<u>Лекция №4.</u>
МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Волна - процесс распространения колебаний.

Самыми распространенными среди упругих волн являются звуковые волны в воздухе. Среда, передающая колебания от точки к точке, обладает упругостью на сжатие или сдвиг. Упругие свойства присущи газам, жидкостям и твердым телам.

Жидкости гораздо сильнее, чем газы, сопротивляются изменению их объема, хотя так же, как и газы, не обладают сдвиговой упругостью, т.е. сдвиг одного слоя жидкости относительно другого не порождает сил, стремящихся вернуть его в первоначальное положение. В газах и жидкостях могут распространяться лишь волны сжатия-разрежения.

Т.о. волны можно разделить на:

продольные – в которых частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны;

поперечные – в которых частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном к направлению ее распространения.

В твердых телах кроме продольных могут распространяться и поперечные волны. Волны на поверхности жидкости хорошо иллюстрируют присущее всем волнам свойство – распространяясь в пространстве, волна не переносит вещества: щепка, плавающая на водной поверхности озера, совершает колебания вверх-вниз, оставаясь на одном месте, в то время как волна беспрерывно перемещается. Существование поперечных волн объясняется свойственной твердым телам сдвиговой упругостью.

Уравнения плоской и сферической волн

Тело, совершающее колебания в упругой среде, служит *источником* волн. От источника волны распространяются в пространстве. Область пространства, в которой происходят колебания частиц среды, называется *волновым полем*. Поверхность, отделяющая волновое поле от остальной части пространства, в которой колебания еще не начались, называется *фронтом волны*. Распространение колебаний в среде сопровождается перемещением фронта волны со скоростью, зависящей от свойств среды.

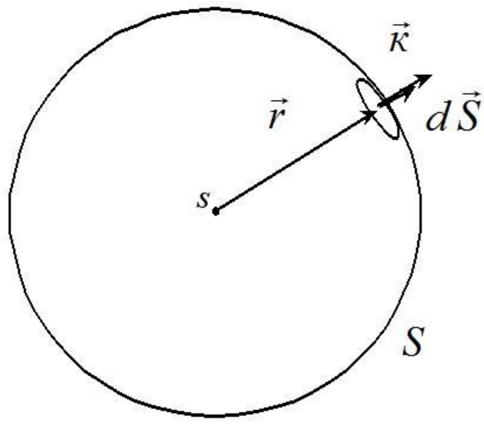

Рис. 1

Источник волн называется *точечным*, если он излучает волны по всем направлениям равномерно, а размеры его малы по сравнению с расстоянием от него до точки наблюдения. Точечный источник s излучает волну, фронт которой в однородной среде имеет форму сферы (рис.1). Волна в этом случае называется *сферической*. На большом расстоянии r от источника сферическая поверхность S фронта волны вблизи точки наблюдения мало отличается от плоской. Волну, фронтом которой является плоская поверхность, называют *плоской волной*. Источником плоских волн может также служить колеблющаяся плоскость. Волна распространяется в перпендикулярном к ней направлении. Если расстояние от точки наблюдения до плоскости гораздо меньше ее размеров, мы говорим о бесконечной плоскости.

Получим уравнение плоской волны, излучаемой такой плоскостью в перпендикулярном к ней направлении (вдоль оси X на рис.2). Обозначим через $\xi(x,t)$ смещение от положения равновесия в момент времени t точек среды, отстоящих от источника на расстоянии x. Источник волн (плоскость YOZ) совершает колебания вдоль оси Y, т.е. излучает поперечные волны.

Колебания источника описываются функцией

$$\xi(0,t) = A\cos\omega t, \qquad (1)$$

где A – амплитуда, ω – циклическая частота.

Пусть τ – время, в течение которого фронт волны проходит расстояние x от источника до точки наблюдения. Смещение точек среды, имеющих координату x, т.е. находящихся в плоскости, перпендикулярной оси X, отстает по фазе от смещения источника. В момент времени $t = \tau$ оно равно смещению источника в момент времени $t = 0$, т.е.

$$\xi(x,t) = A\cos\omega(t-\tau), \qquad (2)$$

где $\tau = x/\upsilon$, а υ – скорость распространения колебаний (фронта волны). Эта скорость называется *фазовой*, поскольку за время τ на расстояние x перемещается фаза колебаний. Подстановка τ в формулу (2) приводит к уравнению

$$\xi(x,t) = A\cos\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right),$$

которое записывают в симметричном относительно x и t виде:

$$\xi(x,t) = A\cos(\omega t - \kappa x). \qquad (3)$$

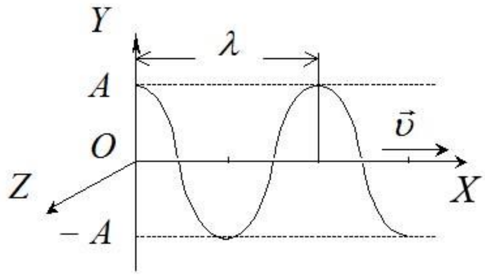

Рис. 2

Множитель

$$\kappa = \frac{\omega}{\upsilon} \qquad (4)$$

называется *волновым числом*.

Уравнение (3) – *уравнение плоской волны*. При $t = const$ функция $\xi(x,t)$ периодическая по координате x. Она изображена на рис. 2.

Если зафиксировать координату, т.е. положить $x = const$, то периодическая функция времени $\xi(x,t)$ описывает колебания точек среды, имеющих эту координату, т.е. колебания плоскости. Эти колебания воспроизводят колебания источника с отставанием по фазе на κx.

Расстояние, проходимое фронтом волны за время, равное периоду колебаний источника T, называется длиной волны λ. Следовательно, длина волны $\lambda = \upsilon T$. Длина волны – кратчайшее расстояние между двумя точками, колеблющимися в одинаковых фазах (см. рис. 2).

Поскольку $\upsilon = \lambda / T$, $\omega T = 2\pi$, из формулы (4) следует:

$$\kappa = \frac{\omega T}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda}. \tag{5}$$

Волновое число κ показывает, сколько длин волн укладывается на отрезке длиной 2π, измеренной в тех же единицах, что и λ.

Учитывая, что частота колебаний источника ν и его период связаны соотношением $T = 1/\nu$, из формул (4) и (5) получим

$$\upsilon = \frac{\omega}{\kappa} = \frac{2\pi\nu}{\kappa} = \lambda\nu. \tag{6}$$

Амплитуда A плоской волны в уравнении (3) постоянна, поскольку предполагается, что при распространении волны ее энергия не поглощается средой. Амплитуда сферической волны уменьшается при удалении от источника, поскольку площадь поверхности фронта волны при этом возрастает. Уравнение сферической волны имеет вид

$$\xi(\vec{r}, t) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - \vec{\kappa}\vec{r}), \tag{7}$$

где A_0 – амплитуда волны на расстоянии $r = 1$ м от источника, $\vec{r}$ – радиус-вектор, соединяющий источник с точкой наблюдения. Вектор $\vec{\kappa}$ называется *волновым вектором*. Он перпендикулярен фронту волны (см. рис. 1) и по модулю совпадает с волновым числом (5):

$$\vec{\kappa} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}. \tag{8}$$

($\vec{n}$ – единичный вектор нормали к фронту волны).

Стоячие волны

В среде могут одновременно распространяться в виде волн колебания, исходящие от разных источников. Если две волны перекрываются в некоторой области, а затем снова расходятся, то дальше каждая из волн распространяется так, как если бы она не встречала на своем пути другую. Этот принцип независимости распространения волн известен под названием *принципа суперпозиции*. Он присущ всем волновым процессам.

В области перекрытия волн колебания налагаются друг на друга, в результате чего в одних местах они усиливаются, а в других – ослабевают. В каждой точке среды результирующее колебание будет суммой колебаний, дошедших до этой точки, т.е. смещение точки среды от положения равновесия равно сумме смещений, производимых каждой из волн. Когда источники колеблются с одинаковой частотой, имеют одинаковые направления колебаний и постоянную разность фаз, они называются *когерентными*. В этом случае результирующее колебание в каждой точке среды имеет постоянную во времени амплитуду, зависящую от разности расстояний этой точки от источников колебаний. Результат сложения такого рода колебаний называется *интерференцией*.

Уравнение плоской волны, распространяющейся вдоль оси X слева направо:

$$\xi_{ЛЕВ}(x,t) = a\cos(\omega t - \kappa x).$$

Уравнение волны, идущей в обратном направлении – справа налево:

$$\xi_{ПР}(x,t) = a\cos(\omega t + \kappa x).$$

Складывая их и используя формулу преобразования суммы косинусов в произведение, получим

$$\xi(x,t) = \xi_{ЛЕВ}(x,t) + \xi_{ПР}(x,t) = 2a\cdot\cos\kappa x\cdot\cos\omega t. \qquad (9)$$

Возникшее колебание носит название *стоячей волны*. Множитель $\cos\omega t$ показывает, что все точки среды совершают колебания с той же частотой ω, что и колебания встречных волн.

Множитель $2a\cdot\cos\kappa x$ не зависит от времени. Он выражает амплитуду результирующего колебания в плоскости, имеющей координату x:

$$A = \left|2a\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\right| \qquad \left(\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}\right). \qquad (10)$$

Амплитуда максимальна в точках, в которых $\left|\cos(2\pi x/\lambda)\right| = 1$. Эти точки называются *пучностями* стоячей волны, для которых $A = 2a$. Их координаты найдем из условия $\frac{2\pi}{\lambda}x_n = \pm n\pi$ ($n=0\ ,1\ 2,...$ – целое число), откуда

$$x_n^{пучн} = \pm\, n\,\frac{\lambda}{2}\ . \qquad (11)$$

Расстояние между соседними пучностями составляет половину длины волны каждой из слагаемых волн:

$$x_{n+1}^{пучн} - x_n^{пучн} = \frac{\lambda}{2}.$$

Аналогично можно найти координаты точек, в которых результирующая амплитуда равна нулю. Эти точки называются *узлами* стоячей волны. Координаты узлов, согласно (10), найдем из условия $cos\left(2\pi x/\lambda\right)=0$ или $\frac{2\pi}{\lambda}x_n = \pm\left(2n+1\right)\frac{\pi}{2}$ где n – целое число, откуда

$$x_n^{узл} = \pm(2n+1)\frac{\lambda}{4}. \qquad (12)$$

Расстояние между соседними узлами тоже равно $\lambda/2$, а расстояние от узла до ближайшей пучности $\left(2n+1\right)\lambda/4 - - n\,\lambda/2 = \lambda/4$, т.е. узлы и пучности отстоят друг от друга на четверть длины волны.

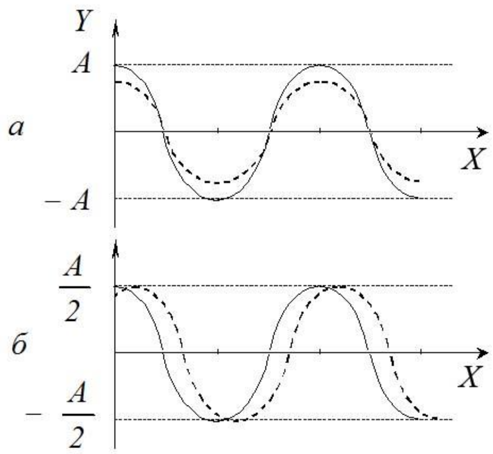

Рис.3.

На мгновенной фотографии стоячую волну невозможно отличить от волны, перемещающейся в пространстве, которую мы рассматривали выше и которую называют *бегущей*, чтобы отличить ее от волны стоячей. На рис.3,*а* изображена стоячая поперечная волна, а на рис.3,*б* – волна бегущая. Пунктиром обозначено расположение точек среды спустя малую долю периода колебаний. Из рисунка видно, что если при распространении бегущей волны амплитуды колебания всех точек среды одинаковы, то в стоячей волне разные точки имеют разные амплитуды.

В силу того, что амплитуда колебаний в узлах стоячей волны равна нулю, равен нулю и поток энергии через любой из них, поэтому стоячая волна не переносит энергии.

Поперечные стоячие волны возникают в струнах музыкальных инструментов – фортепьяно, скрипки, виолончели; продольные стоячие волны – в трубах духовых инструментов.

Шкала электромагнитных волн

Электромагнитные волны классифицируются по длине волны λ или связанной с ней частотой волны ν. *Спектром электромагнитных волн* называется полоса частот электромагнитных волн, существующих в природе.

Спектр электромагнитного излучения в порядке увеличения частоты составляют:

1) Радиоволны;
2) Инфракрасное излучение;
3) Световое излучение;
4) Рентгеновское излучение;
5) Гамма излучение.

Различные участки электромагнитного спектра отличаются по способу излучения и приёма волн, принадлежащих тому или иному участку спектра. По этой причине, между различными участками электромагнитного спектра нет резких границ.

Радиоволны изучает классическая электродинамика. Инфракрасное световое и ультрафиолетовое излучение изучает как классическая оптика, так и квантовая физика. Рентгеновское и гамма излучение изучается в квантовой и ядерной физике.

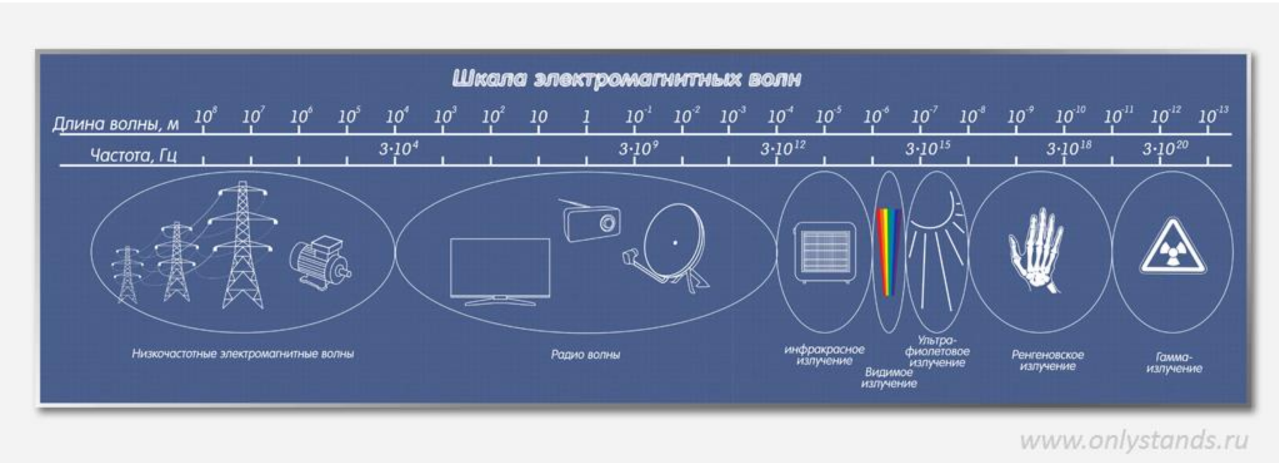

Рис.4.