Лекция 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Учебники:

Грабовский Р.И. Курс физики

Трофимова Т.И. Курс физики

Разделы физики:

Механика, Молекулярная физика и Термодинамика, Электричество и магнетизм, Оптика, Атомная и ядерная физика.

Классическая механика ($M >> m_e$; $V << c$)

три раздела:

1) ***Кинематика*** изучает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение вызывают.

2) ***Динамика*** изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.

3) ***Статика*** изучает законы равновесия системы тел.

Механическое движение — это изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.

Механическое движение тела

Поступательное движение - при котором все точки движутся одинаково

Вращательное движение – при котором все точки тела описывают окружности, центры которых лежат на одной прямой, называемой ***осью вращения***

Колебания - движения, характеризуемые повторяемостью во времени.

§1 Кинематика.

Абсолютно твердым телом называется *недеформируемое тело* (форма и размеры тела не меняются).

Материальная точка– тело, формой и размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

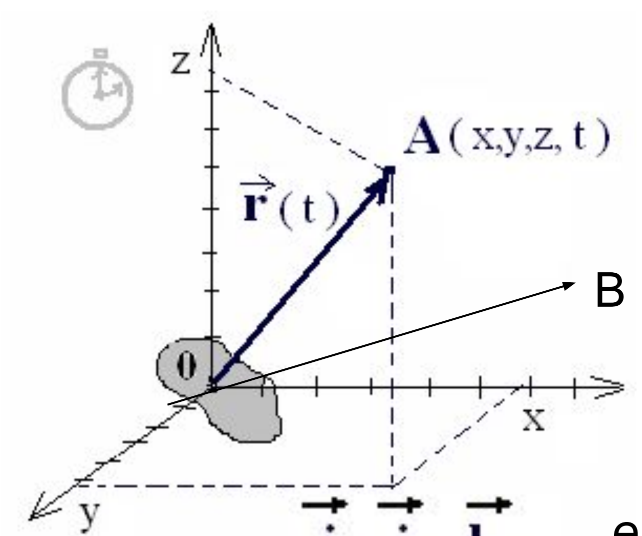
Тело отсчета – условно неподвижное тело, относительно которого рассматривается движение других тел.

Система отсчета: тело отсчета, жестко связанная с ним система координат и прибор для определения времени.

Декартова система – прямоугольная система координат

В классической механике ***время абсолютно***

Способы задания положения и движения тела



1) С помощью **радиус-вектора** $\vec{r}(t)$, проведенного из начала координат в точку нахождения тела.

2) С помощью **трех координат x,y,z**, отвечающих положению тела в данный момент времени **t** .

$$\vec{r} = x\cdot\vec{i} + y\cdot\vec{j} + z\cdot\vec{k}$$

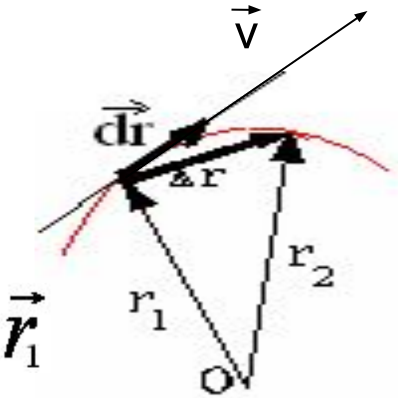
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - единичные вектора вдоль координатных осей

Траектория— линия, описываемая точкой в пространстве с течением времени.

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \Longrightarrow \begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

кинематическими уравнениями движения материальной точки

Кинематические характеристики движения



Поступательное движение

<u>Перемещение</u> - *вектор, проведенный из начального положения тела в его конечное положение.*

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

<u>Пройденный путь</u> s – скалярная величина, равная длине участка траектории между начальной и конечной точками пути.

При прямолинейном движении **$|\Delta r| = \Delta s$**.

<u>Скорость</u>*– векторная величина, равная отношению бесконечно малого перемещения ко времени этого перемещения.*

$$\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

<u>Ускорение</u> характеризует быстроту изменения скорости движения

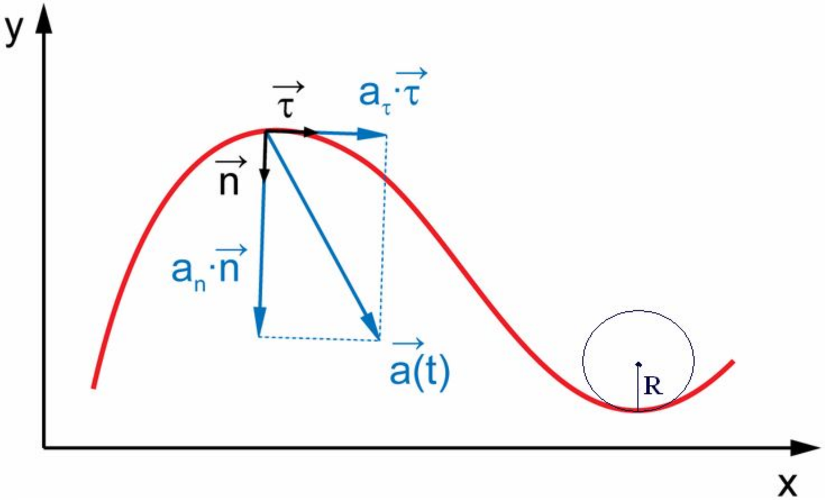
<u>Ускорение материальной точки</u> *– векторная величина, равная отношению бесконечно малого изменения скорости ко времени этого изменения.*

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Вектор ускорения можно представить в виде суммы нормальной и тангенциальной составляющих.

$$\vec{a} = a_n \cdot \vec{n} + a_\tau \cdot \vec{\tau}$$

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$$



$a_\tau = dV/dt$

$a_n = V^2/R$

R– радиус кривизны траектории в точке определения $\vec{a}$.

Нахождение пройденного пути :

Если выражение ***ds* = vdt** проинтегрировать по времени в пределах от t_1 до t_2 , *то найдем путь, пройденный точкой за время* $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$s = \int_{t_1}^{t_2} V(t)\, dt$$

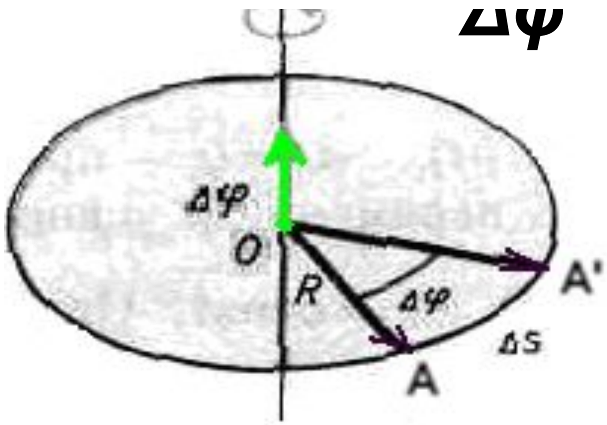
Вращательное движение

Угол поворота – аксиальный вектор, *модуль которого равен углу между начальным и конечным положением радиус-вектора R*, определяющего положения точки тела относительно оси вращения.

$\Delta\vec{\varphi}$ **в СИ – [рад]**

1об = 360° = 2π рад ≈ 6,28 рад

Период T – время одного оборота

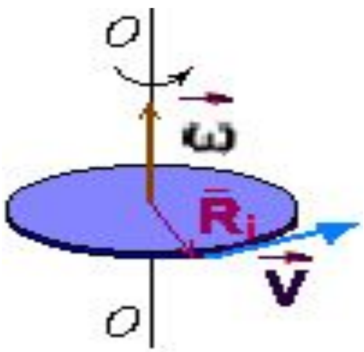


- *Аксиальные векторы* откладываются *вдоль оси вращения из любой ее точки*.
- *Направление* такое, что из конца вектора вращение видно происходящим против часовой стрелки – *правило правого винта*

Угловая скорость – *аксиальный вектор, равный отношению бесконечно малого угла поворота ко времени.*

$$\vec{\omega} = d\vec{\varphi}/dt.$$

в СИ - [рад/с]



Нахождение угла поворота :

Если выражение $d\varphi = \omega\, dt$ проинтегрировать повремени в пределах от t_1 до t_2 , то *найдем угол поворота время* t_2-t_1:

$$\varphi = \int_{t_1}^{t_2} \omega(t)\, dt$$

Соотношения между угловой скоростью ω, периодом T и частотой вращения ν:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

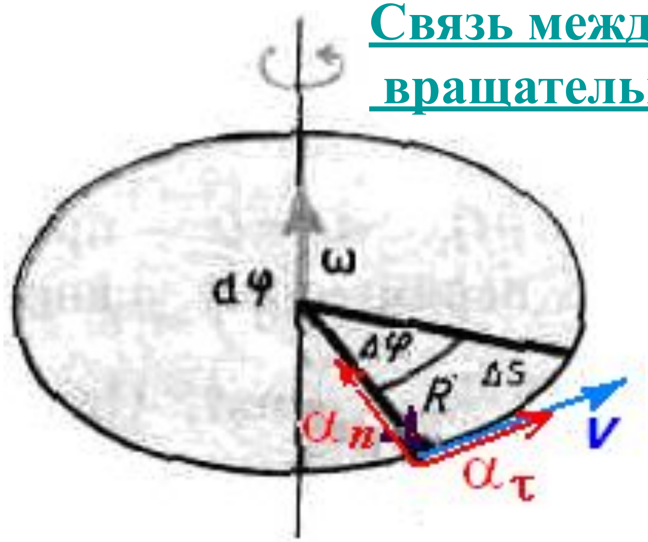
Угловое ускорение - *аксиальный вектор, равный производной от угловой скорости по времени.*

$\vec{\varepsilon} = d\vec{\omega}/dt$

в СИ - [рад/с^2].

При ускоренном вращении $\vec{\varepsilon}$ *совпадает* по направлению *с вектором угловой скорости*, при замедленном – *направлен противоположно* $\vec{\omega}$.

При вращении тела относительно неподвижной оси все точки тела движутся с одинаковыми ω и одинаковыми ε.



Связь между линейными и угловыми характеристиками вращательного движения тела.

Длина дуги окружности (пути): $\Delta s = R\Delta\varphi$,

где R – модуль радиус-вектора.

Модуль линейной скорости: $v = \omega R$

Модуль линейного тангенциального ускорения: $a_\tau = \varepsilon R$

Модуль нормального ускорения: $a_n = \omega^2 R$

Полное ускорение : $$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} = \sqrt{\varepsilon^2 R^2 + \omega^4 R^2}$$

Классификация движения по ускорению и форме траектории

Классификация движения материальной точки
(**поступательного движения тела**)

1	$a_n = 0,\ a_\tau = 0$	– равномерное прямолинейное движение
2	$a_n \neq 0,\ a_\tau = 0$	– равномерное движение по окружности
3	$a_n = 0,\ a_\tau \neq 0$	– равнопеременное прямолинейное движение
4	$a_n \neq 0,\ a_\tau \neq 0$	– неравномерное криволинейное движение

Классификация вращательного движения тела

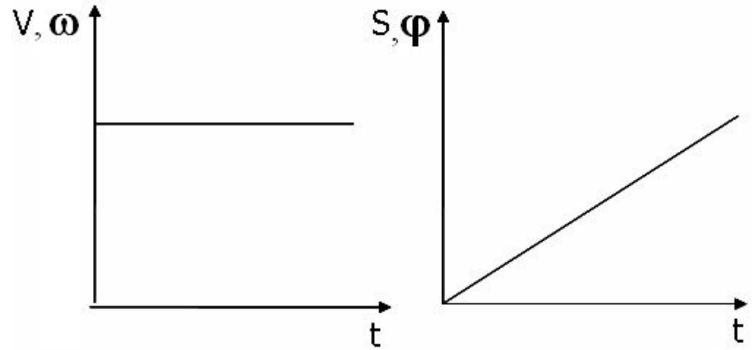
Вращение: 1. **равномерное** (**ω=const, ε=0**),
2. **равнопеременно**е (**ε=const≠0**),
3. **неравномерное**.

Поступательное | **Вращательное**

Равномерное прямолинейное движение $S = \Delta r = Vt$

Равномерное вращение $\phi = \omega t$

Графики движения



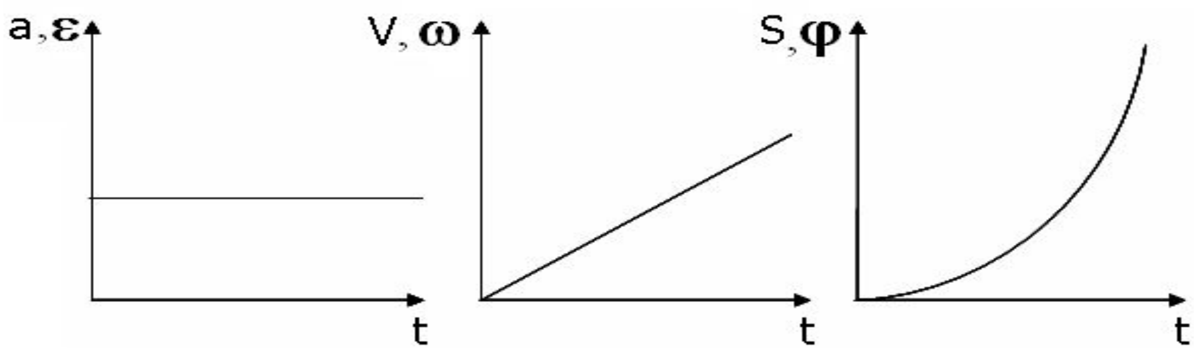
Равноускоренное прямолинейное движение $V = V_0 + at$

$$S = \Delta r = S_0 + V_0 t + \frac{at^2}{2}$$

Равноускоренное вращение $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$

$$\phi = \phi_0 + \omega_0 t + \varepsilon t^2/2$$

Графики движения (при $S_o, \varphi_o = 0$, V_o, $\omega_o = 0$)



§2 Динамика поступательного движения.

Динамика устанавливает связь между взаимодействием тел и изменениями в их движении. Сила – вектор, мера взаимодействия

Первый закон Ньютона (закон инерции)

Материальная точка сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не выведет ее из этого состояния. *m – масса, мера инертности*

Системы отсчета, где выполняется закон инерции - ***инерциальные***.

Второй закон Ньютона (основной закон динамики) $\boxed{\vec{F} = m\vec{a}}$

Под действием силы материальная точка приобретает ускорение, пропорциональное силе, и направленное так же как сила.

$$F\Delta t = mv - mv_0$$

Импульсом *точки называется* ***векторная*** *величина* $\vec{p} = m\vec{V}$

Закон изменения импульса:

Скорость изменения импульса пропорциональна действующей силе. $\boxed{\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}}$

Закон сохранения импульса:

В случае отсутствия внешних сил импульс тела (системы тел) сохраняется. $\Sigma p_i = const$

Третий закон Ньютона *Если тело В воздействует на тело А с силой* $\vec{F}_1$, *то тело А в свою очередь воздействует на тело В с силой* $\vec{F}_2$, *численно равной* $\vec{F}_1$ *и направленной в противоположную сторону.*

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

Силы **Гравитационные силы** (силы тяготения)

$$|F| = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Закон всемирного тяготения (Ньютон):

Между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек (m_1 и m_2) и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними (r^2):

$G=6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ Н•м^2/кг^2 **гравитационная постоянная.**

Силы тяготения - притяжения; направлены по прямой, соединяющей центры масс тел; не зависят от среды, в которой находятся тела. $F_{тяжести} = mg$ - сила притяжения тела к Земле

Сила упругости возникает в теле при его деформации.

Закон Гука в интегральной форме:
Абсолютное удлинение при упругой деформации пропорционально действующей силе.

$$F_{упр} = -kx$$

Закон Гука в дифференциальной форме: *Относительное удлинение ε и напряжение σ прямо пропорциональны друг другу.*

$$\sigma = E\varepsilon$$

E **- модуль Юнга,** $\varepsilon = \Delta\ell/\ell$, $\sigma = F/S$, *S* - площадь

Сила трения препятствует движению соприкасающихся тел друг относительно друга.

Трение

Сухое (внешнее) | Вязкое (внутреннее)

трение покоя

$F_{тр.ск.} = \mu N$

трение скольжения

трение качения

$F_{в.тр.} \sim v$

Центростремительная сила

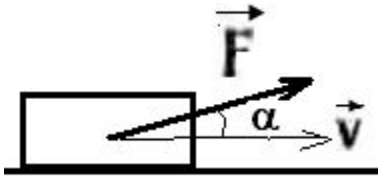
действующая на тело массой m, движущееся по окружности радиусом R,

$$F_ц = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R$$

$v(\omega)$ — линейная (угловая) скорость тела.

Работа и мощность силы

Работа постоянной силы F на прямолинейном участке пути s :



$$A = Fs\cos\alpha$$

α — угол между направлением силы и пути.

При $\alpha<\pi/2$: **работа силы >0**, $\vec{\mathbf{F}}$ совпадает по направлению с $\vec{\mathbf{v}}$

При $\alpha>\pi/2$: **работа силы <0** , $\vec{\mathbf{F}}$ направлено противоположно $\vec{\mathbf{v}}$

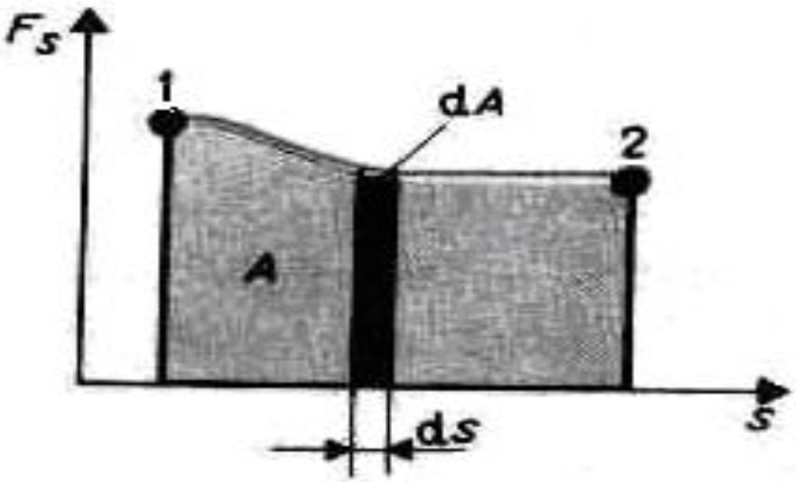
При $\alpha=\pi/2$ (сила ⊥ перемещению): **работа силы = 0**, F_s=0

В СИ — **джоуль**(Дж)

Работа переменной силы на конечном участке пути = алгебраической сумме *dA* на отдельных ds

$$A = \int_1^2 F\,ds\cos\alpha = \int_1^2 F_s\,ds$$

Графическое представление работы



$$A = \int_{t_1}^{t_2} N(t)\,dt$$

- Работа переменной мощности за конечный промежуток времени

Мощность – скалярная величина, характеризует скорость совершения работы

В СИ — **ватт** (Вт)

Для постоянной мощности

$$N = A/t = Fv\cos\alpha$$

A — работа, совершаемая за время t;
F — сила; v — скорость движения;
α — угол между направлениями силы и скорости.

Консервативными **(потенциальными)** называются силы, **работа** которых **не зависит от траектории движения**, а определяется только **начальным и конечным положением** материальной точки.
(Силы тяготения, упругости)

Если **работа**, совершаемая силой, **зависит от траектории** перемещения тела, то сила называется **неконсервативной** или **диссипативной**. (Сила трения)

Способность тела к совершению механической работы – механическая энергия

Потенциальная энергия.

Потенциальная энергия – механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и взаимодействием.

Для поля консервативных сил **работу** по изменению положения точки можно записать в виде разности 2 чисел: $A_{12}=П_1–П_2$,

$П_1$ – зависит от начального положения ; **$П_2$** – зависит от конечного положения

Тело в точке поля потенциальных сил, обладает **потенциальной энергией П.**

$$\boxed{dA = - dП}$$

Работа консервативных сил при элементарном изменении конфигурации системы равна **убыли потенциальной энергии**.

Если известна $\vec{\mathbf{F}}(\vec{\mathbf{r}})$:

$$A = \int_1^2 F\,ds\cos\alpha = \int_1^2 F_s\,ds$$

$$\boxed{П = -\int \mathbf{F}\,d\mathbf{r} + C,}$$

Потенциальная энергия определяется с точностью до произвольной постоянной С.

*Считают, что при определенной конфигурации системы **П=0**, а **П** в других положениях отсчитывают относительно нулевого уровня.*

Сила тяготения – консервативна $П = G\cdot\frac{m_1 m_2}{r}$

Сила тяжести – консервативна $П = mgh$

Сила упругости – консервативна. $П = kx^2/2$

Силы трения – неконсервативные (диссипативные)

Кинетическая энергия

Кинетическая энергия (Т)— это энергия механического движения, измеряемая работой, совершаемой телом до полной остановки.

Сила $\vec{\mathbf{F}}$, вызывая движение тела, совершает работу, а энергия движения тела изменяется на величину затраченной работы: $\underline{dA = dT}$

$$dA = (\mathbf{F}ds) = m(d\mathbf{v}/dt)ds = m(ds/dt)d\mathbf{v} = mv\,dv = dT$$

$$T = \int_0^v mv\,dv = mv^2/2$$

Тело массой *m*, движущееся со скоростью *v*, обладает кинетической энергией: $T = mv^2/2$

Кинетическая энергия всегда положительна.

Кинетическая энергия зависит от выбора системы отсчета.

Работа, совершаемая над телом на участке пути, идет на приращение кинетической энергии: $\boxed{A_{12} = T_2 - T_1}$

Полная механическая энергия — энергия механического движения и взаимодействия, равна сумме кинетической и потенциальной энергий

$$\boxed{\mathbf{T + П = E}}$$

Для материальной точки, движущейся под действием консервативных сил:

$A_{12}=T_2–T_1$ и $A_{12}=П_1–П_2$ $\longrightarrow$ $П_1–П_2 =T_2–T_1$ $\longrightarrow$ $П_1+T_1=П_2+T_2$ $\longrightarrow$ $E_1=E$

Закон сохранения механической энергии

$\boxed{T + П = E = const}$

Полная энергия материальной точки в поле консервативных сил сохраняется

Закон сохранения механической энергии для замкнутой системы:

В системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется(не изменяется со временем).

В **диссипативных системах (**имеются неконсервативные силы**)** механическая энергия постепенно уменьшается за счет преобразования в другие (немеханические) формы энергии.

Закон сохранения механической энергии для незамкнутой системы:

Изменение полной механической энергии системы равно работе, совершенной внешними силами.

§ 3 *Динамика вращательного движения*

Таблица аналогий характеристик, определяющих динамику **вращения тела вокруг неподвижной оси** и поступательное движение тела.

Поступательное движение		Вращательное движение	
Масса	m	Момент инерции	J
Сила	$\vec{F}$	Момент силы	M_z или $\vec{M}$
Импульс	$\vec{p} = m\vec{v}$	Момент импульса	$L_z = J_z\omega$
Основное уравнение динамики	$\vec{F} = m\vec{a}$ $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$	Основное уравнение динамики вращения	$M_z = J_z\varepsilon$ $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$
Работа	$dA = F_s\, ds$	Работа вращения	$dA = M_z\, d\varphi$
Кинетическая энергия	$mv^2/2$	Кинетическая энергия вращения	$J_z\omega^2/2$

Момент инерции материальной точки I_i =произведению массы материальной точки на квадрат расстояния от оси вращения до рассматриваемой точки:

$$\boxed{I_i = m_i r_i^2}$$

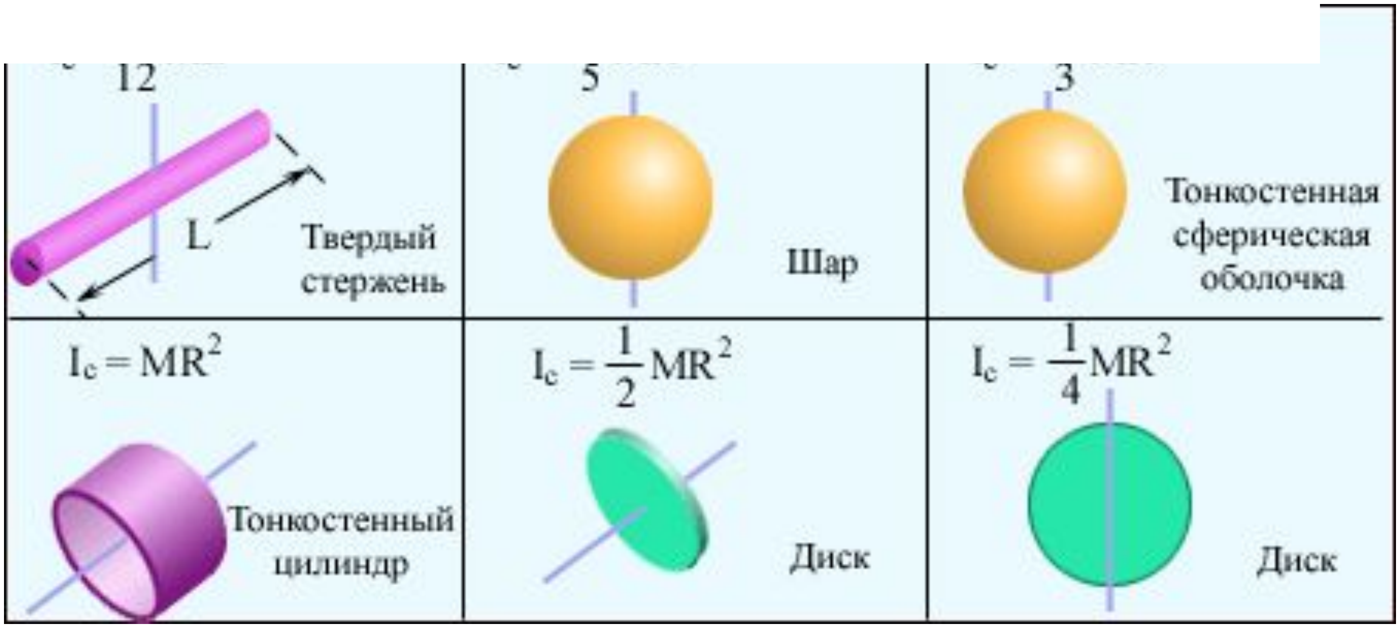
в СИ - [кг*м²].

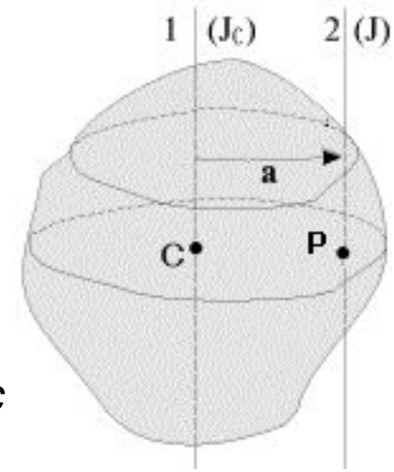
Моментом инерции тела I относительно данной оси называется скалярная величина :

$$I = \sum m_i . r_i^2$$

Момент инерции тела *зависит выбора оси вращения*.

Моменты инерции тел относительно главных осей





Теорема Штейнера: *Момент инерции I_P относительно неподвижной оси можно выразить через момент инерции I_C этого тела относительно оси, проходящей через центр масс тела и параллельной первой по формуле:* $\boldsymbol{I_P = I_C + ma^2}$

а – расстояние между осями

Моментом силы относительно неподвижной оси z называется произведение:

$$M = FR$$

В СИ –

где R — расстояние между осью вращения и прямой, вдоль которой действует сила F **, плечо силы**

Основное уравнение динамики вращения

$$\boxed{M = J\varepsilon}$$

ε — угловое ускорение вращающегося тела;
J — момент инерции тела.

Моментом импульса материальной точки **относительно неподвижной оси** называется произведение: **L = pR = mvR**

где R — расстояние между осью вращения и прямой, вдоль которой действует импульс **p**

$$L_z = \sum_{i=1}^{n} m_i v_i r_i = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 \omega = \omega \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 = I_z \omega$$

$$\boxed{L_z = I_z\omega}$$

L и **M** — *аксиальные вектора*, их направление совпадает с направлением угловой скорости и углового ускорения соответственно.

Закон сохранения момента импульса в изолированной системе:

$$\Sigma L_i = \sum_{i=1} J_i\omega_i = \text{const}$$

Закон изменения момента импульса: d**L**/dt=**M** **Скорость изменения момента импульса твердого тела = моменту сил относительно той же оси.**

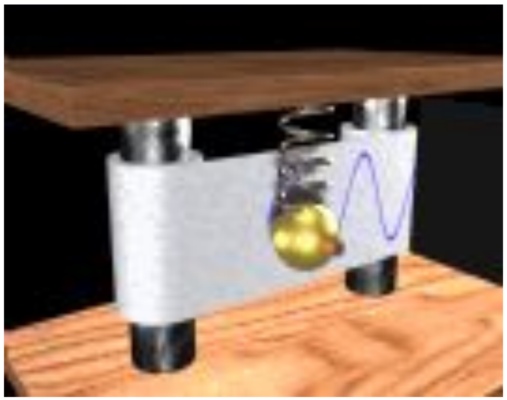
При сложном движении тела кинетическая энергия **складывается** из **энергии поступательного движения** и **энергии вращения**:

$$\boxed{T = \frac{mv_C^2}{2} + \frac{I_C\omega^2}{2}}$$

§ 4. Гармонические колебания и их характеристики

Периодические процессы — процессы, повторяющиеся через равные промежутки времени (период колебания T – время одного полного колебаия).

Гармонические колебания — колеблющаяся величина изменяется со временем по гармоническому закону (синуса или косинуса).



Свободные колебания пружинного маятника.

Уравнение гармонического колебания

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$$

A - максимальное значение колеблющейся величины – **амплитуда колебаний,**

$\omega t+\phi_o$ **- фаза колебаний в момент времени** t

ω - **круговая (циклическая) частота,** ϕ_o **- начальная фаза колебаний**

За период фаза гармонического колебания получает приращение 2π.

$\omega(t+T)+\phi=(\omega t+\phi_o)+2\pi \Rightarrow T=2\pi/\omega$ $\quad \nu=1/T$ - частота (Гц)

Скорость и ускорение точки, совершающей гармонические колебания:

$$v = \frac{\partial x}{\partial t} = A\omega\cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = -A\omega^2\sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x$$

Возвращающая сила

$$F= ma= -m\omega^2 x= -kx$$

пропорциональна смещению точки из положения равновесия и направлена к положению равновесия

Для пружинного маятника

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \qquad T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

m – масса точки, k – коэффициент возвращающей силы, жесткость пружины

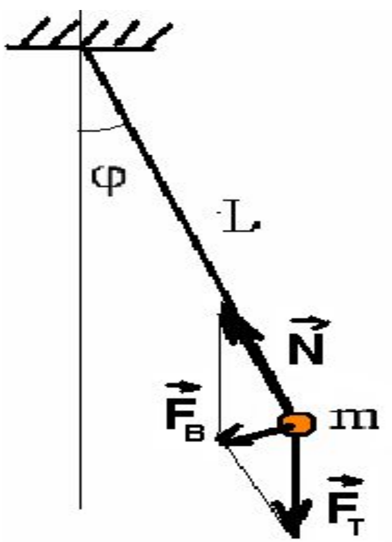
Кинетическая Т, потенциальная П и полная Е энергия гармонического колебания:

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{2\pi^2 A^2 m}{T^2}\cos^2\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

$$\Pi = \frac{kx^2}{2} = \frac{2\pi^2 A^2 m}{T^2}\sin^2\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

$$E = T + \Pi = \frac{2\pi^2 A^2 m}{T^2} = mA^2\omega^2/2$$

Е остается постоянной, при гармонических колебаниях справедлив закон сохранения механической энергии (упругая сила консервативна)



Математическим маятником называется тело небольших размеров(материальная точка), подвешенное на длинной, невесомой и нерастяжимой нити.

Для малых колебаний математического маятника

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}, \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

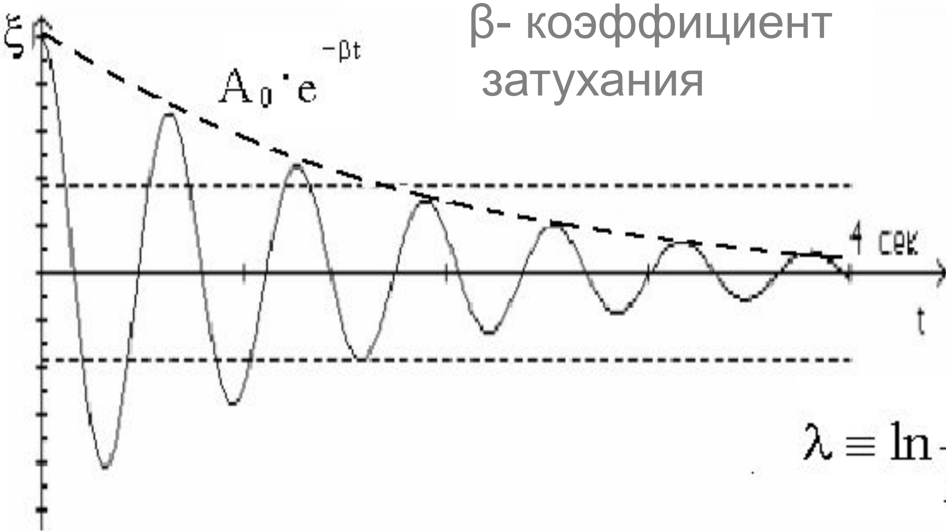
L – длина маятника, g– ускорение свободного падения

§ 4. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс.

В реальных системах всегда присутствуют силы трения. Колебания затухают.

При наличие затухания в системе существуют потери энергии - переход механической энергии в тепловую.

С течением времени уменьшается амплитуда колебаний. $A = A_0 \cdot e^{-\beta t}$



β- коэффициент затухания

По сравнению с частотой свободных колебаний ω_o частота колебаний системы при затухании уменьшается а период увеличивается

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda \equiv \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \ln e^{\beta T} = \beta T$$

Чтобы колебания не затухали, нужно периодически подводить энергию.

Вынужденные колебания - это колебания, происходящие под действием периодического внешнего воздействия.

Внешняя сила, изменяющаяся по гармоническому закону: $\boxed{F(t) = F_0 \cdot \mathrm{Cos}\ \omega t}$

Установившиеся вынужденные колебания – гармонические колебания с частотой вынуждающей силы:

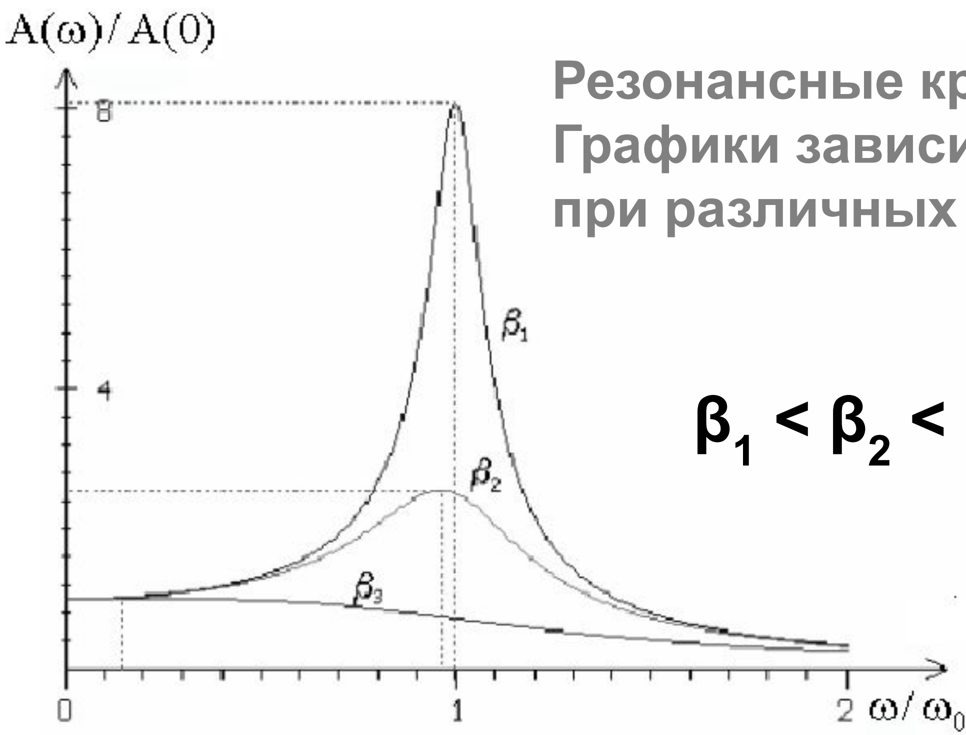
$$\xi(t) = A \cdot \mathrm{Cos}(\omega t - \varphi)$$

Амплитуда вынужденных колебаний изменяется с изменением частоты внешнего воздействия.

$A = A(\omega)$

При определенной частоте вынуждающей силы **амплитуда резко возрастает, достигая максимума**. Это **явление называется резонансом,** а соответствующая **частота - $\omega_{рез}$ - резонансной**.

$$\boxed{\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}}$$



Резонансные кривые - Графики зависимости A(ω) при различных β .

$\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$

$2\beta_3^2 > \omega_0^2$,
резонанс отсутствует

Вынужденные колебания – это **незатухающие** колебания. Неизбежные потери энергии на трение компенсируются подводом энергии от внешнего источника периодически действующей силы.

§ 7. Описание упругой гармонической волны

Волна – процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени. **Источник волны** - колебательный процесс

Упругая волна - это процесс распространения колебаний в упругой среде, **отдельные части которой упруго связаны между собой.** .

Направление распространения волны называется лучом.

Если колебания происходят в направлении распространения волны (луча), волна называется продольной

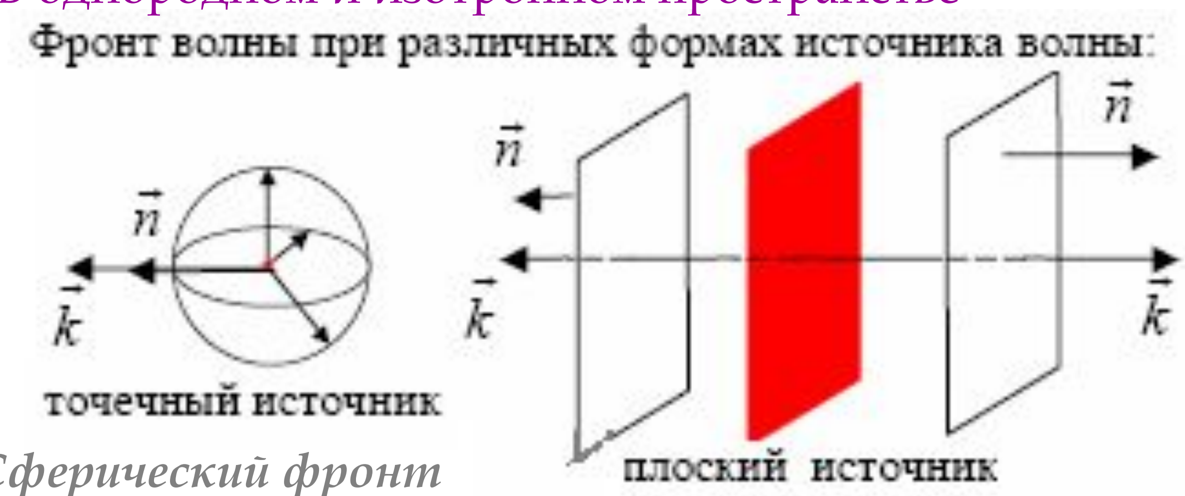
Если колебания происходят в направлении перпендикулярном к лучу, волна называется поперечной.

Описание движения

корпускулярного – ***траектория.***

волнового – ***волновая поверхность и фронт волны.***

В однородном и изотропном пространстве



Сферический фронт Сферическая волна.

Фронт плоскость – Плоская волна

Фронт волны – поверхность, отделяющая возмущенную область пространства от невозмущенной.

Геометрическое место точек, колеблющихся в одной фазе, называется **волновой поверхностью**. Фронт волны – передовая волновая поверхность.

Волновые поверхности для плоской волны представляют собой систему параллельных плоскостей.
Для сферической волны - ***систему концентрических сфер.***

Волна называется гармонической или монохроматической, если колебания осуществляются по закону Sin или Cos с определенной циклической частотой.

Период колебаний **T** - время одного колебания – период волны.

Длина волны - это расстояние, на которое распространяется волна за один период колебаний.

$$\boxed{\lambda = vT}$$

$$T = \frac{1}{\nu}$$

- связь между периодом и частотой колебаний

Связь между длиной волны и частотой и циклической частотой волны

$$\boxed{\lambda = \frac{v}{\nu}}$$

$$\boxed{\lambda = 2\pi v / \omega}$$

Уравнение плоской волны, распространяющейся в направлении x.

$$\xi(x,t) = A \cdot \mathrm{Cos}\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \alpha\right]$$

$$\boxed{\xi(x,t) = A \cdot \mathrm{Cos}(\omega t - kx + \alpha)}$$

$$\boxed{k = \frac{\omega}{v}}$$ - волновое число

Характерное свойство бегущей волны – перенос энергии без переноса вещества.

Среда, в которой распространяется упругая волна,обладает дополнительной энергией деформации ***W*** .

Процесс переноса энергии характеризует

Вектор плотности потока энергии – вектор Умова: $\vec{u} = w\vec{v}$

w – плотность энергии упругой гармонической волны, v – скорость волны

Интенсивность волны – модуль среднего значения вектора Умова:

Среднее по времени значение ***w*** $\overline{w} = \frac{1}{2}\rho A^2\omega^2$

$$I = \left|\vec{u}\right| = \overline{w}\left|\vec{v}\right| = \frac{1}{2}\rho A^2\omega^2 v.$$

где *ρ* – плотность вещества,
A – амплитуда, ω – циклическая частота, v – скорость волны

Самостоятельно разобрать:

1. Сложение колебаний
2. Гидростатика(законы Архимеда, Паскаля)
3. Гидродинамика (уравнения неразрывности, Бернулли)