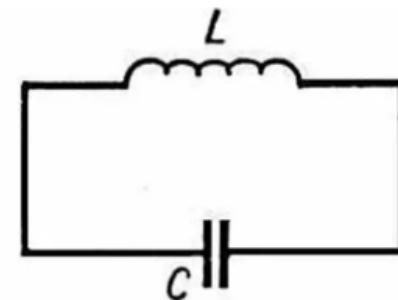
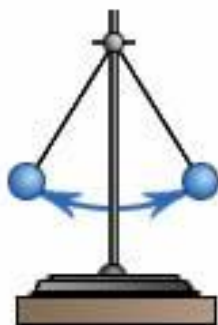
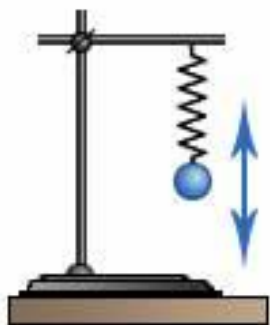


ВОЛНЫ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Волной называют процесс распространения колебаний в пространстве.

Колебания - это движения или процессы, которые повторяются с течением времени.

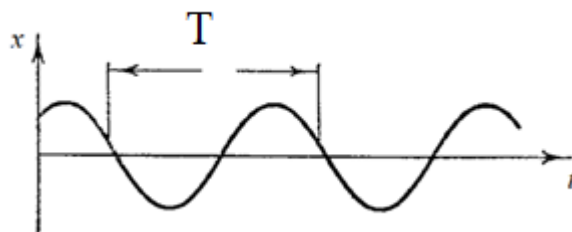


Системы, совершающие **механические колебания**

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \rightarrow \text{начальная фаза}$$

амплитуда

фаза колебаний



Колебательный контур
(идеальный)

$$q = q_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$I = I_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

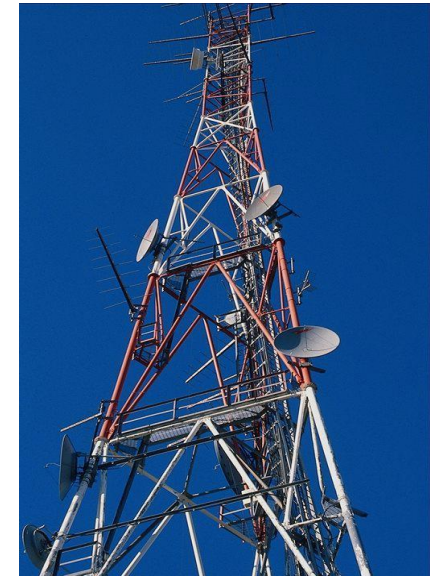
$$U = U_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$



Волны

Упругие

Электромагнитные



Упругие волны

Упругой волной называют процесс распространения механических колебаний в упругой среде.

Упругие волн

продольные

В продольных волнах частицы среды колеблются в направлении распространения волны.

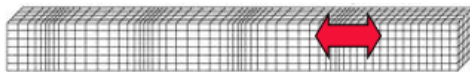


Продольные волны могут распространяться как **в твердых телах**, так и **в газах и жидкостях**

Направление распространения волны



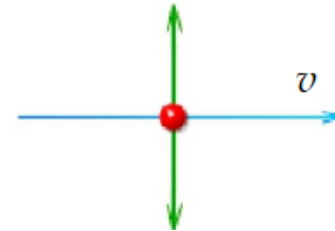
Продольные волны



Направление колебания частиц среды

поперечны

В поперечных волнах частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны.

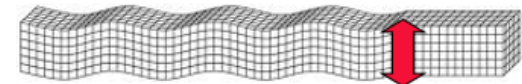


Поперечные волны распространяются **только в твердых телах**.

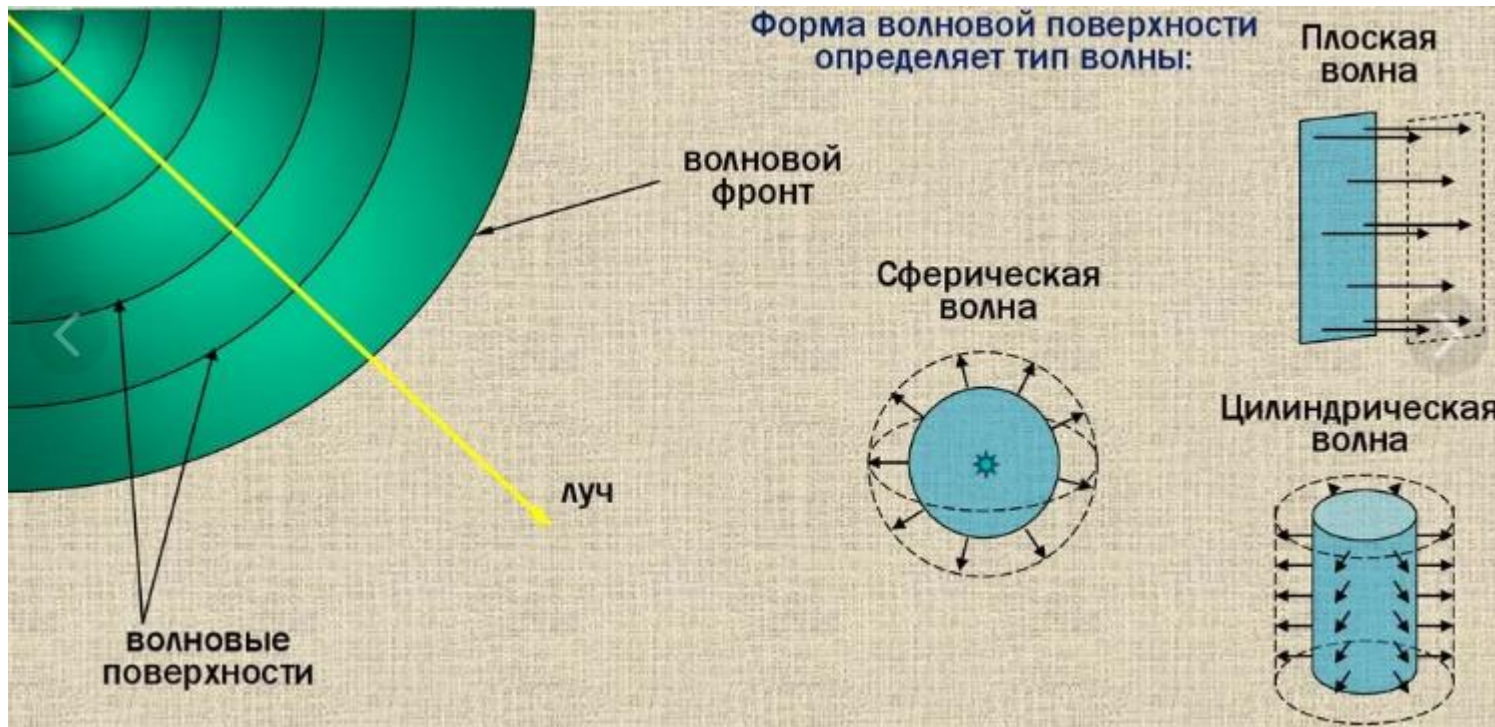
Направление распространения волны



Поперечные волны



Направление колебания частиц среды



Волновой фронт - геометрическое место точек, до которых доходят колебания к некоторому моменту времени t .

Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется **волновой поверхностью**.

В зависимости от формы волновой поверхности различают **плоские** и **сферические** волны.

Характерной особенностью всех волн является перенос энергии без переноса вещества.

Волны, которые переносят в пространстве энергию, называют **бегущими волнами**.

Уравнение плоской бегущей волны

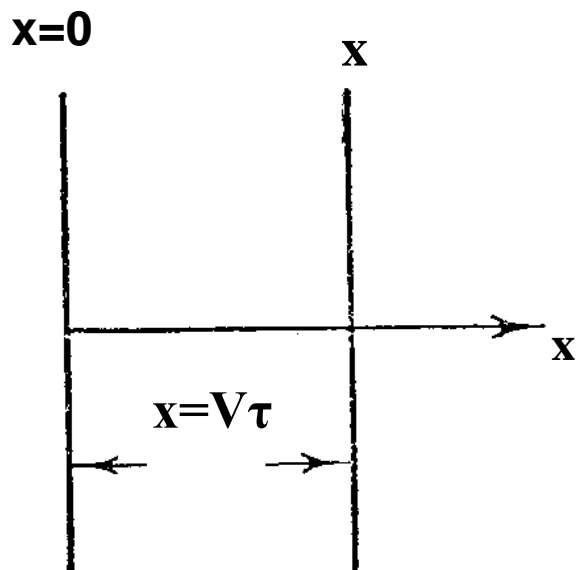
Уравнение волны представляет собой выражение, которое описывает смещение колеблющейся частицы как функцию ее координат и времени

$$\xi = \xi(x, y, z, t)$$

ξ греч. «кси»

Пусть волна распространяется в направлении оси X . Тогда $\xi = \xi(x, t)$.
 Если источник колебаний находится в плоскости $x=0$, то

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



Колебания частиц в плоскости x описываются тем же законом (1), но эти колебания запаздывают по сравнению с колебаниями в плоскости $x=0$ на время

$$\tau = \frac{x}{V}$$

V - скорость распространения волны
 x - расстояние до источника колебаний

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

$$\xi(x, t) = A \cos \omega\left(t - \frac{x}{V}\right) \quad \text{- уравнение плоской бегущей волны} \quad (2)$$

$$\omega t - \omega \frac{x}{V} = \omega t - \frac{2\pi}{T} \frac{x}{V} = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x$$

$$\lambda = VT \quad - \text{длина волны}$$

V - фазовая скорость волны

Длиной волны называют расстояние, пройденное волной за время одного периода колебаний.

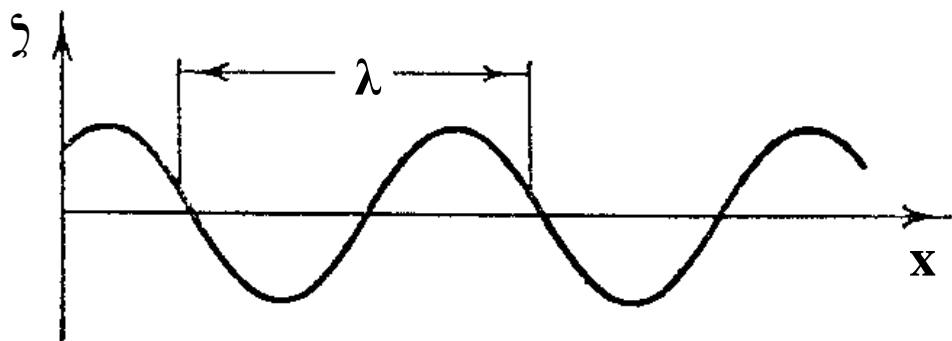
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad - \text{волновое число}$$

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \quad - \text{уравнение плоской бегущей волны} \quad (3)$$

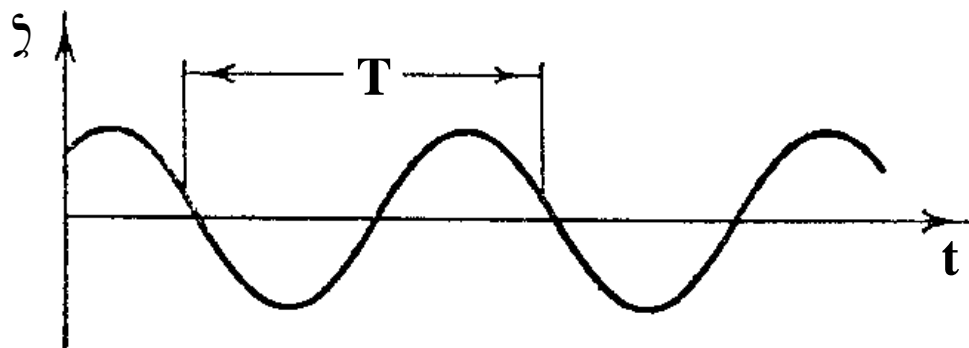
$\xi(x, t)$ - смещение от положения равновесия точки с координатой x в момент времени t

A – амплитуда волны

$(\omega t - kx)$ - фаза волны



ζ представляют собой смещения всех точек среды в определенный момент времени t



ζ представляют собой смещение точки, имеющей координату x , в различные моменты времени

ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ

Уравнение любой волны является решением дифференциального уравнения, называемого **волновым уравнением**:

$$\Delta \xi = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (4)$$

где

$$\Delta \xi = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}$$

Для плоских волн распространяющихся вдоль оси x **волновое уравнение** может быть записано в виде

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (5)$$

Перенос энергии волной

Перенос энергии волной количественно характеризуют **вектором плотности потока энергии**. Для упругих волн этот вектор называют **вектором Умова**.

Направление **вектора Умова** совпадает с направлением переноса энергии, а его модуль равен энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

$$J = wV \quad - \text{модуль вектора Умова}$$

$$w = \frac{\rho \omega_0^2 A^2}{2} \quad - \text{объемная плотность энергии упругой волны}$$

Интерференция волн

Волны называются **когерентными**, если разность их фаз остается постоянной во времени.

Когерентными могут быть только волны одинаковой частоты.

При сложении **когерентных** волн возникает явление **интерференции**, заключающееся в том, что колебания в одних точках усиливают, а в других точках ослабляют друг друга.

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$$

-условие наблюдения интерференционного максимума

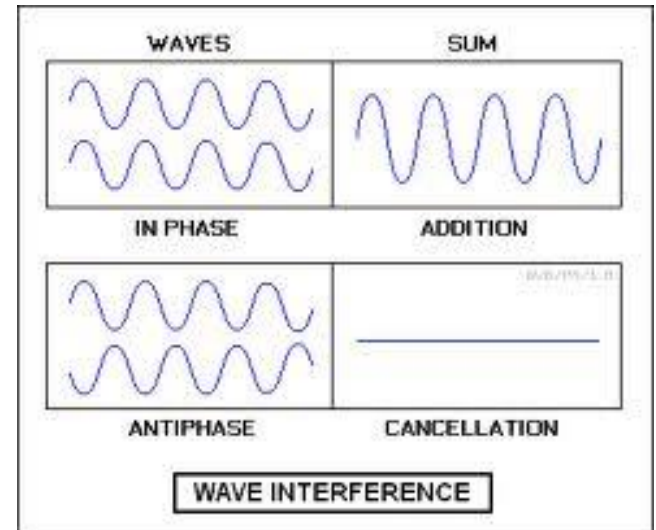
$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

-условие наблюдения интерференционного минимума

Δ - разность хода волн

$m = 0, 1, 2, \dots$ - порядок (номер) максимума или минимума

λ - длина волны



Стоячие волны

Особым случаем интерференции являются **стоячие волны**.

Стоячие волны – это волны, образующиеся при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами.

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$$

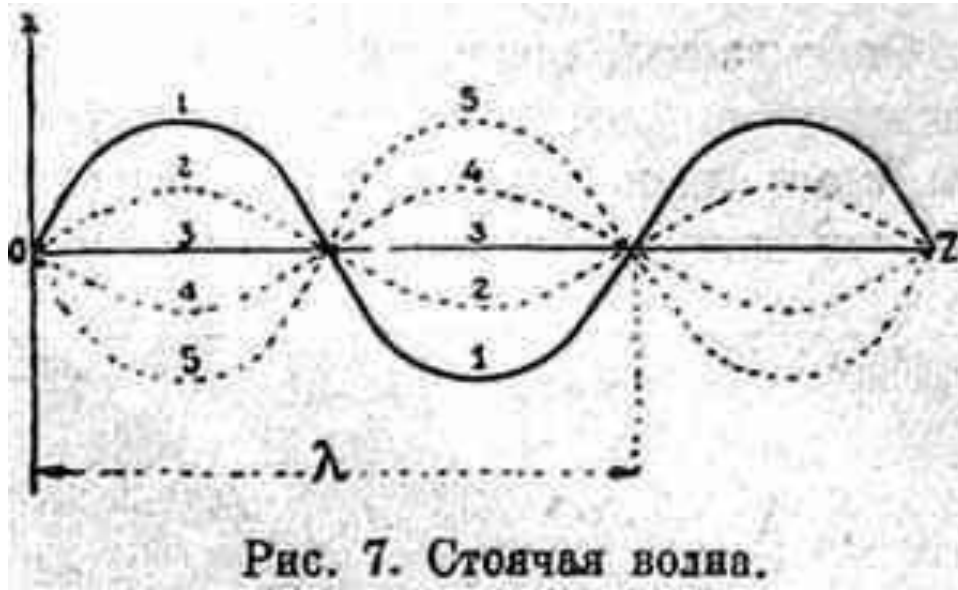
$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t + kx)$$

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos(2\pi x / \lambda) \cos \omega t \quad \text{- уравнение стоячей волны}$$

$$A_{cm} = |2A \cos(2\pi x / \lambda)| \quad \text{- амплитуда стоячей волны}$$

Точки, в которых $A_{cm} = 0$, называют узлами стоячей волны

Точки, в которых $A_{cm} = 2A$, называют пучностями стоячей волны



$$x_{\text{узл}} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2} \quad - \text{ координаты узлов}$$

$$x_{\text{п}} = \pm m \frac{\lambda}{2} \quad - \text{ координаты пучностей:}$$

$$m=0, 1, 2, \dots$$

Расстояния между **двумя соседними узлами** и **двумя соседними пучностями** одинаковы и равны $\lambda/2$.

Расстояние между соседними **узлом и пучностью** равно $\lambda/4$.

Электромагнитные волны



Джеймс Клерк Максвелл

(1831-1879)

Существование электромагнитных волн следует из уравнений Максвелла. Дж. Максвелл в 1864 г. создал **теорию электромагнитного поля**, согласно которой электрическое и магнитное поля существуют как взаимосвязанные составляющие единого целого — электромагнитного поля.

Теория электромагнитного поля Максвелла основана на следующих положениях:

1. Всякое изменение магнитного поля создает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле (рис. 1.1а).

2. Всякое изменение электрического поля возбуждает в окружающем пространстве вихревое магнитное поле (рис. 1.1б).

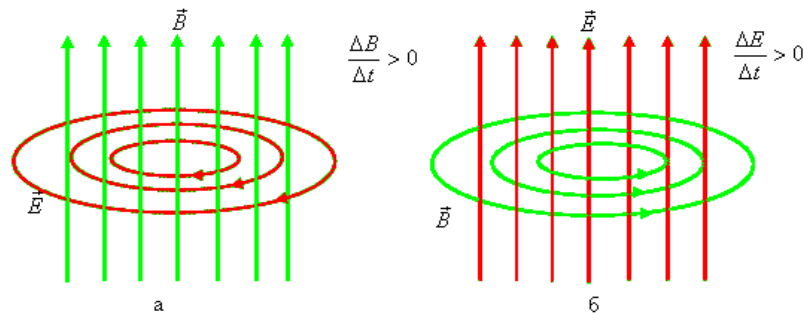
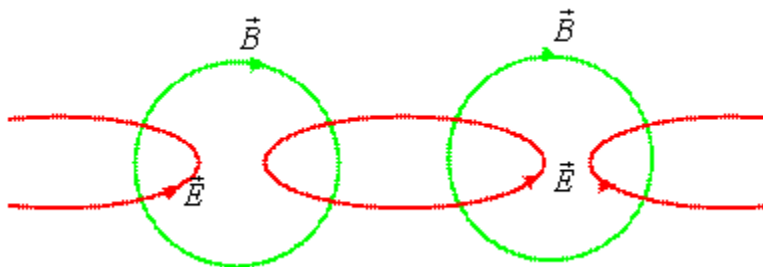


Рис. 1.1

В результате в пространстве возникает **единое электромагнитное поле**.

3. Если возбудить с помощью колеблющихся зарядов переменное электрическое или магнитное поле, то в окружающем пространстве возникает последовательность взаимных превращений электрических и магнитных полей, распространяющихся от точки к точке.

Этот процесс является периодическим во времени и пространстве и представляет собой **электромагнитную волну**.



Электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с течением времени, называется электромагнитной волной (ЭМВ).

Из уравнений Максвелла можно получить:

$$\Delta \vec{E} = \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (6)$$

$$\Delta \vec{H} = \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (7)$$

для механических волн

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

(6) и (7) – **волновые уравнения ЭМВ**.

\vec{E} - напряженность электрического поля; \vec{H} - напряженность магнитного поля
 ε - диэлектрическая проницаемость; μ - магнитная проницаемость

$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - электрическая постоянная

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнитная постоянная

$$V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} \text{ - фазовая скорость ЭМВ} \quad (8)$$

В вакууме $\varepsilon=1$ и $\mu=1$

$$V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = c$$

$c = 3 \times 10^8 \text{ м/с}$ - скорость света в вакууме

Скорость ЭМВ в вакууме равна скорости света.

В среде

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

или

$$V = \frac{c}{n}$$

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}$$

-показатель преломления среды

Уравнение плоской монохроматической ЭМВ

Из уравнений Максвелла следует:

1. ЭМВ – поперечные волны:

$$\vec{E} \perp \vec{H}$$

\vec{E} и \vec{H} перпендикулярны направлению распространения волны.

2. Колебания электрических и магнитных векторов в ЭМВ происходят с одинаковыми фазами.

3. Амплитуды электрических и магнитных векторов связаны соотношением

$$E_m \sqrt{\epsilon\epsilon_0} = H_m \sqrt{\mu\mu_0}$$

Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси ОХ :

$$E_y = E_{\max} \cos(\omega t - kx) \quad - \text{решение волнового уравнения для } E \quad (9)$$

$$H_z = H_{\max} \cos(\omega t - kx) \quad - \text{решение волнового уравнения для } H \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) являются уравнениями плоских электромагнитных волн

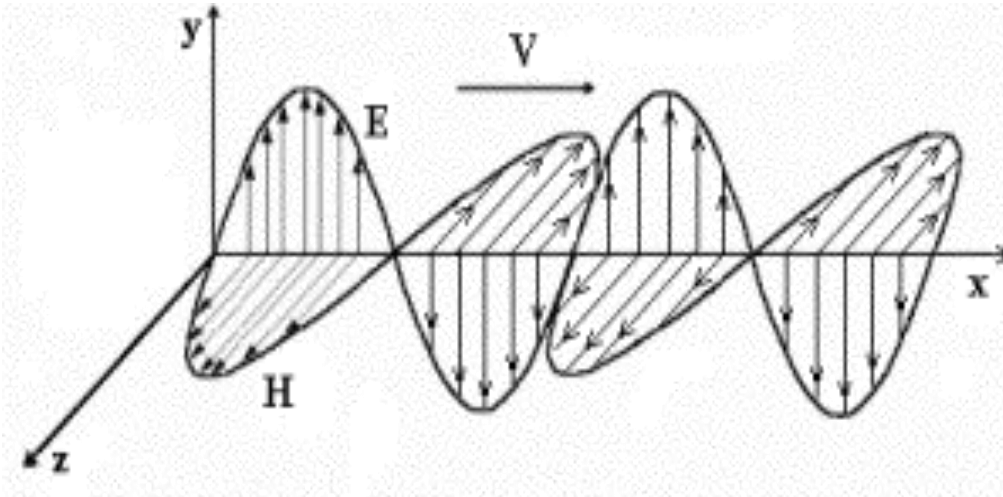
E_{\max} - амплитудное значение напряженности электрического поля

H_{\max} - амплитудное значение напряженности магнитного поля

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число

λ - длина волны

ω - циклическая частота



«Мгновенная фотография» плоской электромагнитной волны.

Вектор Пойнтинга

Распространение электромагнитных волн сопровождается переносом в пространстве энергии электрического и магнитного полей.

Перенос энергии ЭМВ характеризует вектор плотности потока энергии или **вектор Пойнтинга**

$$\vec{S} = w\vec{v}$$

$$w = w_{эл} + w_{м} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} \quad - \text{объемная плотность переносимой энергии}$$

Учитывая, что $E \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = H \sqrt{\mu\mu_0}$

$$w_{эл} = w_{м}$$

Получим $w = \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0} EH = \frac{EH}{v}$

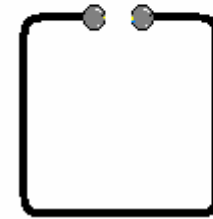
$$S = \frac{EH}{v} v = EH \quad - \text{модуль вектора Пойнтинга}$$

$$\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}] \quad - \text{вектор Пойнтинга}$$

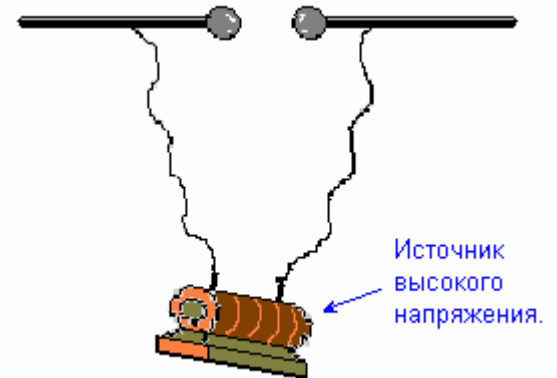
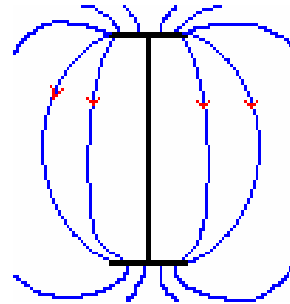
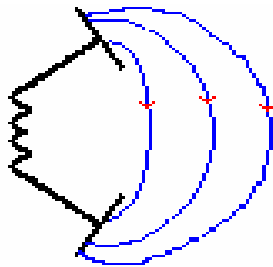
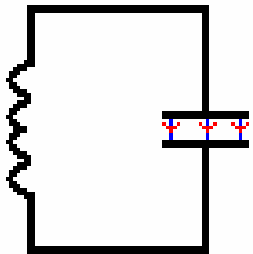
Вектор Пойнтинга направлен в сторону распространения электромагнитной волны, а его модуль равен *энергии, переносимой ЭМВ за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.*



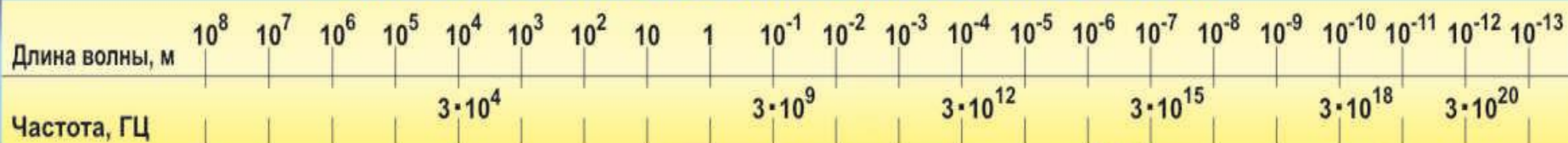
В 1888г. Г.Герц экспериментально *доказал существование электромагнитных волн*



Колебательный контур (закрытый) — цепь, состоящая из последовательно включенных катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью C .



ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН



НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ



РАДИОВОЛНЫ



ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В
И
Д
И
М
О
С
Т
Ь



УЛЬТРА-ФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ