника к наблюдателю (приемнику), а знак «плюс» — случаю удаления источника от наблюдателя. По формулам (2), (3), где роль υ играет скорость света c, определяют скорость движения отдаленных галактик. При приближении галактики воспринимаемая длина волны уменьшается, а при удалении — увеличивается (***«красное смещение»***).

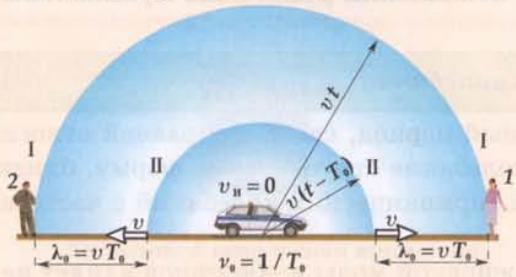
С увеличением скорости источника расстояние между ближайшими звуковыми волнами сжатия в направлении движения уменьшается (см. формулу (2)).

Частота звука от неподвижного источника сигнала зависит от скорости движения приемника ③ $\qquad \nu_{1,2} = \nu_0\left(1 \pm \frac{\upsilon_{пр}}{\upsilon}\right).$

При достижении источником звуковых волн скорости звука: $\upsilon_и = \upsilon$, волны сжатия накладываются друг на друга, резко увеличивая результирующее сжатие. Возникает ударная волна ④. Такая волна уплотнения воздуха возникает при преодолении истребителем звукового барьера. При $\upsilon_и > \upsilon$ фронт ударной волны располагается под углом α к направлению движения источника ⑤.

① НЕПОДВИЖНЫЙ ИСТОЧНИК СИГНАЛА И НАБЛЮДАТЕЛИ 1 и 2

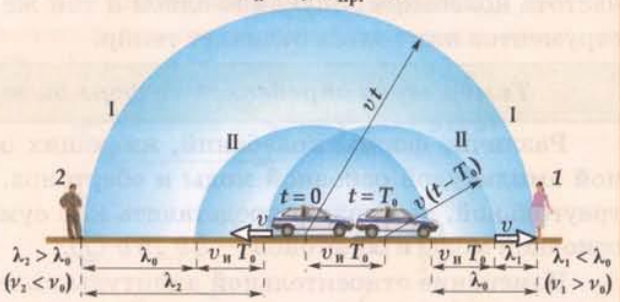
$v_и = 0$; $v_{пр.} = 0$; v – *скорость звука*



Частоты сигнала (длины волн), воспринимаемые наблюдателями 1 и 2, совпадают с частотой ν_0 (длиной волны λ_0) сигнала источника

② ДВИЖУЩИЙСЯ ИСТОЧНИК И НЕПОДВИЖНЫЕ НАБЛЮДАТЕЛИ 1 и 2

$v_и \neq 0$; $v_{пр.} = 0$

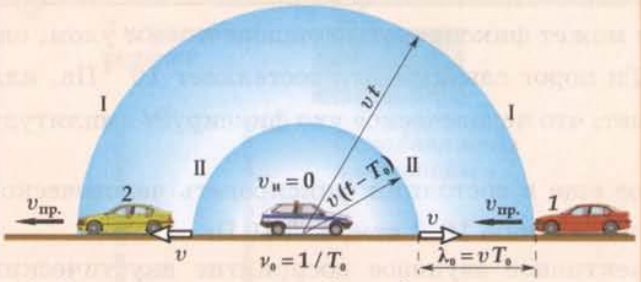


Длина волны λ_1 сигнала, воспринимаемого наблюдателем 1, меньше λ_0. Длина волны λ_2 сигнала, воспринимаемого наблюдателем 2, больше λ_0

$$\lambda_{1,2} = \lambda_0 \left(1 \pm \frac{v_и}{v}\right)$$

③ НЕПОДВИЖНЫЙ ИСТОЧНИК СИГНАЛА И ДВИЖУЩИЕСЯ НАБЛЮДАТЕЛИ 1 и 2

$v_и = 0$; $v_{пр.} \neq 0$



Зависимость частоты звука, воспринимаемого приемником, от скорости приемника

$$\nu_{1,2} = \nu_0 \left(1 \pm \frac{v_{пр.}}{v}\right)$$

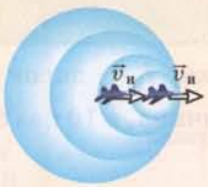
④ Преодоление истребителем звукового барьера

⑤ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ СЖАТИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА

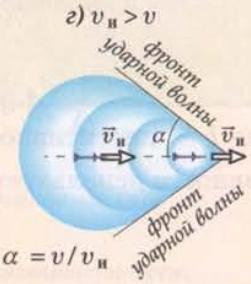
а) $v_и = 0$

б) $v_и < v$

в) $v_и = v$



г) $v_и > v$



$\sin\alpha = v / v_и$

§55. ТЕМБР. ГРОМКОСТЬ ЗВУКА

Звуковое колебание характеризуется ***спектром*** — зависимостью давления p воздуха, создаваемого источником, от частоты ν колебаний ①. Данной ноте соответствует определенная частота колебаний. Звучание одной и той же ноты в исполнении различных музыкальных инструментов или голоса отличает тембр.

Тембр звука определяется формой звуковых колебаний.

Различие формы колебаний, имеющих одинаковый период, связано с разной относительной амплитудой основной моды и обертонов. Если колебание струны имеет форму, близкую к треугольной, его можно представить как сумму трех гармонических колебаний с частотами ν основной моды и обертонов — 3υ, 5υ ②.

Изменение относительной аплитуды колебаний основной моды и обертонов влияет на форму результирующего колебания и соответственно его тембр ③. Тембр ноты «ля» малой октавы (основная мода 220 Гц) различен в исполнении скрипки и трубы ④: спектр скрипки больше насыщен высокими обертонами.

При воздействии на струну медиатором в ней возбуждается больше высших гармоник, чем когда ее трогают пальцами. Высшие гармоники придают звукам балалайки звенящую окраску. Следует иметь в виду, что чувствительность человеческого уха зависит от частоты звука. Ухо наиболее чувствительно к колебаниям с частотой порядка 3,5 кГц.

Громкость звука зависит от амплитуды колебаний давления в звуковой волне ⑤.

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.

Максимальное изменение давления, которое еще в состоянии фиксировать человеческое ухо, определяет ***болевой порог***, соответствующий давлению 10^{-4} атм, или 10 Па.

Если громкость звука характеризует субъективное звуковое восприятие акустических волн, то уровень интенсивности звука является объективной энергетической характеристикой звуковых волн.

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

Единица интенсивности звука — *ватт на квадратный метр* ($\text{Вт}/\text{м}^2$). ***Порог слышимости*** — соответствует интенсивности звука $I_0 = 10^{-12}$ $\text{Вт}/\text{м}^2$; болевой порог $I_{\text{б.п.}} = 1$ $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Уровень интенсивности звука — десятичный логарифм отношения двух интенсивностей (единица — белл (Б)) ⑥:

$$k = \lg\left(\frac{I}{I_0}\right),$$

где I — интенсивность звука, I_0 — порог слышимости. На практике в качестве уровня интенсивности используется величина, в 10 раз большая (единица — *децибелл* (дБ)):

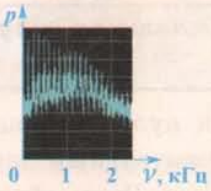
$$\beta = 10\lg\left(\frac{I}{I_0}\right).$$

Уровень интенсивности 120 дБ является болевым порогом. Увеличение интенсивности звука на 10 дБ примерно удваивает громкость.

ТЕМБР ЗВУКА

Форма звукового колебания

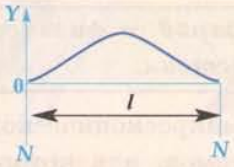
①



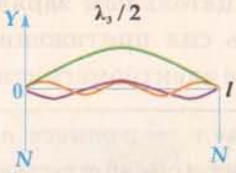
Крещендо в исполнении тромбона

Основная мода и обертоны

②



$$y = y_1 + y_3 + y_5$$



$$y_1\left(\lambda_1 = \frac{l}{2}\right)$$

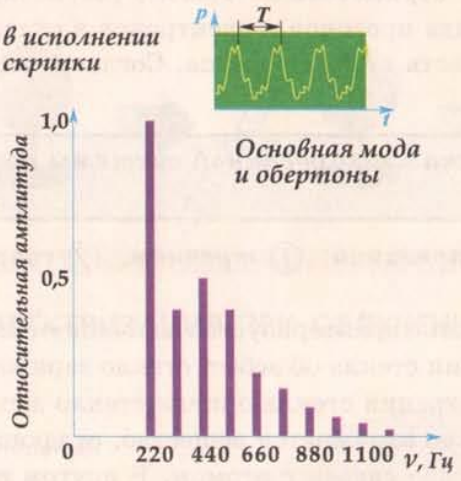
$$y_3\left(\lambda_3 = \frac{l}{2}\cdot\frac{1}{3}\right)$$

$$y_5\left(\lambda_5 = \frac{l}{2}\cdot\frac{1}{5}\right)$$

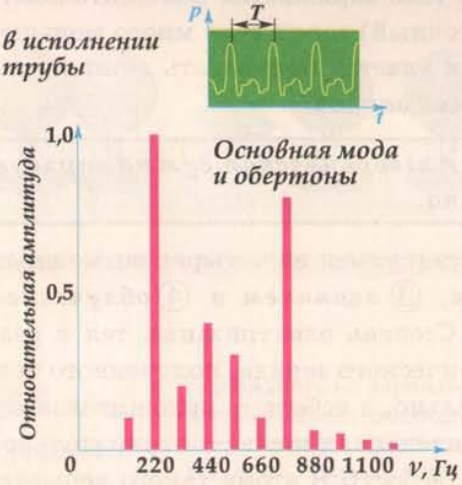
Реальное колебание y, представленное в виде суммы трех гармонических мод y_1, y_3, y_5

Нота "ля" малой октавы (A_3; 220 Гц)

③ *в исполнении скрипки*



④ *в исполнении трубы*



ГРОМКОСТЬ (ИНТЕНСИВНОСТЬ) ЗВУКА

⑤

Громкость звука *зависит от амплитуды колебаний давления в звуковой волне и характеризуется уровнем интенсивности звука*

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

Единица интенсивности звука – *ватт на квадратный метр* (Вт/м²)

Порог слышимости соответствует интенсивности звука $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²; *болевой порог* $I_{б.п.} = 1$ Вт/м²

⑥ *Уровень интенсивности звука*

$$\beta = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

измеряют в децибелах (дБ)

Болевому порогу соответствует уровень интенсивности звука 120 дБ