

**Прочитайте вступление к учебной лекции.**

**Если читали ранее – можно пропустить этот блок информации.**

Учебная лекция в ДО – это учебный материал для конспектирования

Инструкция для работы с учебным материалом (для конспектирования):

1. Первый раз прочитайте всю лекцию, ничего не записывая.
2. Ответьте мысленно на вопрос, что главное в лекции, из скольких основных частей лекция состоит (*на сколько частей ее можно мысленно разбить*), придумайте название для каждой части – это будет план конспекта.
3. Откройте тетрадь для лекций и запишите в тетради тему, дату лекции и план конспекта.
4. Второй раз начинайте читать лекцию и приступайте к конспектированию: в соответствии с планом – в каждой части плана пишите определения величин, формулы законов, формулировки законов, делайте рисунки к разбираемым примерам или другому. Чем больше будет ваших записей, поясняющих о чем идет речь, тем лучше вы поймете и запомните учебный материал.

Внимание! Важно обращать внимание на то, что вы описываете – явление, закон, величину или другое понятие (например, модель объекта).

Руководствуйтесь правилами:

А) если описываете явление – запишите особенности рассматриваемого явления (*в чем заключается явление, каковы условия его возникновения, какие законы и величины используются для исследования явления*)

В) если описываете величину – запишите определение величины (*укажите физическая скалярная или векторная величина, формулу/ы для определения величины, единицу величины, поясните, что характеризует и, если векторная величина, то она как направлена*),

С) если описываете понятие (не величину) – запишите одно предложение, которое раскрывает смысл понятия (*для примера см. система отсчета, материальная точка, система материальных точек и др.*),

Д) если описываете закон – название, формулу, формулировку, физический смысл запишите закона. **Помните, что при записи формулы надо расшифровать названия величин, входящих в данную формулу.**

# ВОЛНЫ

## Волны. Классификации волн. Уравнение волны. Характеристики волн.

### Введение

Волны – это процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени. Природа волн может быть разной, так различают механические волны и электромагнитные волны.

Одно из основных свойств волн (волнового движения) заключается в том, что волны могут переносить энергию. Так, например, в механической упругой среде каждая частица среды колеблется в «своей» точке пространства, при этом частицы среды не переносятся – переносится в пространстве только энергия колебаний. Второй пример, распространение электромагнитных колебаний в пространстве сопровождается переносом электромагнитной энергии, а сам процесс распространения электромагнитных колебаний и есть электромагнитная волна. Волны, которые переносят энергию называют бегущими. Встречаются волны, которые не обладают данным свойством, такие волны называют стоячими.

К явлениям, в которых участвуют волны, то есть к волновым явлениям, относятся такие явления, как интерференция волн, дифракция волн, поляризация волн, дисперсия волн.

Какому закону подчиняется волновое движение? Это волновое уравнение или закон волнового движения, представленный в форме дифференциального уравнения второго порядка с частными производными. Данное уравнение указывает на то, что происходит волновое движение, при этом коэффициент в этом уравнении позволяет определить скорость распространения волны. Решение волнового уравнения предстает в виде уравнения волны, которое позволяет находить, в каком состоянии находится любая точка, вовлеченная в волновое движение. То есть оно позволяет определить смещение точки, участвующей в волновом движении, в момент времени  $t$  на расстоянии  $x$  от возмущения.

## Волны. Классификация волн

*Волна* – это процесс распространения возмущения (колебания) в пространстве с течением времени.

*Волновое движение* – это совокупность колебательных движений во всех точках пространства, до которых дошло возмущение.

Различают два вида волн (природа волн):

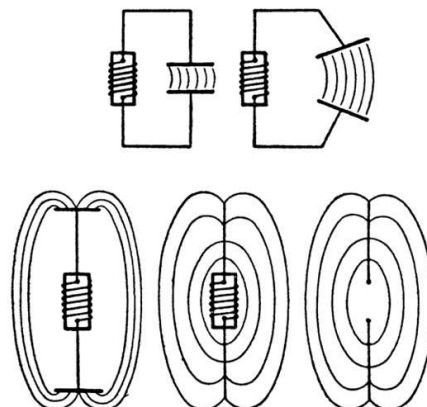
1) *механические волны* – распространение механического колебания (возмущения) в упругой среде, за счет упругих сил сцепления, в пространстве с течением времени. Каковы условия существования механической волны? Для существования механической волны необходимы вещество (упругая среда) и источник колебаний, то есть условием существования механических волн является наличие упругой среды и источника колебаний в ней. Колебания в упругой среде передаются с помощью сил сцепления частиц среды друг с другом, можно сказать, что упругие связи между частицами среды передают колебательное движение от частиц к частицам.

2) *электромагнитные волны* – распространение в пространстве электромагнитных колебаний (возмущений), при этом в качестве электромагнитного возмущения выступает переменное электромагнитное поле. Условия существования электромагнитной волны – наличие источника электромагнитного возмущения. В качестве такого источника выступает любое устройство, в котором существует ускоренное движение зарядов.

Проведите три мысленных эксперимента: первый – электрические заряды создают электрическое поле, второй – движущиеся электрические заряды создают магнитное поле, третий – движущиеся с ускорением электрические заряды создают электромагнитную волну.

## Открытый колебательный контур

Если раздвигать пластины конденсатора, интенсивность излучения электромагнитных волн в окружающее пространство будет возрастать, а замкнутый колебательный контур превратится в открытый.



**Рис.1. Преобразование закрытого колебательного контура в открытый колебательный контур (антенну).**

Таким образом, условием существования электромагнитных волн является наличие источника электромагнитных колебаний. Далее электромагнитная волна распространяется самостоятельно потому, что переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, а переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле.

**Вне зависимости от природы колебаний частота источника колебаний (возмущений) задает частоту колебаний всех точек, участвующих в волновом движении.**

По механизму проявления (по форме существования) различают:

1) *поперечные волны* – волны, колебания в которых происходят перпендикулярно направлению распространения волны. Примеры таких волн – электромагнитные волны и волны в твердом теле (рис.2);

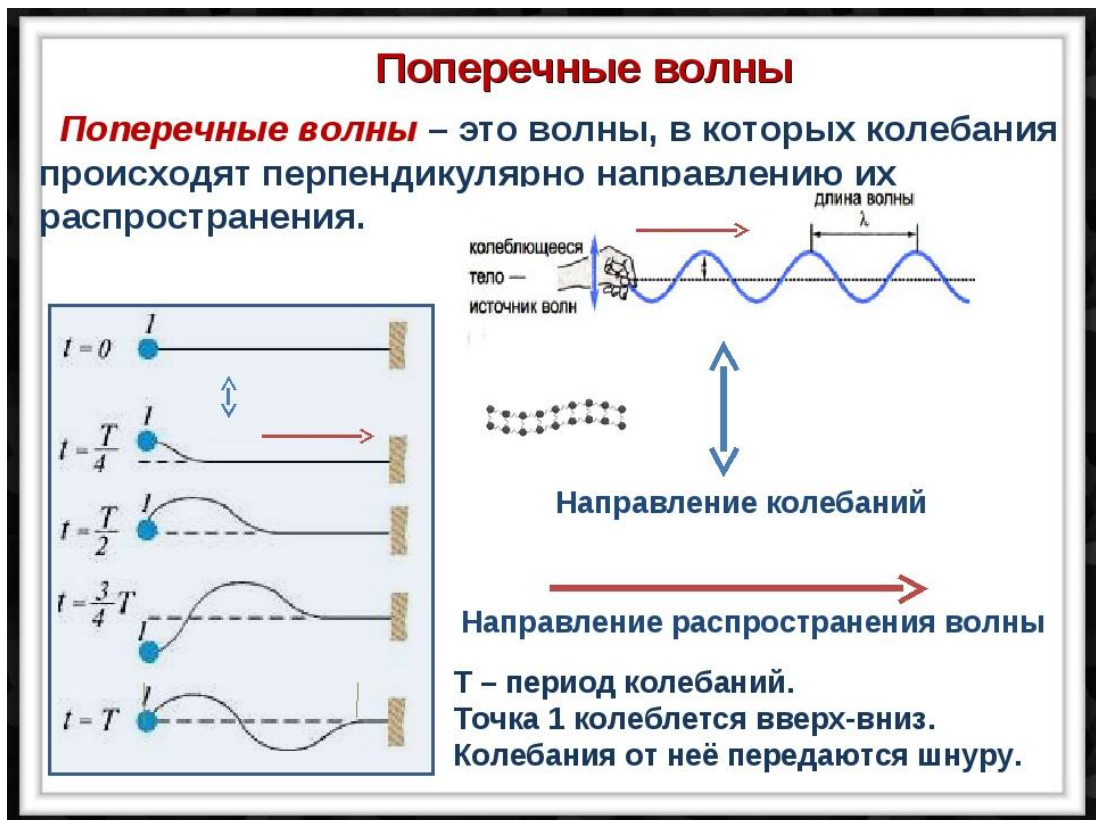
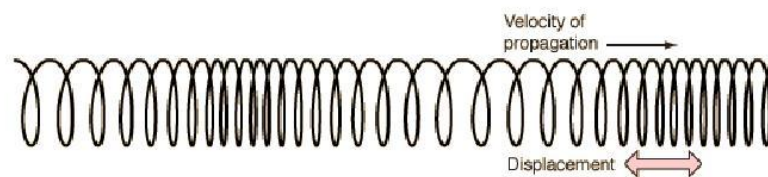


Рис.2. Пример поперечных волн и их структурное представление.

2) *продольные волны* – волны, колебания в которых происходят *вдоль* направления распространения волны. Примеры таких волн – волны в твердом теле, жидкости, газе (рис.3).

**Продольной** называют волну, в которой направления колебаний совпадают с направлением распространения волны.



Пример продольной волны: **звуковая волна в воздухе**

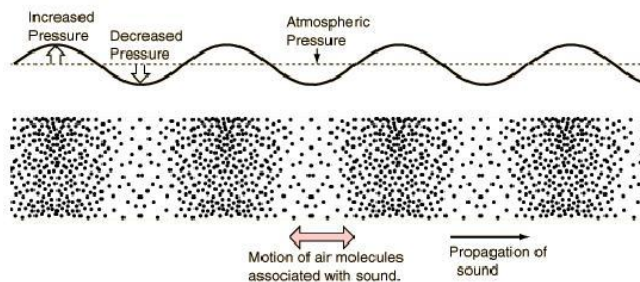


Рис.3. Пример продольных волн и их структурное представление.

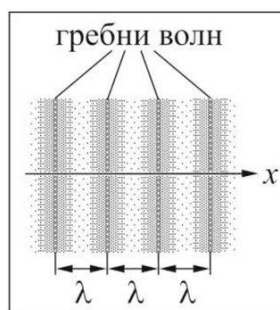
*Фронт волны* – совокупность точек пространства, до которых одновременно дошло возмущение, фронт волны делит пространство на 2 части: одна часть пространства – это та, до которой не дошло возмущение, поэтому они не вовлечены в волновое движение, вторая часть – пространство точек, вовлеченных в волновое движение.

По геометрической форме фронта волны различают:

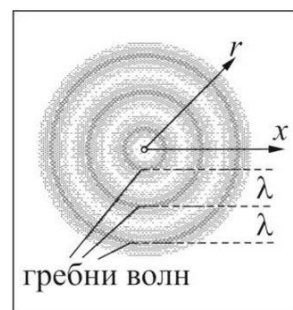
1. *Сферическая волна*, ее характеристики – фронт волны представляет собой сферу, она появляется в том случае, если источник колебаний – точечный.
2. *Плоская волна*, ее характеристики – фронт волны представляет собой плоскость, она появляется в том случае, если источник колебаний удален в бесконечность.
3. *Цилиндрическая волна*, ее характеристики – фронт волны представляет собой цилиндр, она появляется в том случае, если источник колебаний – линейный (нитевидный).

Уравнения сферической, плоской, цилиндрической волны будут отличаться друг от друга, но метод исследования или описания волн будет одинаковым.

## Изображение плоской и сферической ВОЛН



**Плоская продольная волна**



**Сферическая продольная волна**

$x, r$  – направления распространения волн

#### Рис.4. Примеры плоской и сферической волн.

*Волновая поверхность* – совокупность точек, участвующих в волновом движении, колеблющихся в одной фазе.

Фронт волны всегда один, волновых поверхностей – множество.

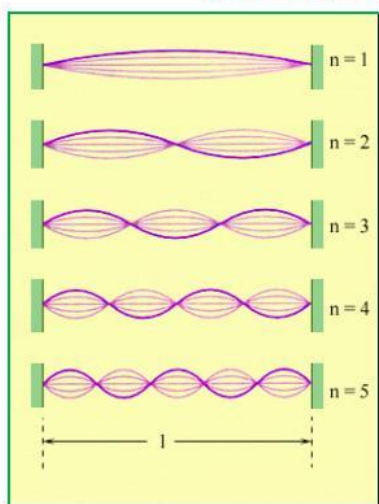
Как правило, в волновом движении осуществляется перенос энергии. Но есть случаи, когда переноса энергии не происходит и существование волнового движения обеспечивается, например, для механической волны постоянным переходом потенциальной энергии колебаний в кинетическую энергию на всем протяжении волнового движения. Поэтому различают:

*Бегущая волна* – волна, которая переносит энергию в каком-либо направлении в пространстве.

*Стоячая волна* – волна, которая не переносит энергию в пространстве. Она возникает в результате наложения прямой и обратной волн, сдвинутых по отношению друг к другу на  $\pi/2$ , за счет чего и происходит усиление амплитуды волны в одних областях пространства и уменьшение в других.

#### Стоячие волны в закрепленной на обоих концах натянутой струне

Стоячая волна в струне возникает в том случае, если длина струны равняется целому числу полуволн.



$$l = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda_n = \frac{2l}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

#### Собственные частоты (нормальные моды)

$$v_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2l} n$$

$n = 1$  – основная частота  
 $n > 1$  – гармоники

Рис.5. Примеры стоячих волн.



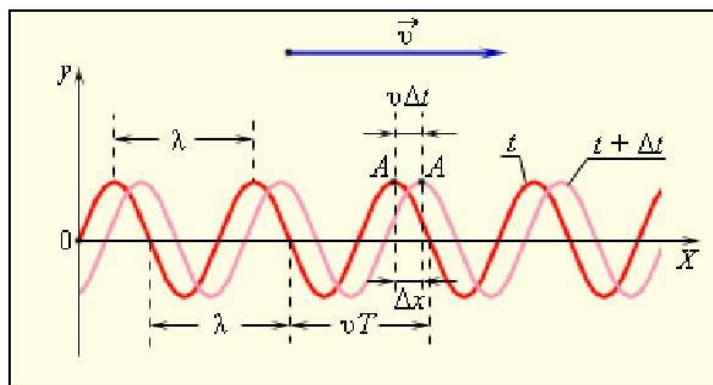
## Характеристики волны

Рассмотрим уравнение волны и характеристики волн на примере плоской волны (рис.6).

### Уравнение плоской волны

Выражение  $S = A \sin(\omega t - kx)$

является математическим описанием синусоидальной волны движущейся вдоль оси  $x$  вправо, оно определяет смещение волны  $S$  в любой момент времени  $t$ .



**Рис.6. К выводу уравнения плоской волны.**

Запишем уравнение свободных колебаний для первой колеблющейся точки, находящейся в точке с координатой  $x = 0$ , для момента времени  $t_1$ :

$$\xi_1 = \xi_0 \cdot \sin(\omega t_1 + \varphi_0)$$

Рассмотрим, что происходит с колебаниями в точке, отстоящей от первой точки на расстояние  $\Delta x$ . Колебания придут в эту вторую точку с запаздыванием, это запаздывание по времени зависит от величины  $\Delta x$  и от скорости передачи энергии от первой точки ко второй  $V$ , то есть от фазовой скорости волны:

$$t_2 = t_1 - \frac{\Delta x}{V} \quad (*)$$

Здесь  $\frac{\Delta x}{V}$  – это время запаздывания колебаний во второй точке.

Если в уравнении свободных колебаний заменить время  $t_1$  на время  $t_2$ , то можно определить, что происходит в точке, отстоящей от первой на расстояние  $\Delta x$  в момент времени  $t_2$ :



$$\xi_2 = \xi_0 \cdot \sin(\omega t_2 + \varphi_0)$$

Используем равенство (\*):

$$\xi_2 = \xi_0 \cdot \sin\left(\omega\left(t_1 - \frac{\Delta x}{V}\right) + \varphi_0\right)$$

Раскроем скобки:

$$\xi_2 = \xi_0 \cdot \sin\left(\omega t_1 - \frac{\omega}{V} \Delta x + \varphi_0\right)$$

Перепишем последнее уравнение, обобщив его для любого момента времени  $t$  и для любой координаты  $x$ :

$$\xi = \xi_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{V} x + \varphi_0\right)$$

И заменим  $k = \frac{\omega}{V}$ , получим

$\xi = \xi_0 \cdot \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$  – уравнение плоской волны для любого момента времени  $t$  и для любой координаты  $x$ .

Рассмотрим характеристики волны, входящие в данное уравнение.

В уравнении плоской волны  $\xi_0$  – *амплитуда волны*, которая всегда показывает максимальное отклонение колеблющейся величины от состояния равновесия, взятое по модулю:

$$\xi_0 = |\xi_{max}|,$$

единица измерения амплитуды волны зависит от природы волны.

*Циклическая частота волны* – физическая величина, скалярная, численно равная числу полных колебаний за  $2\pi$  секунд каждой точки волны, участвующей в волновом процессе  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Единица величины – 1 рад/с.

*Частота волны (частота колебаний всех точек волны)* – физическая величина, скалярная, численно равная числу полных колебаний за 1 секунду каждой точки волны, участвующей в волновом процессе  $\nu = \frac{1}{T}$ . Единица величины – 1 Гц = 1 с<sup>-1</sup>.

участвующей в волновом процессе  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Единица величины – 1 рад/с.

*Период волны (период колебаний—всех точек волны)* – физическая величина, скалярная, численно равная времени одного полного колебания каждой точки волны, участвующей в волновом процессе, период – наименьшее время, через которое точка волны периодически оказывается в том же положении, что и период назад, то есть выполняется условие  $\xi(t) = \xi(t+T)$ . Единица величины – 1 с.

*Фаза волны* – физическая величина, скалярная, показывает этап развития колебательного процесса в исследуемой точке волны, численно равная  $\Phi = \omega t - kx + \varphi_0$

Единица величины – 1 рад.

*Фазовая скорость волны* – это физическая величина, векторная, является скоростью распространения фазы волны, скоростью переноса энергии волны, характеризует быстроту распространения волны в пространстве с течением времени. Поскольку фазовая скорость волны – это скорость распространения ее фазы, то она находится из уравнения-определения фазы волны при дифференцировании его и равенстве полученного уравнения нулю (ищем скорость – берем производную по времени). Получим, фазовая скорость численно равна  $V = \frac{\omega}{k}$ .

Единица величины – 1 м/с.

Скорость механических волн зависит от упругих свойств связей, существующих в среде, и от инертных свойств среды в ее локальных точках. Скорость электромагнитных волн в вакууме ни от чего не зависит и численно равна  $V=c$ ,  $c=3 \cdot 10^8$  м/с.

*Волновой вектор* – физическая величина, векторная, направление вектора в исследуемой точке волны перпендикулярно фронту волны, модуль волнового вектора называют волновым числом,. Волновое число показывает, сколько длин волн укладывается на отрезке  $2\pi$  м.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad , \quad [k] = 1\text{ м}^{-1}$$

Длина волны – физическая величина, скалярная, численно равна расстоянию, пройденному волной за один период:

$$\lambda = V \cdot T, \quad [\lambda] = 1\text{ м.}$$

Здесь  $T$  – период волны (с),  $V$  – фазовая скорость волны (м/с).

Из определений длины волны  $\lambda = VT$  и частоты волны  $\nu = \frac{1}{T}$  можно найти связь между длиной волны и частотой волны  $\lambda \cdot \nu = V$ . В этой формуле отражено одно важное свойство волны: если скорость – величина постоянная, то чем больше частота волны, тем меньше длина волны, и наоборот, чем меньше частота волны, тем больше длина волны, то есть они связаны друг с другом.

ДЗ. Перечислите и выучите основные характеристики волны (амплитуду, частоту, период, циклическую частоту, фазу, начальную фазу, длину волны, волновой вектор, волновое число), а также научитесь записывать и пояснять уравнение плоской волны, которое имеет вид  $\xi = \xi_0 \cdot \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$

Для графического представления волны необходимы 2 графика. Рассмотрим графики на следующей лекции.