

# КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



## ОГЛАВЛЕНИЕ

## Механические и электромагнитные колебания

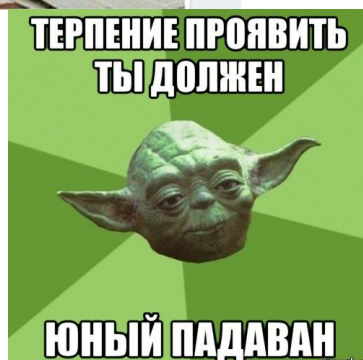
|   |    |
|---|----|
| Маятники  | 2  |
| Гармоническое колебание и его характеристики                                  | 5  |
| Кинематика механических колебаний   | 6  |
| Динамика механических колебаний   | 6  |
| Законы сохранения энергии при гармонических колебаниях                        | 7  |
| Дифференциальное уравнение свободных колебаний и его решение                  | 10 |
| Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение.               | 12 |
| Явление резонанса. Резонансные кривые   | 13 |
| Страничка будущего танкиста   | 16 |
| Схема решения задач по механическим и электромагнитным колебаниям             | 17 |
| Механические и электромагнитные волны   | 18 |
| Основное свойство всех видов волн   | 19 |
| Уравнение плоской бегущей незатухающей гармонической волны                    | 20 |
| Уравнение сферической бегущей гармонической волны                             | 20 |
| Основные характеристики волны   | 21 |
| Скорость распространения волны  | 21 |
| Дифференциальное уравнение волны (волновое уравнение)                         | 22 |
| Связь между разностью фаз колебаний двух точек волны и расстоянием между ними | 22 |
| Стоячие волны   | 23 |
| Страничка красоты   | 24 |
| Звук  | 25 |
| Основные характеристики звука   | 26 |
| Свет  | 30 |
| Отель под водой   | 32 |
| Шкала электромагнитных волн   | 33 |
| Страничка будущего моряка   | 35 |
| Свадебные платья (девчатам на заметку)  | 36 |
| Схема решения задач по механическим и электромагнитным волнам                 | 37 |
| Гимнастика для ума  | 37 |
| Страничка путешественника   | 38 |
| Полезные страницы в интернете   | 41 |



## ПРИВЕТ!

Я твой новый куратор в игре  
«Зелёный дух».

Твоё первое задание – прийти  
завтра вовремя на первую пару!



Да пребудет с тобой Сила

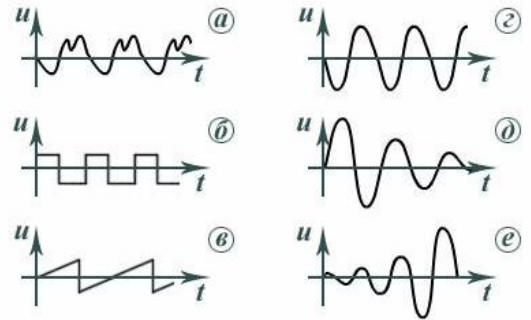
Если человек колеблется – отойдите.  
 Пусть придет в равновесие.  
 Иначе вам придется колебаться вместе.  
 Войдете в резонанс и заколебаетесь оба.

**Колебаниями** называются движения или процессы, характеризующиеся определенной повторяемостью во времени.

**Механическими колебаниями** называются механические движения тела, повторяющиеся с течением времени.

(например, колебания маятника, биение сердца и т.п.)

**Электромагнитными колебаниями** называются повторяющиеся со временем изменения электрического и магнитного полей, происходящие в колебательном контуре.



### Маятники

Маятником называется твёрдое тело, совершающее механические колебания около неподвижной оси. Например:

- математический маятник,
- физический маятник,
- пружинный маятник,
- оборотный маятник и др.

**Периодом колебаний**  $T$  (тэ) называется время одного полного колебания (то есть это время, через которое система возвращается в исходное состояние).

$[T] = c$ , секунда.

Если сил трения и сопротивления в системе нет, то период колебаний  $T$  можно определить по следующим формулам.

### Математический маятник

**Математическим маятником** называется идеализированная система, состоящая из материальной точки массой  $m$ , подвешенной на невесомой нерастяжимой нити, совершающей колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести.

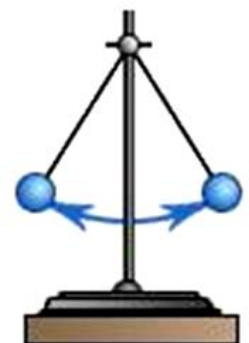
(хорошим приближением математического маятника является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} - \text{период колебаний математического маятника,}$$

где

$l$  - длина нити маятника,  $m$ ;

$g$  - ускорение свободного падения,  $\frac{m}{c^2}$ .



### Пружинный маятник

**Пружинным маятником** называется система, состоящая из груза массой  $m$ , прикрепленного к абсолютно упругой невесомой пружине, совершающего колебания под действием упругой силы вида  $F = -kx$ ,

где  $k$  - коэффициент жёсткости пружины,  $[k] = \frac{H}{M}$ ;

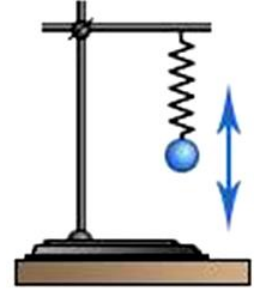
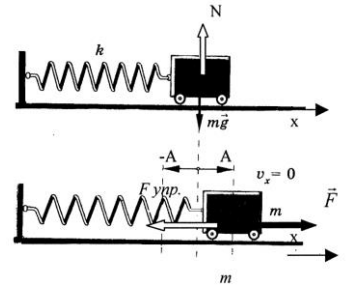
$x$  - величина деформации пружины, м.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} - \text{период колебаний пружинного маятника,}$$

где

$k$  - коэффициент жёсткости пружины,  $\frac{H}{M}$ ;

$m$  - масса груза, кг.



### Физический маятник

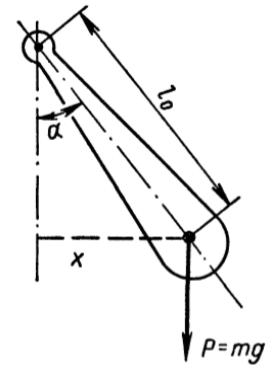
**Физическим маятником** называется твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания в вертикальной плоскости вокруг неподвижной горизонтальной оси, не проходящей через центр масс тела.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} - \text{период колебаний физического маятника,}$$

где  $l$  - расстояние от центра масс маятника  $C$  до оси качания  $O$ , м;

$I$  - момент инерции маятника относительно оси качания,  $кг \cdot м^2$ ;

$g$  - ускорение свободного падения,  $\frac{M}{с^2}$ ;  $m$  - масса маятника, кг.



### Оборотный маятник

**Оборотным маятником** называется массивное твёрдое тело с двумя перемещающимися вдоль оси маятника трехгранными ножами, способное совершать колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести вокруг каждого из ножей (см. рис 1).

(Оборотный маятник используется для экспериментального определения ускорения свободного падения).

**Приведенной длиной оборотного маятника  $L$**  называется длина такого математического маятника  $l_{\text{математического}}$ , период колебаний которого равен периоду колебаний данного физического маятника, то есть  $L = l_{\text{математического}}$ .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} - \text{период колебаний оборотного маятника,}$$

где  $L = \frac{T^2}{4\pi^2} g$  - приведённая длина оборотного маятника, м.

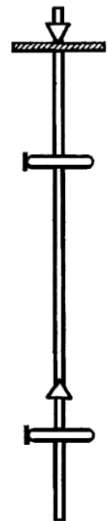
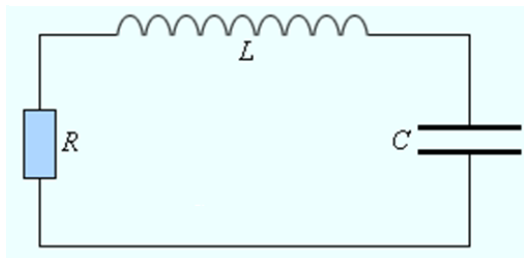


рис. 1

### Колебательный контур

**Колебательным контуром** называется электрическая цепь, состоящая из конденсатора ёмкостью  $C$ , катушки индуктивностью  $L$  и резистора сопротивлением  $R$ .

Различают *реальный* и *идеальный* колебательный контур.



- В реальном контуре сопротивление не равно нулю, то есть  $R \neq 0$ .
- В идеальном контуре сопротивление равно нулю, то есть  $R = 0$ .

В колебательном контуре совершают колебания:

1. энергия электрического поля конденсатора  $W_{ЭП}$  и энергия магнитного поля катушки  $W_{МП}$ ,
2. заряд  $q$  и напряжение  $u$  на конденсаторе,
3. сила тока  $i$  в цепи.

Если конденсатор зарядить и замкнуть на катушку, то по катушке потечет ток разряда конденсатора. Сила тока не сразу достигает максимального значения, а увеличивается постепенно. Это обусловлено явлением самоиндукции в катушке.

В момент, когда конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля конденсатора станет равной нулю. Энергия же тока (энергия магнитного поля катушки) согласно закону сохранения энергии будет максимальной. Следовательно, в этот момент сила тока также достигнет максимального значения

Несмотря на то что к этому моменту разность потенциалов на концах катушки становится равной нулю, электрический ток не может прекратиться сразу. Этому препятствует явление самоиндукции. Как только сила тока и созданное им магнитное поле начнут уменьшаться, возникает вихревое электрическое поле, которое направлено по току и поддерживает его.

Индукционный ток, в соответствии с правилом Ленца, теперь будет течь в ту же сторону что и спадающий ток разряда конденсатора и перезарядит конденсатор.

В результате конденсатор перезаряжается до тех пор, пока ток, постепенно уменьшаясь, не станет равным нулю.

Энергия магнитного поля в этот момент также будет равна нулю, а энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной.

Когда ток прекратится, процесс повторится в обратном направлении.

Электромагнитные колебания в колебательном контуре сопровождаются взаимными превращениями электрического и магнитного полей.

В реальном колебательном контуре свободные электромагнитные колебания будут затухающими из-за потерь энергии на нагревание проводов.

- **Период электромагнитных колебаний** в реальном колебательном контуре можно определить по формуле:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)^2 - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}},$$

где  $R$  - активное сопротивление контура, Ом,

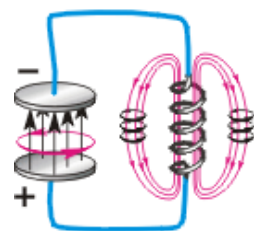
$L$  (эль) - индуктивность контура (это индуктивность катушки), Гн, Генри;

$C$  (цэ) - ёмкость контура (электрическая ёмкость конденсатора), Ф, Фарад;

$\omega$  (омега) - циклическая частота затухающих колебаний;

$\omega_0$  - собственная циклическая частота (частота незатухающих колебаний), рад;

$\beta$  (бэта) - коэффициент затухания,  $\frac{1}{c}$ .



- **Период электромагнитных колебаний** в идеальном колебательном контуре можно определить по формуле Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

где  $L$  (эль) - индуктивность контура (это индуктивность катушки),  $Гн$ , Генри;  
 $C$  (цэ) – ёмкость контура (электрическая ёмкость конденсатора),  $Ф$ , Фарад;

### Гармоническое колебание и его характеристики

**Гармоническими** называются колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса или косинуса:

$$\begin{aligned} x &= A\cos(\omega_0 t + \varphi) \\ \text{или} \\ x &= A\sin(\omega_0 t + \alpha), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$x$  (икс) - колеблющаяся величина (например, смещение маятника, заряд или напряжение на конденсаторе, сила тока в цепи и т.п.),

$A$  - амплитуда колебания (то есть максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия),

$\omega_0$  (омега нулевое) - круговая или циклическая частота колебаний,  $\frac{рад}{с}$  (радиан в секунду);

$\varphi$  (фи) (или  $\alpha$  (альфа)) - начальная фаза колебания (это фаза колебания в начальный момент времени  $t = 0с$ ),

$[\varphi] = рад$  (радиан);

(начальная фаза колебания определяет значение колеблющейся величины в момент времени  $t = 0с$ ),

$\Phi = (\omega_0 t + \varphi)$  - фаза колебаний в произвольный момент времени  $t$ ,  $рад$  (радиан).

(фаза колебания определяет значение колеблющейся величины в данный момент времени  $t$ ).

**Периодом колебания**  $T$  называется наименьший промежуток времени, через который колебания в точности повторяются.

$[T] = с$ , секунда.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (2)$$

**Линейной частотой колебаний**  $\nu$  (или просто **частотой колебаний**) называется величина обратная периоду колебаний, то есть

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (3)$$

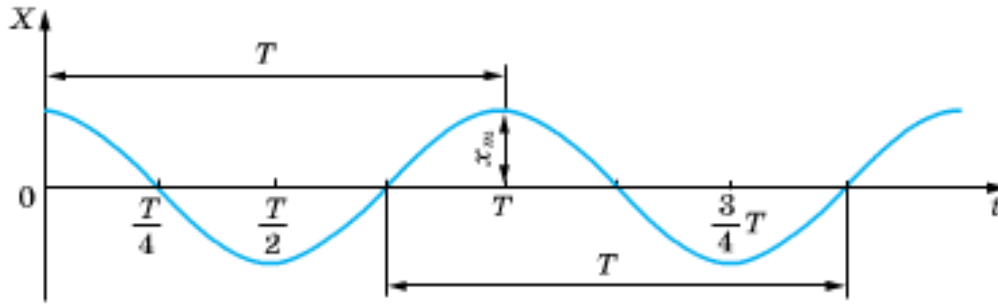
(частота колебаний  $\nu$  показывает число полных колебаний, совершаемых системой за одну секунду)

$[\nu] = \frac{1}{с} \equiv Гц$ , Герц.

Сравнивая (2) и (3), получим

$$\omega_0 = 2\pi\nu.$$

## График гармонических колебаний



Из графика гармонических колебаний можно определить начальную фазу колебаний  $\varphi_0$ , амплитуду колебаний  $A$  и период колебаний  $T$ .

## Кинематика механических колебаний



**Скорость**  $v$  маятника при гармонических колебаниях можно найти по формуле:

$$v = A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

**Ускорение**  $a$  маятника при гармонических колебаниях можно найти по формуле:

$$a = A\omega_0^2 \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \pi\right). \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) видно, что скорость  $v$  и ускорение  $a$  так же изменяются со временем по гармоническому закону с амплитудами, равными

$$v_{\max} = A\omega_0 \quad \text{и} \quad a_{\max} = A\omega_0^2. \quad (6)$$

Из сравнения (1) с (4) и (5) видно, что скорость  $v$  (4) отличается по фазе от смещения  $x$  (1) на  $\pi/2$ , а ускорение  $a$  (5) отличается по фазе от смещения  $x$  (1) на  $\pi$ .

Следовательно, в моменты времени, когда смещение тела равно нулю  $x=0$ , скорость  $v$  достигает наибольшего значения

$$v_{\max} = A\omega_0.$$

Когда же смещение  $x$  достигает максимального значения  $x = x_{\max}$ , то скорость маятника становится равным нулю  $v=0$ , а ускорение достигает наибольшего значения  $a_{\max} = A\omega_0^2$ .

## Динамика механических колебаний

Согласно второму закону Ньютона, результирующая сила, действующая на маятник равна:

$$F_x = ma = -m\omega_0^2 x.$$

Следовательно, результирующая сила пропорциональна смещению маятника из положения равновесия и направлена в противоположную сторону смещения (то есть к положению равновесия).

**Кинетическая энергия маятника**, равна

$$E_K = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi) \quad (7)$$

**Потенциальная энергия маятника**, совершающего гармонические колебания, равна

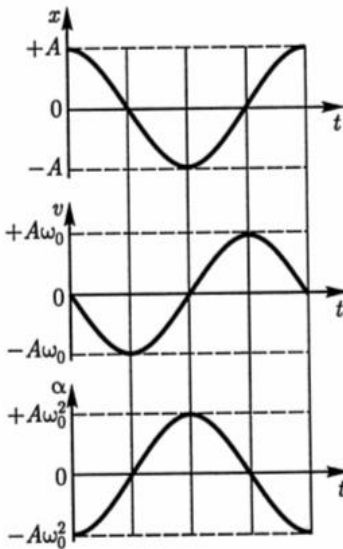
$$E_{II} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi) \quad (8)$$

Сложив (7) и (8), получим формулу для полной механической энергии маятника:

$$E = E_K + E_{II} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}$$

Следует обратить внимание на то, что кинетическая  $E_K$  и потенциальная  $E_{II}$  энергия при колебаниях маятника изменяются с частотой в два раза большей, чем колеблется сам маятник, то есть с частотой  $2\omega_0$ .

## Координата, скорость, ускорение и изменение энергии при гармонических колебаниях



- уравнение гармонических колебаний

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0), \text{ м}$$

- скорость тела при гармонических колебаниях

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0), \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

- ускорение тела при гармонических колебаниях

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0), \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

- кинетическая энергия колеблющейся точки

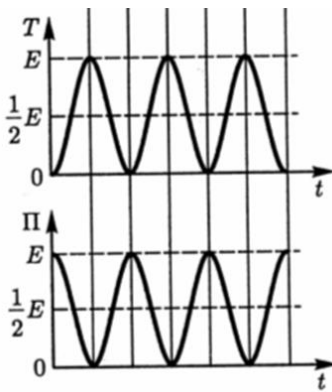
$$E_K = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi), \text{ Дж}$$

- потенциальная энергия колеблющейся точки

$$E_{II} = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi), \text{ Дж}$$

- полная механическая энергия колеблющейся точки

$$E = E_K + E_{II} = \frac{kx_{\max}^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2$$



### Законы сохранения энергии при гармонических колебаниях

При гармонических колебаниях математического, физического и пружинного маятников выполняется закон сохранения полной механической энергии.

#### В случае колебаний математического маятника

$$mgh_1 + \frac{m v_1^2}{2} = mgh_2 + \frac{m v_2^2}{2} = mgh_{\max} = \frac{m v_{\max}^2}{2},$$

где  $m$  - масса грузика, кг;

$v$  - скорость грузика в какой-то момент времени, м/с;

$h$  - высота грузика над нулевым уровнем отсчёта потенциальной энергии, м.

Если тело начинает колебание из состояния покоя с какой-то высоты  $h_{\max}$ , то в начальный момент времени она обладает максимальной потенциальной энергией  $E_{II}^{\max} = mgh_{\max}$ , а кинетическая энергия равна нулю (так как скорость тела в этот момент равен нулю). При колебании потенциальная энергия будет уменьшаться (так как высота уменьшается, а кинетическая энергия будет возрастать (так как будет увеличиваться скорость тела)). В момент прохождения маятником положения равновесия вся его потенциальная энергия перейдёт в кинетическую, причём будет выполняться равенство

$$mgh_{\max} = \frac{m v_{\max}^2}{2}.$$



### В случае колебаний физического маятника

$$\frac{I\omega_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{I\omega_2^2}{2} + mgh_2 = \frac{I\omega_{max}^2}{2} = mgh_{max},$$

где  $I$  - момент инерции маятника относительно оси колебаний,  $кг \cdot м^2$   
(определяется по теореме Штейнера),

$\omega$  - угловая скорость маятника в какой-то момент времени,  $рад/с$ ;

$h$  - высота груза над нулевым уровнем отсчёта потенциальной энергии,  $м$ .

Если тело начинает колебание из состояния покоя с какой-то высоты  $h_{max}$ , то в начальный момент времени она обладает максимальной потенциальной энергией  $E_{\Pi}^{max} = mgh_{max}$ , а кинетическая энергия равна нулю (так как скорость тела в этот момент равен нулю). При колебании потенциальная энергия будет уменьшаться (так как высота уменьшается, а кинетическая энергия будет возрастать (так как будет увеличиваться скорость тела). В момент прохождения маятником положения равновесия вся его потенциальная энергия перейдёт в кинетическую, причём будет выполняться равенство

$$mgh_{max} = \frac{I\omega_{max}^2}{2}.$$

### В случае колебаний пружинного маятника

$$\frac{kx_1^2}{2} + \frac{mv_1^2}{2} = \frac{kx_2^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} = \frac{kx_{max}^2}{2} = \frac{mv_{max}^2}{2},$$

где  $m$  - масса груза,  $кг$ ;

$v$  - скорость груза в какой-то момент времени.  $м/с$ ;

$k$  - коэффициент жёсткости пружины,  $Н/м$ ;

$x$  - величина деформации пружины в какой-то момент времени,  $м$ .

Если маятник начинает колебание из состояния покоя с какой-то величиной деформации  $x_{max}$ , то в начальный момент времени она обладает максимальной потенциальной энергией  $E_{\Pi}^{max} = \frac{kx_{max}^2}{2}$ , а кинетическая энергия равна нулю (так как скорость тела в этот момент равен нулю). При колебании потенциальная энергия будет уменьшаться (так как высота уменьшается, а кинетическая энергия будет возрастать (так как будет увеличиваться скорость тела). В момент прохождения маятником положения равновесия вся его потенциальная энергия перейдёт в

кинетическую, причём будет выполняться равенство  $\frac{kx_{max}^2}{2} = \frac{mv_{max}^2}{2}$ .

### Превращение электромагнитной энергии в колебательном контуре

Если сопротивление колебательного контура равно нулю, то для него будет выполняться **закон сохранения электромагнитной энергии**, то есть в любые два момента времени будет справедливо равенство:

$$\frac{Cu_1^2}{2} + \frac{Li_1^2}{2} = \frac{Cu_2^2}{2} + \frac{Li_2^2}{2} = \frac{CU_{max}^2}{2} = \frac{LI_{max}^2}{2},$$

где  $C$  - ёмкость колебательного контура,  $Ф$ ;

$L$  - индуктивность колебательного контура,  $Гн$ ;

$u$  - напряжение на конденсаторе в какой-то момент времени,  $В$ ;

$i$  - сила тока в цепи в какой-то момент времени,  $А$ ;

$U_{max}$  - амплитудное значение напряжения на конденсаторе,  $В$ ;

$I_{max}$  - амплитудное значение силы тока в цепи,  $А$ .

Если сопротивление колебательного контура равно нулю и колебания начинаются из состояния, при котором напряжение на конденсаторе равно  $U_{max}$ , то в начальный момент времени он обладает

максимальной энергией электрического поля  $W_{ЭП}^{max} = \frac{CU_{max}^2}{2}$ , а энергия магнитного поля равна нулю

(так как ток в контуре в этот момент равен нулю). При колебании энергия электрического поля конденсатора будет уменьшаться (так как напряжение уменьшается, а энергия магнитного поля катушки индуктивности будет возрастать (так как будет увеличиваться ток в контуре)). В момент полной разрядки конденсатора вся энергия электрического поля перейдёт в магнитную энергию, причём будет выполняться равенство:

$$\frac{CU_{max}^2}{2} = \frac{LI_{max}^2}{2}.$$

| Физическая величина            | Обозначение            | Определение  | График или формула  |
|--------------------------------|------------------------|--|---|
| Мгновенное значение величины   | $s$                    | Мгновенное значение величины, колеблющейся по гармоническому закону (например, смещение или заряд на обкладках конденсатора)   |    |
| Амплитуда                      | $A$                    | Максимальное значение колеблющейся величины. Так как косинус изменяется в пределах от +1 до -1, то $s$ может принимать значения от +A до -A  |    |
| Круговая (циклическая) частота | $\omega_0$             | Число колебаний за $2\pi$ секунд   | $\omega_0 = 2\pi\nu$  |
| Фаза колебания                 | $\omega_0 t + \varphi$ | Величина, определяющая значение колеблющейся величины от времени, прошедшего от начала текущего периода колебаний  | $s = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$<br>фаза — аргумент косинуса                        |
| Начальная фаза колебания       | $\varphi$              | Величина, определяющая значение колеблющейся величины в начальный момент времени   | При $t = 0$<br>$s = A \cos \varphi$   |
| Период                         | $T$                    | Промежуток времени, в течение которого фаза колебания получает приращение $2\pi$ , т. е. $\omega_0(t + T) + \varphi = (\omega_0 t + \varphi) + 2\pi$ , откуда $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ , или продолжительность одного полного колебания |  |
| Частота колебания              | $\nu$                  | Число полных колебаний, совершаемых в единицу времени  | $\nu = \frac{1}{T}$   |
| Единица частоты                | 1 герц (Гц)            | 1 Гц — частота периодического процесса, при котором за 1 с совершается один цикл процесса  |   |



Ты меня узнал?

### Дифференциальное уравнение свободных колебаний и его решение

**Свободными** (или **собственными**) называются колебания, возникающие в системе под действием внутренних сил после того, как система была выведена из положения устойчивого равновесия, и происходящие за счёт сообщённой системе энергии, которая в дальнейшем не пополняется. (например: колебания маятника)

**Незатухающими** называются колебания, амплитуда которых не изменяется с течением времени.

**Затухающие колебания** называются колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.

**Периодическими** называются колебания, которые в точности повторяются через определённый промежуток времени, называемый периодом колебаний  $T$ .

Дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний имеет вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$$

Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний имеет вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (9)$$

где  $x$  (икс) - колеблющаяся величина, описывающая тот или иной физический процесс;

$\beta$  (бэта) - коэффициент затухания,  $\frac{1}{c}$ ;

-  $\beta = \frac{r}{2m}$  - в случае механических колебаний,  $\frac{1}{c}$ ,

где  $r$  (эр) - коэффициент сопротивления,  $\frac{кг}{с}$ ;  $m$  - масса системы,  $кг$ .

-  $\beta = \frac{R}{2L}$  - в случае электромагнитных колебаний,  $\frac{1}{c}$ ,

где  $R$  (эр) - активное сопротивление колебательного контура,  $Ом$ ;  
 $L$  (эль) - индуктивность колебательного контура,  $Гн$ .

$\omega_0$  (омега нулевое) - собственная циклическая частотой колебательной системы,  $\frac{рад}{с}$

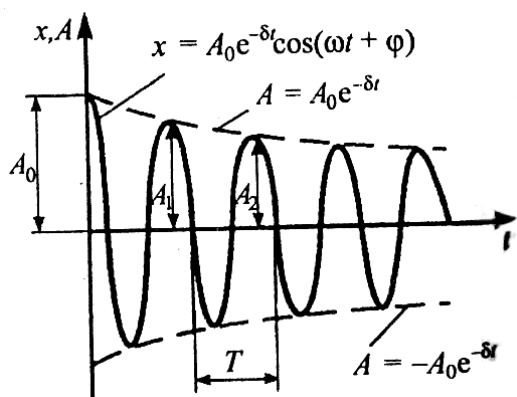
(то есть частота свободных незатухающих колебаний системы при  $\beta = 0$  (при отсутствии потерь энергии)).

Если в системе есть силы трения и сопротивления, такие, что выполняется условие  $\beta^2 \geq \omega_0^2$ , то колебания в системе очень быстро затухают.

Если же в системе силы трения и сопротивления малы, такие, что выполняется условие  $\beta^2 \ll \omega_0^2$ , то в системе происходят слабо затухающие колебания, и решение уравнения (9) имеет вид:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

где  $A = A_0 e^{-\beta t}$  - амплитуда затухающих колебаний, (11)



$A_0$  - начальная амплитуда (амплитуда колебаний в момент времени  $t = 0c$ ).

На рисунке сплошной линией показан график затухающих колебаний, которые описываются уравнением (10), а пунктирной линией — зависимость уменьшения амплитуды затухающих колебаний, которая описывается уравнением (11).

**Временем релаксации**  $\tau$  (тау) называется промежуток времени, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в  $e = 2.7$  раз:

$$\tau = \frac{1}{\beta}, \quad [\tau] = c, \text{ секунда}$$

Затухание нарушает периодичность колебаний, поэтому затухающие колебания не являются периодическими и, строго говоря, к ним неприменимо понятие периода или частоты. Однако если затухание мало, то пользуются понятием **условного периода** как промежутка времени между двумя последующими максимумами (или минимумами) колеблющейся физической величины.

**Условным периодом**  $T$  затухающих колебаний называется величина, равная

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

Для характеристики быстроты уменьшения амплитуды колебаний с течением времени ввели понятие **декремента затухания**  $D$  (дэ).

**Декрементом затухания**  $D$  называется скалярная величина, равная отношению амплитуды колебаний в какой-либо произвольный момент времени  $A(t)$ , к величине амплитуды колебаний через

один условный период  $A(t+T)$ :

$$D = \frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\beta T}.$$

$[D]$  = безразмерная.

Обычно на практике пользуются более удобной величиной, которая называется **логарифмическим декрементом затухания**  $\lambda$  (лямбда).

**Логарифмическим декрементом затухания**  $\lambda$  называется скалярная величина, равная натуральному логарифму от декремента затухания  $D$ :

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T.$$

$[\lambda]$  = безразмерная.

Если учесть уравнение (1.9) и его физический смысл, то можно получить, что:

$$\lambda = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}.$$

где  $N_e$  (эн е) - число колебаний, совершаемых за время, когда амплитуда колебаний уменьшается в  $e = 2.7$  раз.

Логарифмический декремент затухания - постоянная для данной колебательной системы величина.

Для характеристики колебательной системы пользуются понятием **добротности**  $Q$  (ку).

**Добротностью колебательной системы**  $Q$  (ку) называется скалярная величина равная произведению  $2\pi$  на отношение энергии колебательной системы в произвольный момент времени  $W(t)$  к убыли энергии системы за один условный период  $W(t) - W(t+T)$ :

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)}.$$

Если затухание в системе мало (то есть выполняется условие  $\beta^2 \ll \omega_0^2$ ), то добротность колебательной системы можно определить по формулам:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N_e = \frac{\pi}{\beta T_0} = \frac{\omega_0}{2\beta} \quad (12)$$

(так как затухание мало, то  $T$  принято равным  $T_0$ ).

Из формулы (12) следует, что добротность пропорциональна числу колебаний  $N_e$ , совершаемых системой за время релаксации.

### Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Резонанс

Чтобы в реальной колебательной системе получить незатухающие колебания, надо компенсировать потери энергии. Такая компенсация возможна с помощью какого-либо внешнего периодического воздействия, например, изменяющего по гармоническому закону:

$$X(t) = X_0 \cos \Omega t.$$

**Вынужденными** называются колебания, происходящие под влиянием изменяющихся со временем внешних периодических воздействий.

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний имеет вид:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f \cos \Omega t, \quad (13)$$

Решение уравнения (13) равно сумме общего решения (10) однородного уравнения (9) и частного решения неоднородного уравнения:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) + A(\Omega) \cos(\Omega t + \alpha), \quad (14)$$

где

$$- f = \frac{F_{\max}}{m} \text{ - в случае механических колебаний,}$$

где  $F_{\max}$  - амплитудное значение силы, действующей на систему,  $H$ :

$m$  - масса колебательной системы, кг.

$$- f = \frac{U_{\max}}{L} \text{ - в случае электромагнитных колебаний,}$$

где  $U_{\max}$  - амплитудное значение напряжения в колебательном контуре,  $B$ ;

$L$  - индуктивность контура, Гн.

График вынужденных колебаний приведён на рис. 2

Первое слагаемое в уравнении (14) играет заметную роль только в начальной стадии процесса, при так называемом, **установлении колебаний** (см. рис. 2).

С течением времени из-за множителя  $e^{-\beta t}$  роль первого слагаемого быстро уменьшается и по прошествии достаточного времени  $t$  оно стремится к нулю.

Таким образом, через некоторое время  $t$ , колебание системы определяется величиной внешнего воздействия.

Следовательно, второе слагаемое в уравнении (14) описывает установившиеся вынужденные колебания, которые представляют собой гармонические колебания с частотой, равной частоте вынуждающих возмущений  $\Omega$ .

Амплитуду вынужденных колебаний можно определить по формуле

$$A(\Omega) = \frac{f}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}}, \quad (15)$$

а начальную фазу вынужденных колебаний - по формуле

$$\alpha = \arctg \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}. \quad (16)$$

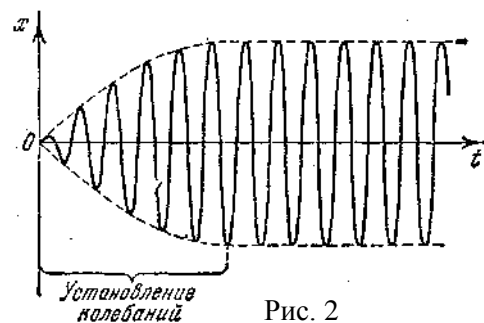


Рис. 2

### Явление резонанса

Из анализа уравнения (16) следует, что вынужденные колебания отстают по фазе от вынуждающей силы, причем величина отставания зависит от частоты вынужденных возмущений  $\Omega$ .

А из анализа уравнения (15) следует, что амплитуда вынужденных колебаний  $A(\Omega)$  так же зависит от частоты вынужденных возмущений  $\Omega$ . Причём, амплитуда колебаний будет достигать своего максимального значения при, так называемой, резонансной частоте  $\Omega_{рез}$ , которую можно определить по формуле:

$$\Omega_{рез} = \sqrt{\omega^2 - \beta^2} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}. \quad (17)$$

**Резонансом** называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний  $A(\Omega)$  при приближении частоты вынуждающих возмущений  $\Omega$  к величине резонансной частоты  $\Omega_{рез}$ .

При  $\beta^2 \ll \omega_0^2$  значение  $\Omega_{рез}$  практически совпадает с собственной частотой  $\omega_0$  колебательной системы.

Подставляя (17) в формулу (15), получим величину амплитуды колебаний системы во время резонанса:

$$A_{рез} = \frac{f}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$$

### Резонансные кривые

На рис. 3 приведены зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающих возмущений  $\Omega$  при различных значениях коэффициента затухания системы  $\beta$  (эта совокупность кривых называется **резонансными кривыми**).

На этом рисунке:

- **кривые 1, 2, 3** – это резонансные кривые при коэффициентах затухания  $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$ .

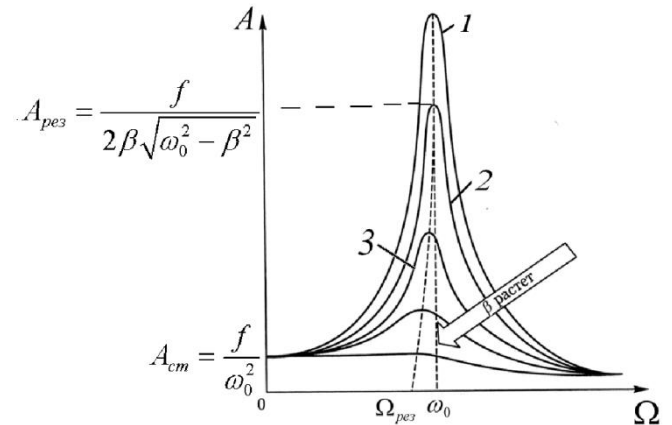


Рис. 3


Из рис. 3 видно, что

- чем меньше коэффициент затухания  $\beta$ , тем выше и правее лежит максимум резонансной кривой;  
 - при стремлении частоты вынуждающих возмущений к нулю, то есть  $\Omega \rightarrow 0$ , все кривые стремятся к одному и тому же, предельному значению  $A_{cm} = \frac{f}{\omega_0^2}$ , которое называют **статическим отклонением**;

- при резонансной частоте вынуждающих возмущений  $\Omega_{рез}$  амплитуда колебаний достигает максимального значения, равного

$$A_{рез} = \frac{f}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}};$$

- при стремлении частоты вынуждающих возмущений к бесконечности, то есть  $\Omega \rightarrow \infty$ , все кривые асимптотически стремятся к нулю.

  
**БЫЧОК**  
 Качающийся

Идет бычок, качается.  
 С доской впадает в транс.  
 Явление называется  
 Такое – РЕЗОНАНС.

19

Метки: происшествия, самолет, Чусовской район

## 15:03 Военная прокуратура не знает о падении истребителя



Военная прокуратура отказывается давать комментарии по факту падения истребителя в Чусовском районе.

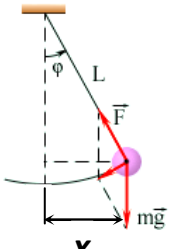
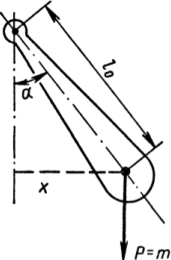
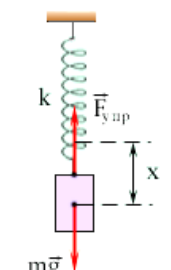
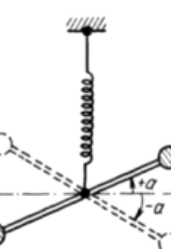
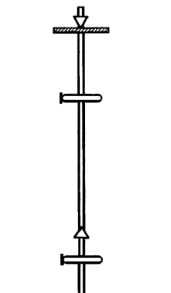
«Я ничего не знаю», – ответил заместитель военного прокурора Пермского гарнизона Павел Градов на просьбу корреспондента 59.ru разъяснить ситуацию.

Как сказал прокурор Чусовского района Андрей Делиев, «самолет упал по причине силы тяжести, так как машина тяжелее воздуха». Однако прокурор отметил, что на данный момент он не владеет достоверными данными о случившемся.

Напомним, сегодня днем недалеко от деревни Денисовка потерпел крушение военный истребитель. По предварительным данным, пилоты успели катапультироваться в районе Троицы, они живы.

# Пять баллов по физике

## Виды маятников

| Внешний вид маятника  | Тип маятника   | Дифференциальное уравнение гармонических колебаний маятника и его решение   | Период колебаний маятника         |
|---|--|---|-----------------------------------|
|    | <b>МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК</b><br><br>Идеализированная система, состоящая из материальной точки массой $m$ , подвешенной на невесомой нерастяжимой нити длиной $l$ и совершающей колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести. | $\ddot{\alpha} + \frac{g}{l} \alpha = 0$ $\varphi = \varphi_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ или<br>$x = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ | $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$     |
|    | <b>ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК</b><br><br>Твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания в вертикальной плоскости вокруг неподвижной горизонтальной оси, не проходящей через центр масс этого тела                                      | $\ddot{\alpha} + \frac{mgl_0}{I} \alpha = 0$ $\alpha = \alpha_{\max} \cos(\omega t + \alpha_0)$ или<br>$x = x_{\max} \cos(\omega t + \alpha_0)$ | $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl_0}}$ |
|   | <b>ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК</b><br><br>Тело массой $m$ , совершающее колебания на невесомой абсолютно упругой пружине жёсткостью $k$ .  | $\ddot{x} + \frac{k}{m} x = 0$ $x = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$  | $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$     |
|  | <b>КРУТИЛЬНЫЙ МАЯТНИК</b><br><br>Твёрдое тело, совершающее вращательно - колебательные движения вокруг неподвижной оси.  | $\ddot{\alpha} + \frac{f}{I} \alpha = 0$ $\alpha = \alpha_{\max} \cos(\omega t + \alpha_0)$   | $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{f}}$     |
|  | <b>ОБОРОТНЫЙ МАЯТНИК</b><br><br>Массивное твёрдое тело с двумя перемещающимися вдоль оси маятника трёхгранными ножами, способное совершать колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести вокруг каждого из ножей.              | $\ddot{\alpha} + \frac{g}{L} \alpha = 0$ $\alpha = \alpha_{\max} \cos(\omega t + \alpha_0)$   | $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$     |



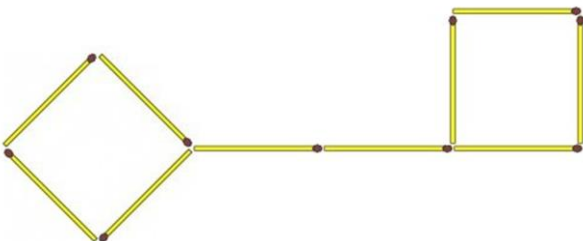
Привет



## Страничка будущего танкиста



Гимнастика для ума



Переставь четыре спички так, чтобы из ключа получилось три квадрата

## СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КОЛЕБАНИЯМ

При решении задач по этой теме следует помнить, что:

- уравнение гармонических колебаний можно записывать как через синус, так и через косинус,
- скорость и ускорение тела, а так же его энергия при гармонических колебаниях, то же изменяются по гармоническому закону,
- в точке максимального отклонения тела от положения равновесия его скорость и кинетическая энергия равны нулю, а смещение и потенциальная энергия максимальны,-
- в положении равновесия скорость и кинетическая энергия тела максимальны, а смещение и потенциальная энергия тела равны нулю,
- при гармонических колебаниях полная механическая энергия маятника в любой точке траектории имеет одно и то же значение:

В случае механических колебаний математического маятника

$$mgh_1 + \frac{m v_1^2}{2} = mgh_2 + \frac{m v_2^2}{2} = mgh_{max} = \frac{m v_{max}^2}{2}$$

В случае механических колебаний физического маятника

$$\frac{I\omega_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{I\omega_2^2}{2} + mgh_2 = \frac{I\omega_{max}^2}{2} = mgh_{max}$$

В случае механических колебаний пружинного маятника

$$\frac{k x_1^2}{2} + \frac{m v_1^2}{2} = \frac{k x_2^2}{2} + \frac{m v_2^2}{2} = \frac{k x_{max}^2}{2} = \frac{m v_{max}^2}{2}$$

В случае электромагнитных колебаний в колебательном контуре

$$\frac{Cu_1^2}{2} + \frac{Li_1^2}{2} = \frac{Cu_2^2}{2} + \frac{Li_2^2}{2} = \frac{CU_{max}^2}{2} = \frac{LI_{max}^2}{2}$$

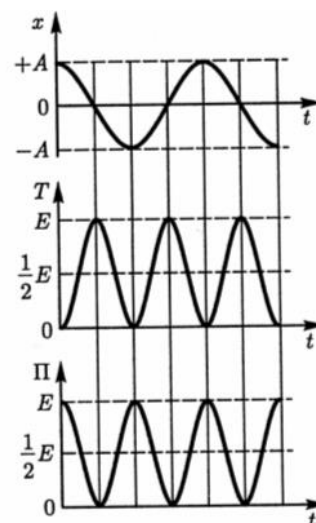
- максимальные значения скорости  $v_{max}$  и ускорения  $a_{max}$  при гармонических колебаниях маятника находятся по формулам:

$$v_{max} = A\omega_0 \quad \text{и} \quad a_{max} = A\omega_0^2.$$

- максимальные значения напряжения на конденсаторе  $U_{max}$  и силы тока в контуре  $I_{max}$  находятся по формулам:

$$U_{max} = \frac{q_{max}}{C} \quad \text{и} \quad I_{max} = q_{max} \omega$$

- при гармонических колебаниях частота изменения кинетической и потенциальной энергии колебаний маятника и энергии электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки индуктивности в колебательном контуре в два раза больше частоты самих гармонических колебаний, а сама энергия принимает только положительные значения.



## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ



**Волной** называется процесс распространения колебаний в пространстве. В природе бывают механические и электромагнитные волны.

**Механической волной** называется процесс распространения механических колебаний в упругой среде.

**Электромагнитной волной** называется распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле.

**Монохроматической** называется волна какой-либо определённой частоты или длины волны.

### Основное свойство всех видов волн

Основным свойством всех видов волн является перенос энергии в пространстве без переноса вещества. (при распространении механических волн частицы вещества не движутся вместе с волной, а совершают колебания около своих положений равновесия. Колебания источника волн передаются частицами вещества друг другу и, таким образом, энергия колебаний источника волн распространяется в пространстве).

При распространении в пространстве волны могут:

- отражаться,

- преломляться,

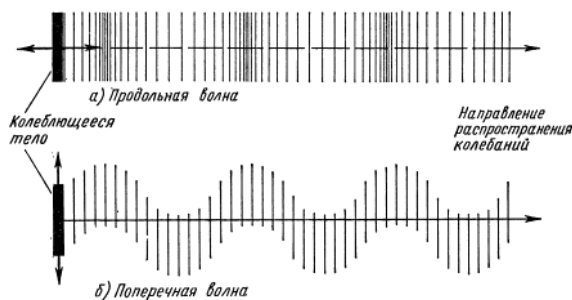
- проявлять дисперсию.

- дифрагировать,

- интерферировать,

| Название      | Определение  |
|---------------|--|
| Отражение     | Изменение направления распространения на границе двух сред   |
| Преломление   | Изменение направления распространения при переходе из одной среды в другую   |
| Дисперсия     | Зависимость скорости света в среде от частоты падающего света  |
| Дифракция     | Огибание волной преграды   |
| Интерференция | Сложение волн, в результате которого наблюдается устойчивая картина распределения максимумов и минимумов колебаний |

Волны бывают *поперечными* и *продольными*.



**Продольной** называется волна, при распространении которой частицы среды колеблются в направлении распространения волны.

**Поперечной** называется волна, при распространении которой частицы среды колеблются в направлении перпендикулярном распространению волны.



**Механические волны** бывают как *поперечными*, так и *продольными*.

Распространяться механические волны могут только в веществе (в вакууме механические волны не распространяются).

Продольные волны – это сгущения и разрежения среды. Поэтому такие волны могут существовать в любых телах – твёрдых, жидких, газообразных.

Поперечные механические волны могут распространяться только в твёрдых телах, так как для распространения такой волны необходимо жёсткое расположение частиц среды, чтобы между ними могли возникать силы упругости.

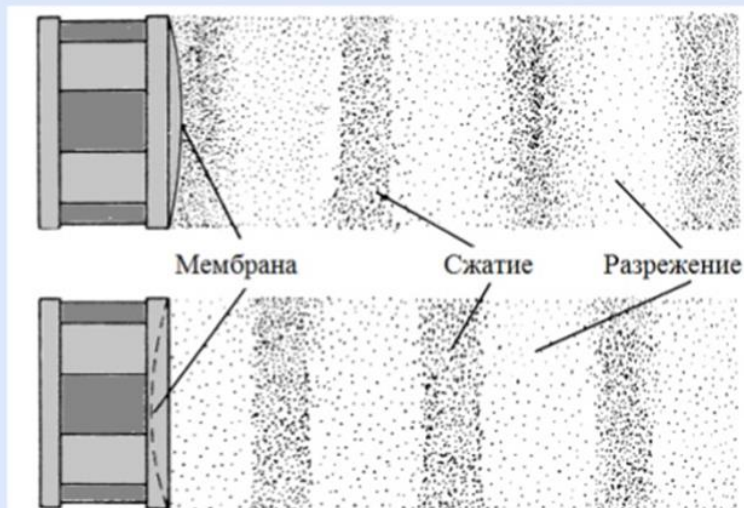
**Электромагнитные волны** бывают *только поперечными*. Они могут распространяться в любых средах: газах, жидкостях, твёрдых телах и даже в вакууме.

При распространении механической волны происходят колебания молекул (или частиц) вещества.

Частицы поперечной волны колеблются поперёк направления распространения волны (направления переноса энергии), а частицы продольной – вдоль направления распространения волны.

При распространении электромагнитной волны происходят колебания вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и вектора магнитной индукции.

Распространение звука в воздухе начинается с колебаний плотности воздуха у поверхности колеблющегося тела (источника), которые последовательно передаются все к более удаленным частицам среды.



Как видно из следующего рисунка в области гребня волны молекулы находятся ближе друг к другу (фаза сжатия) – там давление выше атмосферного, а в области впадины волны (фаза разрежения) – давление ниже атмосферного.

**Фазовой (или волновой) поверхностью** называется геометрическое место точек, в которых фаза колебаний имеет одно и то же значение.

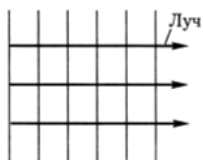
**Фронт волн** называется геометрическое место точек в пространстве, до которых дошла волна.

### Уравнение плоской бегущей незатухающей гармонической волны

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi), \quad (18)$$

где  $A$  - амплитуда волны;  $r$  - расстояние от источника волны, м;

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{волновое число, } \frac{1}{\text{м}}.$$



**Плоской** называется волна, фазовые поверхности которой представляют собой совокупность параллельных друг другу плоскостей.

**Бегущей** называется волна, при распространении которой происходит перенос энергии в пространстве.

**Незатухающей** называется волна, амплитуда которой не изменяется при распространении волны.

**Гармонической** называется волна, при распространении которой частицы среды совершают гармонические колебания.

### Уравнение сферической бегущей гармонической волны

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi), \quad (19)$$

где  $A_0$  - амплитуда волны на расстоянии 1 м от источника волны,

$r$  - расстояние от источника волны, м.

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{волновое число, } \frac{1}{\text{м}}.$$



**Сферической** называется волна, фазовые поверхности которой представляют собой совокупность концентрических сфер.

### Основные характеристики волны

**Периодом волны  $T$**  (тэ) называется период колебаний частиц среды при распространении волны. (в случае электромагнитной волны – это период колебаний электрического и магнитного полей волны).

$$[T] = c$$

**Частотой волны  $\nu$**  (ню) называется частота колебаний частиц среды при распространении волны. (в случае электромагнитной волны – это частота колебаний электрического и магнитного полей волны).

$$[\nu] = \text{Гц}$$

**Циклической частотой волны  $\omega$**  (омега) называется величина, равная

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad [\omega] = \frac{\text{рад}}{c}$$

**Амплитудой волны  $A$**  (а) называется максимальное смещение частиц среды от положения равновесия при распространении волны.

(в случае электромагнитной волны – это максимальная величина напряжённости электрического и напряжённости магнитного полей волны).

**Фазовой скоростью волны  $v$**  (вэ) называется скорость распространения в пространстве фазовой поверхности волны.  $[v] = \frac{M}{c}$ .



В случае механических волн фазовую скорость волны можно определить по формуле

$$v = \lambda\nu.$$

где  $v$  - скорость волны, м/с;

$\lambda$  - длина волны, м;  $\nu$  - частота волны, Гц.

При переходе механической волны через границу раздела двух сред частота волны  $\nu$  не изменяется (она определяется частотой колебаний источника волн), а длина волны  $\lambda$  изменяется (чем больше плотность среды, тем больше длина волны  $\lambda$  и, соответственно, больше фазовая скорость распространения механической волны  $v$ ).

В случае электромагнитных волн фазовую скорость волны  $v$  можно определить по следующим формулам:

- в вакууме  $c = \lambda_0\nu,$

где  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$  - скорость света в вакууме;  $\lambda_0$  - длина электромагнитной волны в вакууме, м;

$\nu$  - частота электромагнитной волны, Гц.

- в веществе  $v = \frac{c}{n} = \lambda\nu,$

где  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$  - скорость света в вакууме;

$n$  - абсолютный показатель преломления вещества (табличная величина, безразмерная);

$\lambda$  - длина электромагнитной волны в веществе, м;  $\nu$  - частота электромагнитной волны, Гц.

При переходе электромагнитной волны через границу раздела двух сред частота волны  $\nu$  не изменяется (она определяется частотой колебаний источника волн), а длина волны  $\lambda$  изменяется (чем больше оптическая плотность среды (то есть больше абсолютный показатель преломления вещества  $n$ , тем меньше длина волны  $\lambda$  и, соответственно, меньше фазовая скорость распространения механической волны  $v$ ).

**Длиной волны**  $\lambda$  (лямбда) называется расстояние между ближайшими частицами волны, колеблющимися в одинаковых фазах (то есть, частицами, находящимися в одинаковом состоянии).

Длина волны  $\lambda$  равна тому расстоянию, на которое распространяется волна за период колебаний её источника, то есть

$$\lambda = vT$$

где  $v$  – скорость распространения волны;  $T$  – период волны;

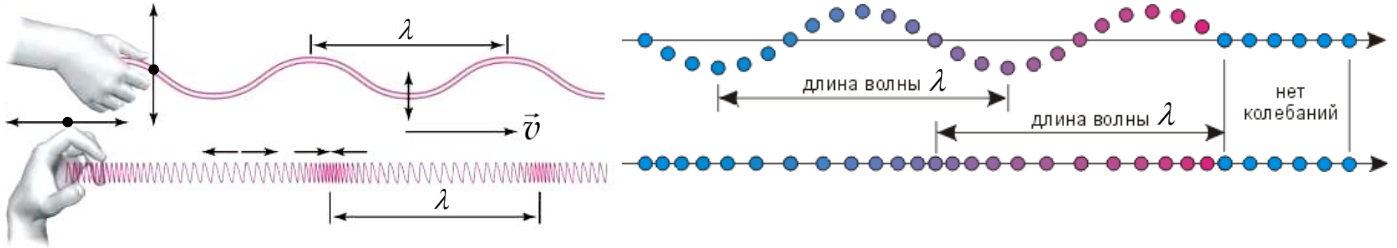


Рис. 4

При распространении механической волны в газе или жидкости длину волны определяет расстояние между ближайшими областями наибольшего сжатия или разрежения.

Области сжатия соответствуют гребням волн. Области разрежения – впадинам волн.

Из рис. 4 видно, что длина волны равна расстоянию между ближайшими горбами или впадинами в случае поперечных волн или между ближайшими сжатиями или разрежениями среды в случае продольных волн.

### Дифференциальное уравнение волны (волновое уравнение)

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad \text{или} \quad \Delta \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \quad (20)$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа (он равен сумме вторых частных производных какой-либо величины  $\xi$  (кси) по координатам);  $v$  – фазовая скорость волны.

Решением уравнения (20) является уравнение любого волнового процесса. Соответствующей подстановкой можно убедиться, что уравнению (20) удовлетворяют, в частности, уравнение плоской волны (18) и уравнение сферической волны (19). Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси  $x$ , волновое уравнение имеет вид

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

### Связь между разностью фаз колебаний двух точек волны и расстоянием между ними



$$\Delta \varphi = \kappa(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = \frac{\omega}{v}(x_2 - x_1),$$

где  $\Delta \varphi$  – разность фаз колебаний в двух точках волны, *рад*;  $\lambda$  – длина волны, *м*;

$(x_2 - x_1)$  – разность координат двух точек волны, *м*;

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} - \text{волновое число, } \frac{1}{\text{м}};$$

$\omega$  – циклическая частота волны, *рад/с*;

$v$  – фазовая скорость волны,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

## СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

**Стоячей волной** называется волна, образующаяся в результате наложения двух гармонических волн, распространяющихся навстречу друг другу и имеющих одинаковый период, амплитуду и поляризацию. (пример: наложение падающей и отраженной волн на натянутом шнуре).

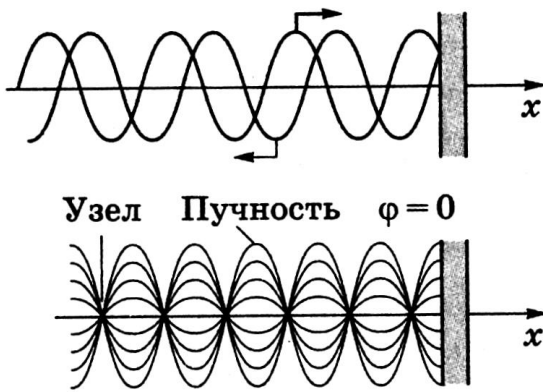
Энергия не переносится вдоль шнура, а лишь трансформируется в поперечном направлении из потенциальной в кинетическую энергию и наоборот.

В стоячей волне все точки колеблются с одинаковой фазой. Их амплитуды колебаний изменяются периодически от точки к точке.

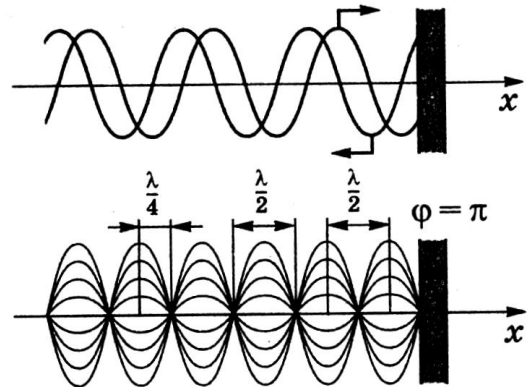
**Пучностями стоячей волны** называются положения точек, имеющих максимальную амплитуду колебаний.

**Узлами стоячей волны** называются не перемещающиеся точки волны, амплитуда которых равна нулю.

### Отражение от менее плотной среды



### Отражение от более плотной среды



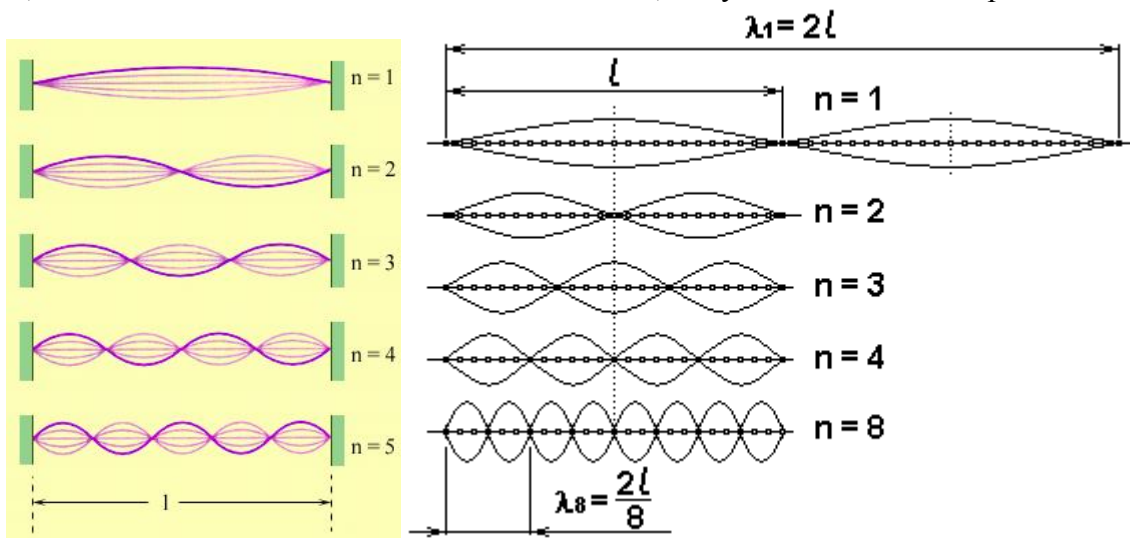
Расстояние между соседними узлами стоячей волны одинаково и равно половине длины волны  $\frac{\lambda}{2}$ .

Если натянутый шнур (или струну), закрепить с одного конца, то расстояние между узлами стоячей волны не будет зависеть от длины шнура.

Если закрепить оба конца натянутого шнура (или струны), то отражение волн происходит с обоих концов. В этом случае расстояние между узлами стоячей волны будет зависеть от длины шнура.

На длине шнура (или струны), закрепленной с обоих концов, всегда укладывается целое число  $n$  полуволен  $\frac{\lambda}{2}$  поперечных стоячих волн.

Такие волны, называемые *модами собственных колебаний*, могут длительно поддерживаться в струне.



Волны других частот не усиливают внешнее воздействие при отражении от концов струны и потому быстро затухают в результате потерь энергии на трение.





**Отдохни. Полюбуйся, красота-то какая!**

**Звук**

**Акустикой** называется раздел физики, изучающий звуковые явления.

**Звуком** называются механические волны малой интенсивности частотой от 16 Гц до 20 000 Гц, воспринимаемые органами слуха человека.

**Инfrasound** называются механические волны с частотой менее 16 Гц.

**Ультразвук** называются механические волны с частотой более 20 кГц.

**Звуковые волны** – это распространяющиеся в среде упругие волны, обладающие частотами в пределах 16–20000 Гц.

Колебания с частотами менее 16–20 Гц, называются **инfrasound**, а колебания с частотами более 20000 Гц – **ультразвук**. Эти частоты наш слух не воспринимает.

**Частотный диапазон голосов певцов и певиц**

| Голоса               | Частотный диапазон, Гц |
|----------------------|------------------------|
| Бас                  | 80-350                 |
| Баритон              | 100-400                |
| Тенор                | 130-500                |
| Контральто           | 170-780                |
| Сопрано              | 250-1000               |
| Колоратурное сопрано | 260-1400               |

Частота звуковых колебаний, соответствующих человеческому голосу, составляет от 80 до 1400 Гц.

Звук по своей физической природе представляет собой волновой процесс, распространяющийся в среде в виде колебаний молекул вещества, и переносящий в различных направлениях энергию этих колебаний.

Скорость распространения волны в среде можно определить по формуле:  $v = \lambda \nu$ , где  $v$  – скорость волны, м/с;  $\lambda$  – длина волны, м;  $\nu$  – частота волны, Гц.

Необходимым условием распространения звуковых волн является наличие упругой среды. В вакууме звуковые волны не распространяются (там нет частиц, передающих возмущение от источника колебаний)

Скорость распространения звуковых волн определяется скоростью передачи взаимодействия между частицами упругой среды.

В газе скорость звука оказывается порядка скорости теплового движения молекул газа.

Чем больше потенциальная энергия взаимодействия молекул вещества, тем больше скорость звука.

Поэтому самая большая скорость звука в твёрдых телах ( $v_{в.меди} \approx 4000 \frac{м}{с}$ ), затем в жидкостях

( $v_{в.воде} \approx 1500 \frac{м}{с}$ ), и, наконец, наиболее медленная скорость звука в газах ( $v_{в.воздухе} \approx 340 \frac{м}{с}$ ).



### Основные характеристики звука

Различают объективные (не зависящие от органов чувств человека) и субъективные (зависящие от органов чувств человека) характеристики.

#### Объективные характеристики звука

Объективной характеристикой звука является интенсивность звуковой волны  $I$ .

**Интенсивностью звуковой волны  $I$**  называется скалярная величина, равная отношению энергии  $dW$ , которую переносит волна за время  $dt$  через поверхность  $dS_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, то есть

$$I = \frac{dW}{dS_{\perp} dt}$$

$[I] = \frac{Вт}{м^2}$ , Ватт на метр квадратный.

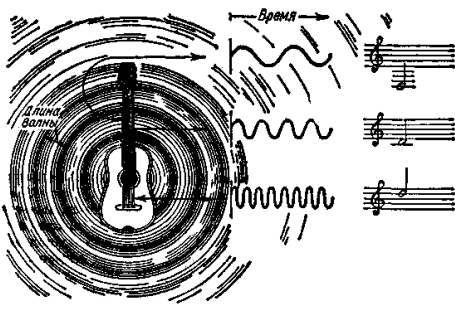
#### Уровень интенсивности различных звуков

| Источник звука   | Уровень интенсивности, дБ | Источник звука                 | Уровень интенсивности, дБ | Источник звука                | Уровень интенсивности, дБ |
|------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Порог слышимости | 0                         | Разговор (на расст. 1 м)       | 60                        | Проходящий поезд метро        | 100                       |
| Шорох листьев    | 10                        | Кабина автомобиля              | 70                        | Отбойный молоток              | 110                       |
| Мурлыканье кошки | 15                        | Громкая музыка                 | 80                        | Рок-концерт                   | 120                       |
| Шепот            | 20                        | Улица города                   | 80                        | Реактивный двигатель самолета | 140                       |
| Комната в городе | 40                        | Громкий крик (на расст. 1,5 м) | 100                       | Космическая ракета            | 180                       |
| Офис             | 50                        |                                |                           |                               |                           |



✚ С раскрытым ртом слушает свою жену Иван Петрович, чтобы давление на барабанные перепонки снаружи и изнутри было одинаковым.....

## Субъективные характеристики звука



**Громкость** – это субъективная характеристика звука, зависящая при одной и той же частоте звука от его амплитуды (чем больше амплитуда волны, тем громче звук).

**Высота** - это субъективная характеристика звука, определяемая частотой волны (чем больше частота, тем выше звук).

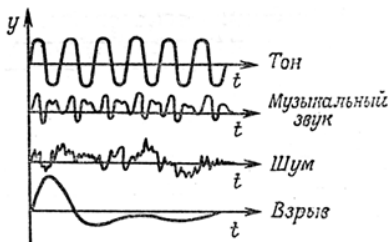
**Тембр** - это субъективная характеристика звука, определяемая акустическим спектром волны и позволяющая на слух различать звуки одной и той же частоты, но создаваемые разными источниками (например, отличить скрипку от гитары, различать голоса людей, слушать музыку и т. д.)



**Музыкальным тоном (или чистым звуком)** называется звуковая гармоническая волна какой-то определённой частоты (создаётся камертоном или звуковым генератором)



Форма реальной звуковой волны отличается от гармонической. Её можно представить в виде суммы нескольких гармонических звуковых волн с разной частотой  $\nu$  и амплитудой  $A$ . В этом случае говорят об акустическом спектре волны.



Разные источники звука имеют свой акустический спектр, который и определяет тембр данной звуковой волны.

Тембр звука определяется формой звуковой волны.

Любые сложные периодические колебания  $s = f(t)$  можно представить в виде суперпозиции (суммы) одновременно совершающихся гармонических колебаний с различными амплитудами, начальными фазами, а также частотами, кратными циклической частоте  $\omega_0$ :

$$s = f(t) = \frac{A_0}{2} + A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega_0 t + \varphi_2) + \dots + A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (21)$$

Представление периодической функции в виде (21) связывают с понятием гармонического анализа сложного периодического колебания и называют **разложением в ряд Фурье**.

Слагаемые ряда Фурье, определяющие гармонические колебания с частотами  $\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots$ , называются первой (или основной), второй, третьей и т. д. гармониками сложного периодического колебания.

Совокупность амплитуд и частот, на которые разлагается любое негармоническое колебания, образуют **спектр** этого колебания.

Графическое изображение спектра приведено на рис. 5. Как видно из рисунка, каждая составляющая спектра изображается в виде вертикальных линий, основание которых расположено в соответствующих местах оси частот, а длина каждой из линий пропорциональна величине амплитуды выбранной гармоники.

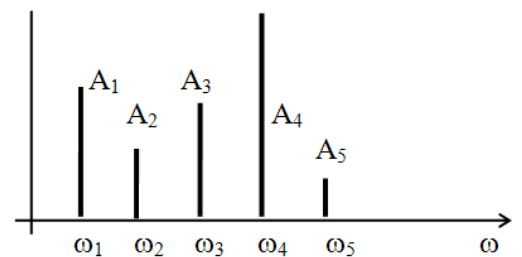
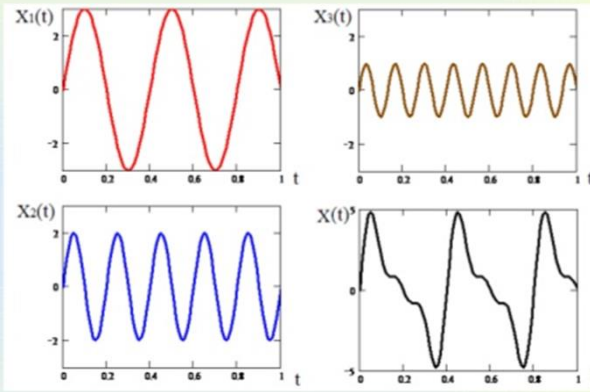


Рис. 5

Допустим, мы имеем три синусоидальных волны с различными амплитудами и частотами в струне с заданным натяжением.

В любой момент времени результирующая амплитуда волны представляет собой алгебраическую сумму амплитуд отдельных волн в этой точке в данный момент времени. Колебания уже не являются простыми синусоидальными, а волна называется сложной волной.



Результирующая волна  $x(t)$  образуется из трех синусоидальных волн с различными амплитудами и частотами

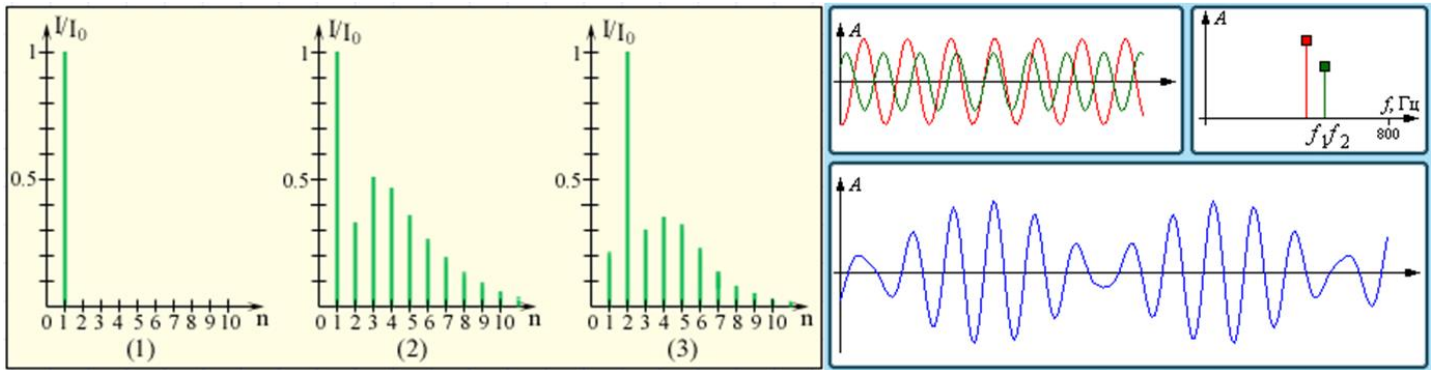


Рис. 6

На рис. 6 изображены относительные интенсивности гармоник в спектре звуковых волн, испускаемых камертоном (1), пианино (2) и низким женским голосом (3), звучащими на ноте «ля» контрактивы ( $\nu = 220 \text{ Гц}$ ).

5. Нарисуй, как выглядят:

|                 |                           |                     |               |
|-----------------|---------------------------|---------------------|---------------|
|                 |                           |                     |               |
| Шелест листьев  | Гром                      | Шум волн            | Пение лягушки |
|                 |                           |                     |               |
| Весенняя капель | Взмах крыла большой птицы | Звон крыльев комара | Хруст снега   |

5. Нарисуй, как выглядят:

|                 |                           |                     |               |
|-----------------|---------------------------|---------------------|---------------|
|                 |                           |                     |               |
| Шелест листьев  | Гром                      | Шум волн            | Пение лягушки |
|                 |                           |                     |               |
| Весенняя капель | Взмах крыла большой птицы | Звон крыльев комара | Хруст снега   |

СМЕКАЛКА  
ее не пропьешь

**Громкость звука** определяется давлением в звуковой волне и зависит от амплитуды колебаний в звуковой волне.

**Порогом слышимости**  $I_0$  называется минимальная интенсивность звука, слышимая человеческим ухом.

$$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

**Болевым порогом**  $I_{\text{бп}}$  называется максимальная интенсивность звука, слышимая человеческим ухом, которая ещё не вызывает болевые ощущения.

$$I_{\text{бп}} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

На практике громкость звука характеризуется *уровнем интенсивности звука*.

**Уровнем интенсивности звука**  $k$  называется скалярная величина, равная десятичному логарифму отношения интенсивности звука  $I$ , к величине интенсивности звука, соответствующей порогу слышимости человека  $I_0$ .

$$k = \lg \frac{I}{I_0}$$

Единица измерения интенсивности звука – Б, (Белл, в честь ученого Белла)

На практике в качестве уровня интенсивности звука принимается величина, в 10 раз большая:

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

Единица измерения – дБ (децибел)

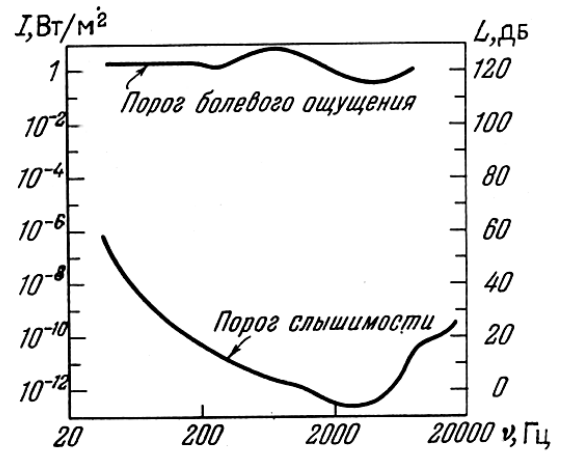
**Уровень** интенсивности 120 дБ является болевым порогом.

Интенсивность гармонической волны прямо пропорциональна квадрату амплитуды волны:  $I \approx A^2$ .

Интенсивность гармонической волны прямо пропорциональна четвертой степени ее частоты:  $I \approx \nu^4$

Интенсивность излучения точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния

до источника:  $I \approx \frac{1}{r^2}$




---

Отец будущего солдата российской армии присутствует на родительском собрании.

— Ну что ж поделаешь, моему сыну в одно ухо влетает, а в другое сразу вылетает...

Учитель физики со своего места:

— Ошибаетесь, звук в вакууме не распространяется...

---

**Светом** называются электромагнитные волны с длиной волны от 380 нм до 760 нм, которые воспринимаются органами зрения человека. (нм- это нанометр) ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

**Электромагнитной волной** (ЭМВ) называется распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле.

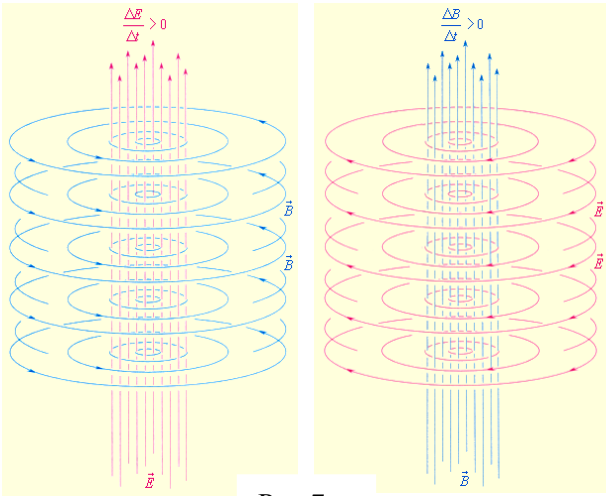


Рис.7

Из уравнений Максвелла следует, что переменное магнитное поле порождает вокруг себя вихревое электрическое поле, а переменное электрическое поле порождает вокруг себя магнитное поле (см. рис. 7).

Таким образом, взаимно превращаясь друг в друга, они могут распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн.

Из теории Дж. Максвелла следует, что электромагнитная волна является поперечной (см. рис. 8).

В электромагнитной волне вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  колеблются в одинаковых фазах во взаимно перпендикулярных плоскостях и одновременно перпендикулярно вектору скорости  $\vec{v}$  распространения волны (перпендикулярно лучу). Наблюдения показывают, что физиологические, фотохимические, фотоэлектрические и другие свойства света обусловлены колебаниями электрического вектора  $\vec{E}$  в световой волне. Поэтому вектор  $\vec{E}$  называют обычно **световым вектором**.

Скорость света (и любых электромагнитных волн) в

вакууме равна  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а в веществе можно определить по формуле:  $v = \frac{c}{n}$ ,

где  $n$  - абсолютный показатель преломления вещества (табличная величина, безразмерная).

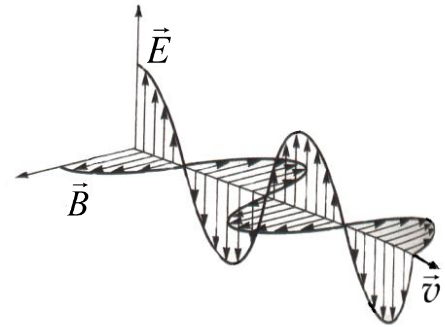


Рис. 8 Распределение проекций векторов  $E$  и  $H$  в электромагнитной волне по направлению её распространения

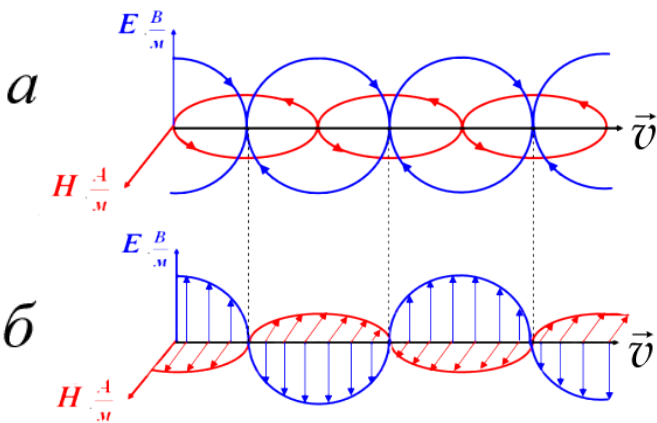


Рис. 9

Из анализа уравнений Максвелла следует, что в электромагнитной волне колебания векторов напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и магнитного поля  $\vec{H}$  происходят синфазно (то есть одинаково), причём в любой момент времени выполняется условие  $\epsilon\epsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2$ .

На рис. 9 (а) изображены силовые линии электрического и магнитного полей волны при её распространении в пространстве, а на рис. 9 (б) дано распределение проекций векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  вдоль направления распространения электромагнитной волны.

**Уравнение плоской гармонической бегущей электромагнитной волны**

$$E = E_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0) \quad \text{и} \quad H = H_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где  $E$  - напряжённость электрического поля в электромагнитной волне,  $\frac{B}{m}$ ;

$H$  - напряжённость магнитного поля в электромагнитной волне,  $\frac{A}{m}$ .

**Фазовая скорость распространения электромагнитной волны в веществе**

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}},$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{c}$  - скорость света в вакууме,

$\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  - электрическая и магнитная постоянные,

$\varepsilon$  и  $\mu$  - диэлектрическая и магнитная проницаемость вещества.

При распространении электромагнитные волны несут с собой энергию.

Плотность потока энергии электромагнитной волны определяется **вектором Умова-Пойнтинга**:

$$\vec{U} = [\vec{E}\vec{H}],$$

$$U = \left[ \frac{Дж}{m^2 c} \right] = \left[ \frac{Вт}{m^2} \right]$$

Среднее по времени значение вектора Умова-Пойнтинга  $\langle U \rangle$  называется **интенсивностью электромагнитной волны  $I$** .

**Интенсивностью электромагнитной волны  $I$**  называется скалярная величина, равная отношению энергии  $dW$ , которую переносит волна за время  $dt$  через поверхность  $dS_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, то есть

$$I = \frac{dW}{dS_{\perp} dt}.$$

$[I] = \frac{Вт}{m^2}$ , Ватт на метр квадратный.

**Оптическим диапазоном** называются электромагнитные волны с длиной волны  $\lambda = (10^{-8} \div 10^{-4}) m$ .

В него входят *ультрафиолетовое излучение (УФ)*, *свет* и *инфракрасное излучение (ИК)*.

---

Лучшие умы человечества собрались на научную конференцию.

Обсуждается вопрос: "сколько будет дважды два".

**Инженер** колдует с рулеткой и логарифмической линейкой, после чего уверенно объявляет результат: "3,99".

**Физик** обратился в службу технической поддержки, поставил численный эксперимент на компьютере и доложил: "между 3,98 и 4,02".

**Математик** посмотрел в потолок, подумал и сказал, что точного ответа он не знает, но зато может доказать, что этот ответ существует.

**Логик** попросил более точно определить, что такое "дважды два".

**Философ** полчаса рассуждал о том, что "дважды два" можно понимать совершенно по-разному.

**Хакер** предложил взломать защиту секретной сети Пентагона и заставить все компьютеры решать эту проблему.

Наконец, **бухгалтер** сказал: "Закройте все двери и окна, а теперь ответьте - а сколько вы хотите получить?"

---



## Отель под водой



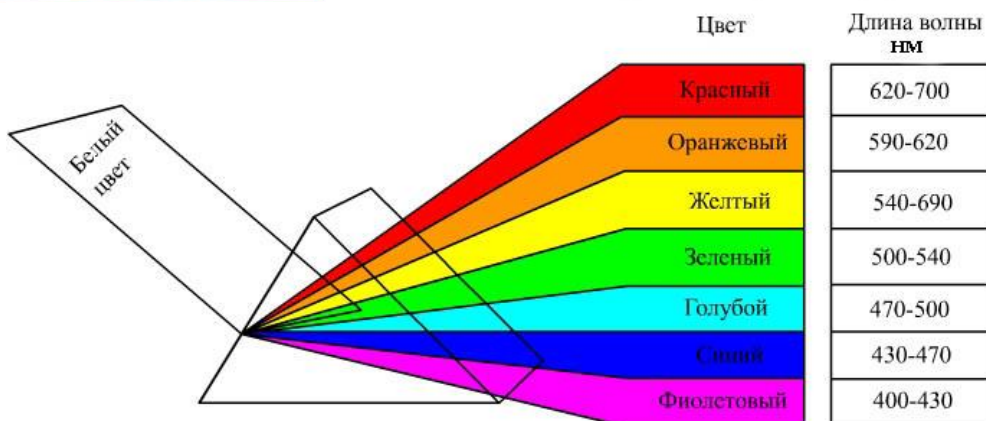
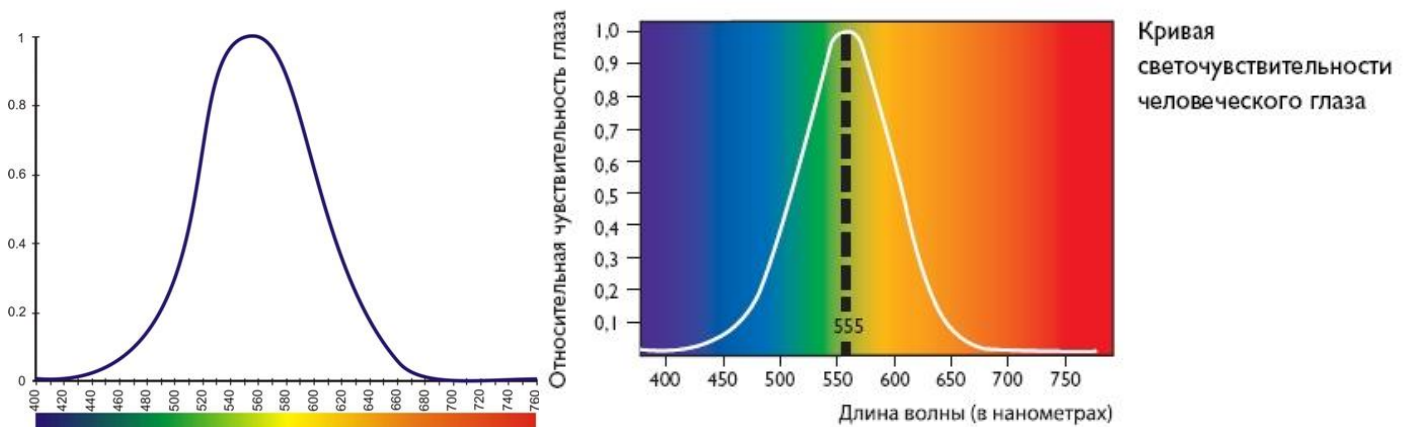
Будешь хорошо учиться, заработаешь много денег и сможешь поехать отдохнуть в такой отель

## Шкала электромагнитных волн



К электромагнитным волнам относятся:

- гамма-излучение (электромагнитные волны с длиной  $\lambda < 10^{-12}$  м),
- рентгеновское излучение (электромагнитные волны с длиной  $10^{-12}$  м  $< \lambda < 10^{-10}$  м),
- ультрафиолетовое излучение (электромагнитные волны с длиной  $10^{-10}$  м  $< \lambda < 0,38 \cdot 10^{-6}$  м),
- свет (электромагнитные волны с длиной  $0,38 \cdot 10^{-6}$  м  $< \lambda < 0,76 \cdot 10^{-6}$  м),
- инфракрасное излучение (электромагнитные волны с длиной  $0,76 \cdot 10^{-6}$  м  $< \lambda < 10^{-3}$  м),
- радиоволны (электромагнитные волны с длиной  $\lambda > 10^{-3}$  м).





**Будешь много трудиться, будешь жить в такой квартире**



**или жить на таком высоком этаже**

# Страничка будущего моряка



Армия дело добровольное  
хочешь иди, не хочешь заберут

## Свадебные платья

(девчатам на заметку)




---

Ученые автодорожного института Белгородского государственной университета опытным путем доказали, что практически любой фен для сушки волос может создать мощное воздушное сопротивление, способное сильно замедлять движения крупных объектов. Опыты проводились на оживленных автотрассах, фен направлялся руками техника навстречу движущимся автомобилям, которые под этим воздействием снижали скорость, несмотря на их аэродинамические свойства, и могли её набрать только проехав техника с феном. Одновременно ученые кафедры лингвистики этого же университета собрали огромный материал фольклорных выражений и металингвистических оборотов на основе высказываний водителей, проезжающих мимо техника с феном.

---

## СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЛНАМ

При решении задач по этой теме следует помнить, что:

- излучение электромагнитных волн происходит только при ускоренном движении заряженных частиц, то есть при ускоренном прямолинейном движении, при равномерном движении по криволинейной траектории, в частности по окружности, и при совершении колебаний.
- в электромагнитной волне всегда взаимно перпендикулярны друг другу три вектора: напряжённость электрического поля  $\vec{E}$ , магнитная индукция  $\vec{B}$  и скорость распространения волны  $\vec{v}$ .



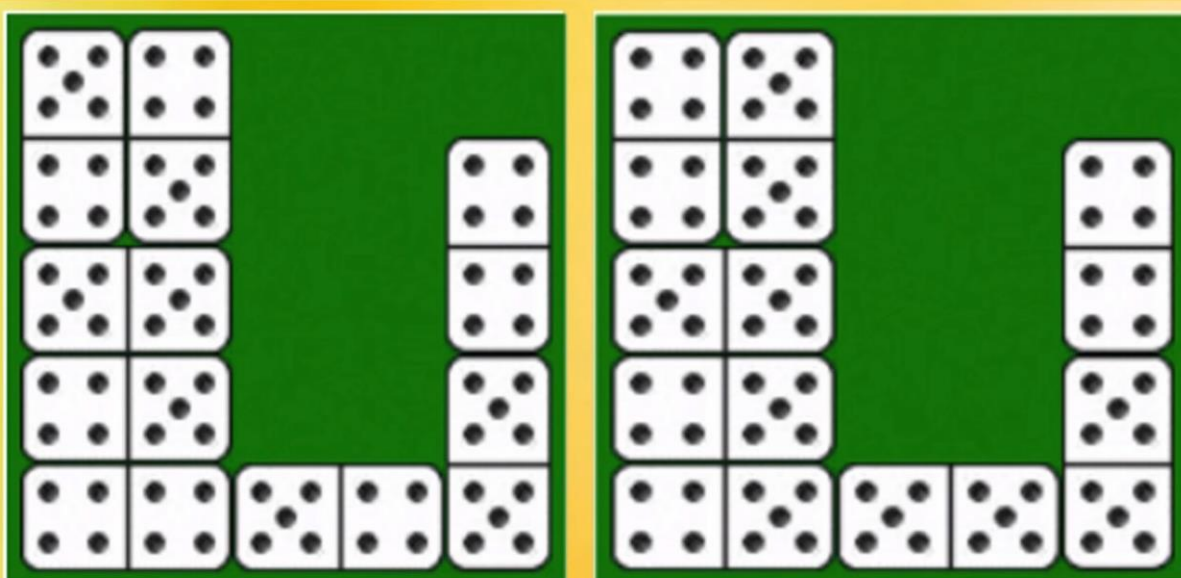
Гимнастика для ума



Сколько здесь лошадок и волков ?

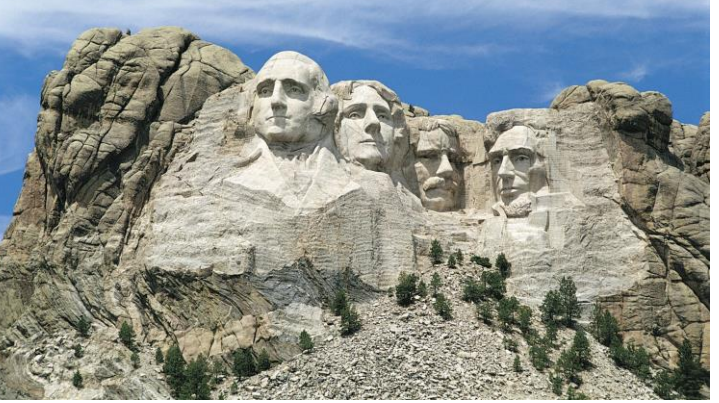
# 31

## НАЙДИТЕ 4 РАЗЛИЧИЯ



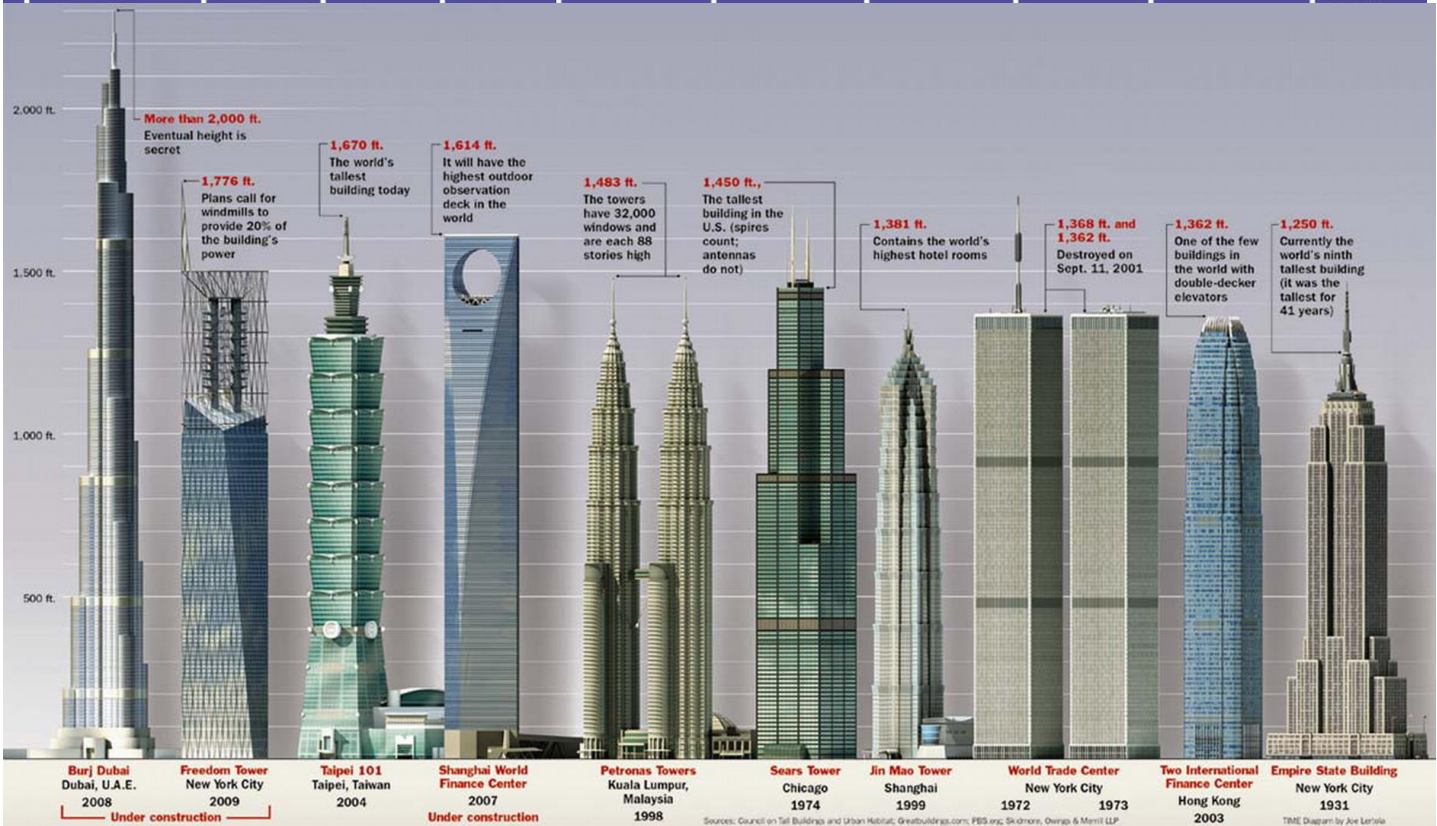
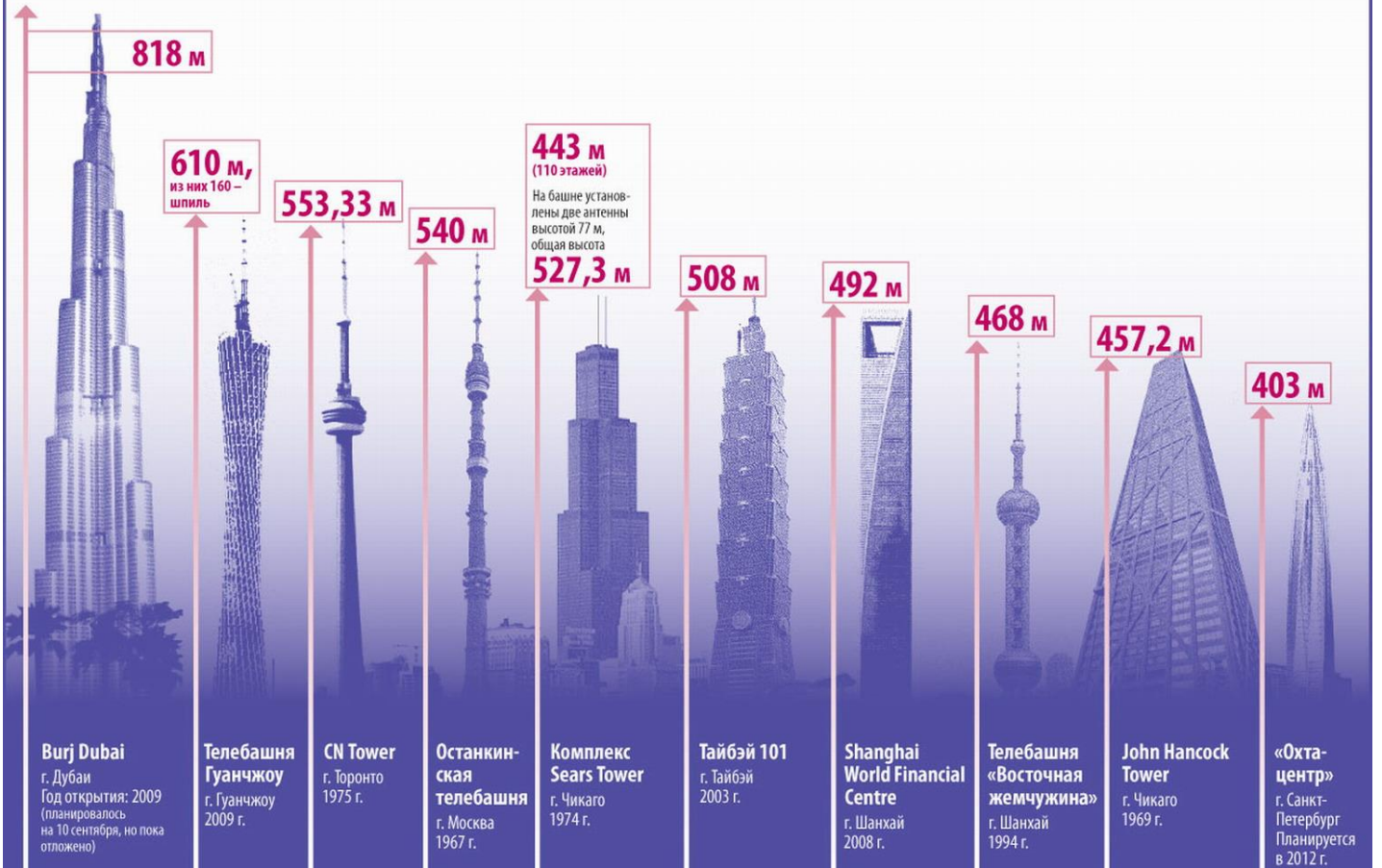
# Страничка путешественника







# САМЫЕ ВЫСОКИЕ ЗДАНИЯ В МИРЕ



## Полезные страницы в интернете

<http://www.studfiles.ru>

The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying <http://www.studfiles.ru/dir/cat15.html>. The browser interface includes a menu bar with options like 'Файл', 'Правка', 'Вид', 'Избранное', 'Сервис', and 'Справка'. Below the menu bar is a search bar and several utility icons. The main content area displays a directory of subjects under the heading 'Физика - StudFiles'. The subjects are organized into several categories:

- Геология**
- Математика**
- Механика**
- Физика**
- Химия**
- Экология**
- Прочие естественные**
- Общественные науки**
  - Безопасность жизнедеятельности
  - Военная подготовка
  - Педагогика
  - Право. Юриспруденция
  - Социология. Политология
  - Физическая культура
  - Экономика
  - Экскурсоведение. Туризм
  - Прочие общественные
- Технические науки**
  - Информатика
  - Вычислительная техника
  - Промышленность
  - Энергетика
  - Радиоэлектроника. Связь
  - Строительство
  - Теория управления
  - Электротехника
  - Прочие технические
- Атомка**
  - Атомная физика
  - В-физика
- Выч. физика**
  - Вычислительная физика
  - История и методология физики
- КМиСФ**
  - Квантовая механика и статистическая физика
  - Математическая физика
  - Модели атомных ядер
- Мол. физика**
  - Молекулярная физика
  - Нелинейная динамика
- Оптика**
  - Оптика
  - Радиофизика
- СПФ**
  - Современные проблемы физики
- Статфизика**
  - Статистическая физика
  - Строительная физика
  - Теория волн
  - Теория колебаний
  - Теория стандартной модели
  - Теория струн
- ТЭМП**
  - Теория электромагнитного поля
- Термод-ка**
  - Термодинамика
  - Физика
- ФВЭиЭЧ**
  - Физика высоких энергий и элементарных частиц
  - Физика конденсированного состояния
  - Физика плазмы
- ФТТ**
  - Физика твердого тела
  - Физика элементарных частиц
- ФФФ**
  - Философские проблемы физики
  - Электродинамика
- Эл. маг.**
  - Электромагнетизм
  - Электромагнитные поля и волны
- ЭТТ**
  - Электроника твердого тела
- Ядерка**
  - Ядерная физика

<http://www.alleng.ru/>

|   |   |
|---|---|
| <b>Общероссийские порталы и сайты</b>   | <b>ОБЖ</b><br>1. К уроку, экзамену в школе<br>2. Книги, пособия по ОБЖ  |
| <b>Астрономия</b><br>1. Сайты, учебные материалы<br>2. Экзамены, тесты, олимпиады и т.д.<br>3. Студентам - учебные материалы<br>4. Книги          | <b>Обществознание</b><br>1. К уроку по Обществознанию<br>2. Экзамены, тесты и т.д.  |
| <b>Биология</b><br>1. Сайты, учебные материалы<br>2. Экзамены, тесты, олимпиады и т.д.<br>3. Студентам - учебные материалы<br>4. Книги            | <b>Психология</b><br>1. Сайты, учебные материалы<br>2. Книги  |
| <b>География</b><br>1. Сайты, учебные материалы<br>2. Экзамены, тесты, олимпиады и т.д.<br>3. Книги   | <b>Политология</b><br>Книги   |
| <b>Здоровье</b><br>1. Физическое развитие<br>2. Оздоровление<br>3. Боевые искусства<br>4. Саморазвитие<br>5. Биоэнергетика<br>6. Сверхспособности | <b>Религиоведение</b><br>1. Сайты, учебные материалы<br>2. Книги  |
| <b>Естествознание</b><br>1. Сайты, учебные материалы<br>2. Книги  | <b>Русский язык</b><br>1. Уроки, правила русского языка<br>2. Экзамен (ЕГЭ) по русскому языку<br>3. ГДЗ по русскому языку<br>4. Студентам - учебные материалы   |
| <b>Иностранные языки:</b><br><b>Английский язык</b><br>1. Учебные сайты<br>2. Учебники (на русском. яз.)  | <b>Социология</b><br>Книги  |
|   | <b>Физика</b><br>1. К уроку физики<br>2. Решение задач по физике<br>3. Экзамен (ЕГЭ) по физике<br>4. Физика абитуриентам<br>5. Формулы и шпаргалки по физике<br>6. ГДЗ по физике<br>7. Студентам - учебники |