



ФИЗИКА

Физические

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Определение

□ **Механика** – раздел физики, в котором изучается механическое движение.

□ **Механическое движение** – изменение положения данного тела(или частей тела) относительно других тел, происходящее во времени и пространстве.

Механика

- ▣ **Механика Галилея — Ньютона** называется **классической механикой**. В ней изучаются законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света c в вакууме.
- ▣ **Ограниченность применимости классической механики:**
тела больших масс (по сравнению с массой атомов), движущихся с малыми скоростями (по сравнению со скоростью света).

Механика

Механика делится на три раздела:

1) кинематику; 2) динамику; 3) статику.

- ▣ *Кинематика* изучает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение обуславливают.
- ▣ *Динамика* изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.
- ▣ *Статика* изучает законы равновесия системы тел. Если известны законы движения тел, то из них можно установить и законы равновесия. Поэтому законы статики отдельно от законов динамики физика не рассматривает.



Механика

ЭЛЕМЕНТЫ

КИНЕМАТИКИ

Кинематика

поступательного движения

- **Материальная точка** – тело, размеры которого несущественны (ими можно пренебречь) в рамках какой-либо конкретной задачи.
- **Абсолютно твердое тело** – тело, у которого расстояние между любыми двумя его точками неизменно.

кинематика

поступательного движения

Любое движение твердого тела можно представить как комбинацию поступательного и вращательного движений.

Поступательное движение — это движение, при котором любая прямая, жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению.

Вращательное движение — это движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой **осью вращения**.

Кинематика поступательного движения

$x=x(t), y=y(t), z=z(t)$
Кинематические уравнения
движения материальной
точки $\vec{r} = \vec{r}(t)$



Рис. 1

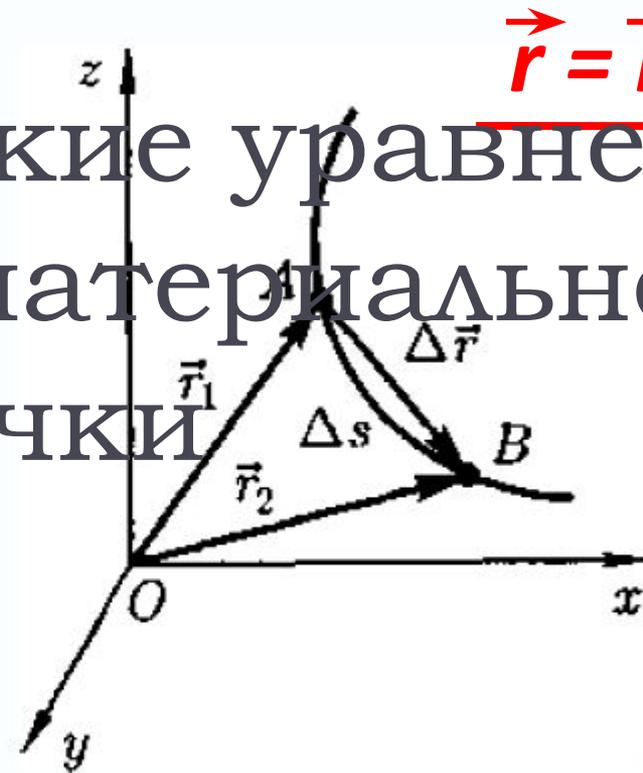
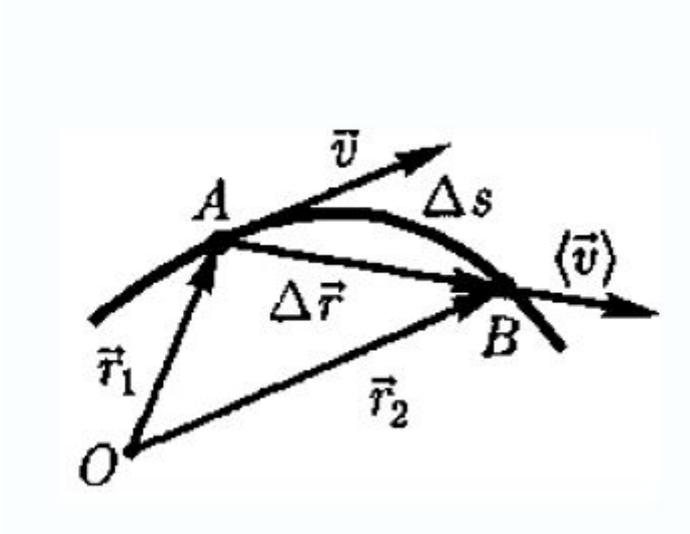


Рис. 2

Скорость

Для характеристики движения материальной точки вводится векторная величина — скорость, которой определяется как *быстрота движения, так и его направление в данный момент времени.*

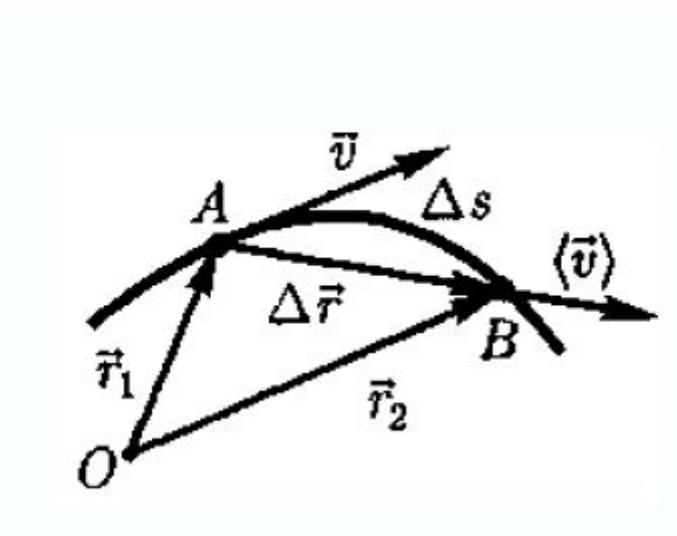
Вектором средней скорости называется отношение приращения радиуса-вектора точки к промежутку времени Δt :



$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Скорость

При неограниченном уменьшении Δt средняя скорость стремится к предельному значению, которое называется **мгновенной скоростью v** :



$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

$$v = |\vec{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} =$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

$$v = \frac{ds}{dt}$$

- модуль мгновенной скорости

Ускорение и его составляющие

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

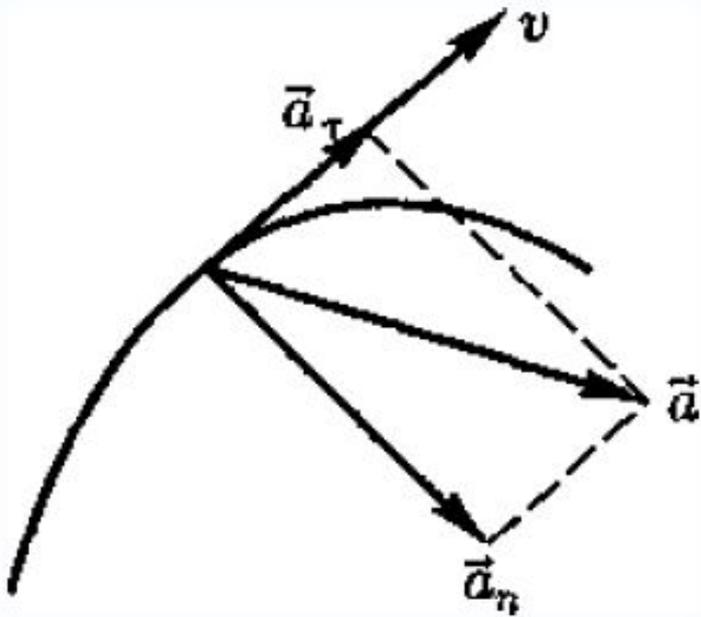
Среднее ускорение

неравномерного движения Δ в интервале от t до $t + \Delta t$

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Мгновенным ускорением \vec{a} материальной точки в момент времени t будет предел среднего ускорения:

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



Ускорение и его составляющие

Тангенциальная составляющая ускорения

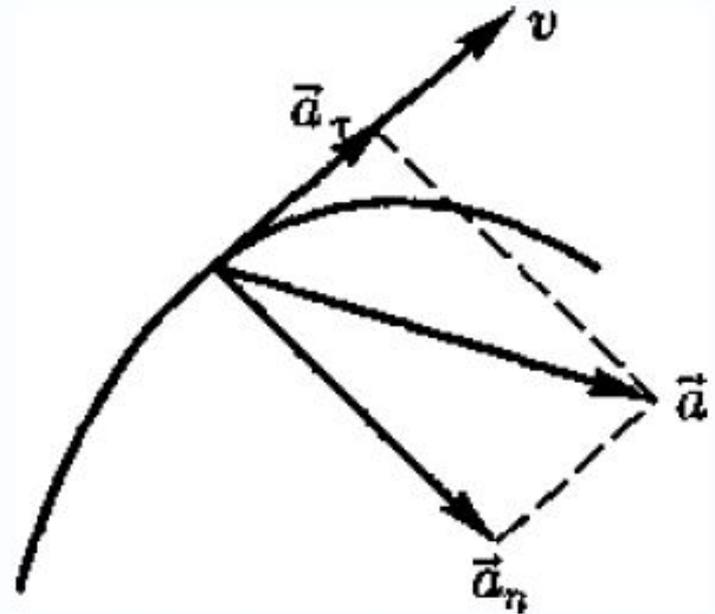
$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt}.$$

Нормальная составляющая ускорения

$$a_n = \frac{v^2}{R}.$$

Модуль полного ускорения тела

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



Ускорение и его составляющие

В зависимости от тангенциальной и нормальной составляющих ускорения движение можно классифицировать следующим образом:

- 1) $a_T = a_n = 0$ — прямолинейное равномерное движение;
- 2) $a_T = a = \text{const}$, $a_n = 0$ — прямолинейное равнопеременное движение.

При таком виде движения $v = v_0 + at$.

Длина пути

$$s = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t + \frac{at^2}{2};$$

движения

- 3) $a_T = f(t)$, $a_n = 0$ — прямолинейное движение с переменным ускорением a_T .

4) $a_T = 0$, $a_n = \text{const}$. При $a_n = 0$ скорость изменяется только по направлению. Движение по окружности является равномерным.

Переход к вращательному движению

Поступательное движение

S путь

$$v = \Delta S / \Delta t \quad \text{скорость}$$

$$a = \Delta v / \Delta t \quad \text{ускорение}$$

$$S = v t \quad \text{Равномерное движение}$$

$$v = v_0 + a t \quad \text{Равноускоренное движение}$$

$$S = v_0 t + a t^2 / 2$$

$$F = m a \quad \text{сила}$$

$$m = \rho V \quad \text{масса}$$

$$\Sigma F = m a \quad \text{2 закон Ньютона}$$

$$E = (m v^2) / 2 \quad \text{Кинематическая энергия}$$

Вращательное движение

φ Угол

$$\omega = \Delta \varphi / \Delta t \quad \text{Угловая скорость}$$

$$\beta = \Delta \omega / \Delta t \quad \text{Угловое ускорение}$$

$$\varphi = \omega \Delta t$$

$$\omega = \omega_0 + \beta t$$

$$\varphi = \omega_0 t + \beta t^2 / 2$$

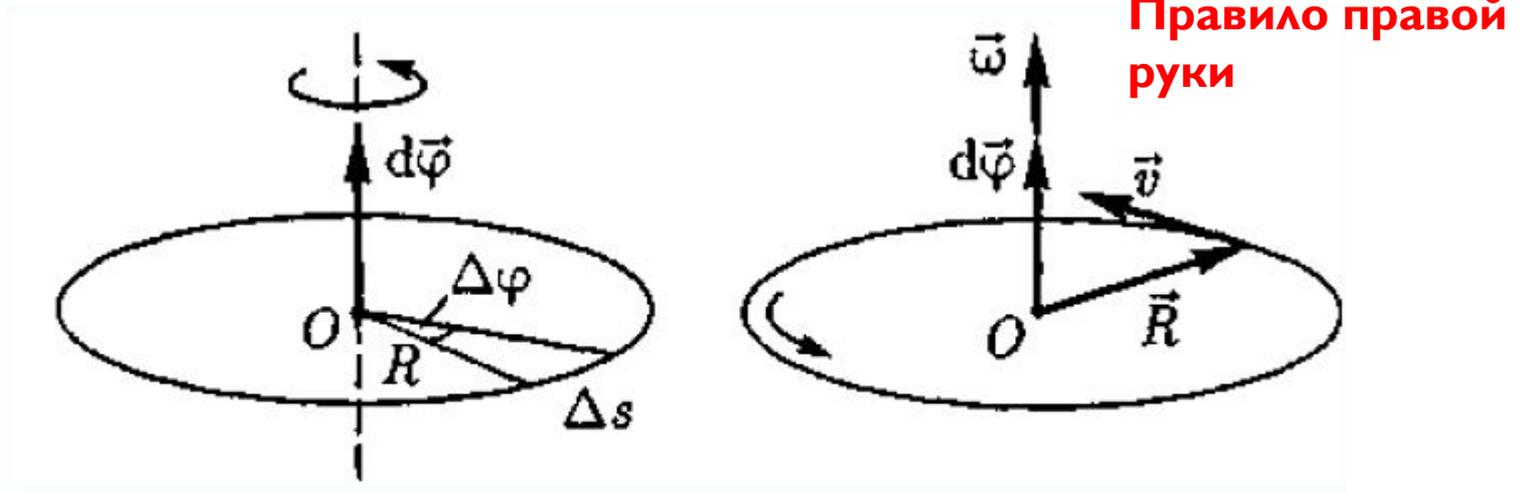
$$M = F d \quad \text{Момент силы}$$

$$J = m r^2 \quad \text{Момент инерции}$$

$$M = \beta J$$

$$E = (J \omega^2) / 2$$

Угловая скорость и угловое ускорение



Угловой скоростью называется векторная величина, определяемая первой производной угла поворота тела по времени:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}.$$

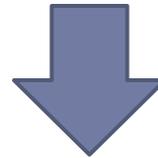
Угловая скорость и угловое ускорение

Связь линейной скорости точки с угловой скоростью

$$v = \omega R.$$

Если $\omega = \text{const}$, то вращение равномерное и его можно характеризовать **периодом вращения T — временем, за** которое точка совершает один полный оборот, т. е. поворачивается на угол 2π . Так как промежутку времени $\Delta t = T$ соответствует

$$\Delta\varphi = 2\pi, \text{ то } \omega = \frac{2\pi}{T}$$



Угловая скорость и угловое ускорение

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

Число полных оборотов, совершаемых телом при равномерном его движении по окружности в единицу времени, называется **частотой вращения**:

$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

Угловым ускорением называется векторная величина, определяемая первой производной угловой скорости по времени:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$



Угловая скорость и угловое

Таким образом, связь между линейными (длина пути s , пройденного точкой по дуге окружности радиусом R , линейная скорость v , тангенциальное ускорение a_τ , нормальное ускорение a_n) и угловыми величинами (угол поворота φ , угловая скорость ω , угловое ускорение ε) выражается следующими формулами:

$$s = R\varphi, \quad v = R\omega, \quad a_\tau = R\varepsilon, \quad a_n = \omega^2 R.$$

В случае равнопеременного движения точки по окружности ($\varepsilon = \text{const}$)

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t, \quad \varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2},$$

▶ где ω_0 — начальная угловая скорость.

Механика

**ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ
ТОЧКИ
И ПОСТУПАТЕЛЬНОГО
ДВИЖЕНИЯ**

ТВЕРДОГО ТЕЛА

Основные понятия

- ▣ **Сила** — это векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры.
- ▣ **Масса m** — свойство тел, определяющее их бесконтактное взаимодействие с другими телами и инертность (способность сохранять скорость)..
- ▣ **Импульс тела \vec{p}** (количество движения) — произведение массы тела на вектор его скорости:

$$\vec{p} = m\vec{v}, [p] = \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}.$$

Типы взаимодействия

Различные взаимодействия, известные в современной физике,

сводятся к четырем типам, а именно:

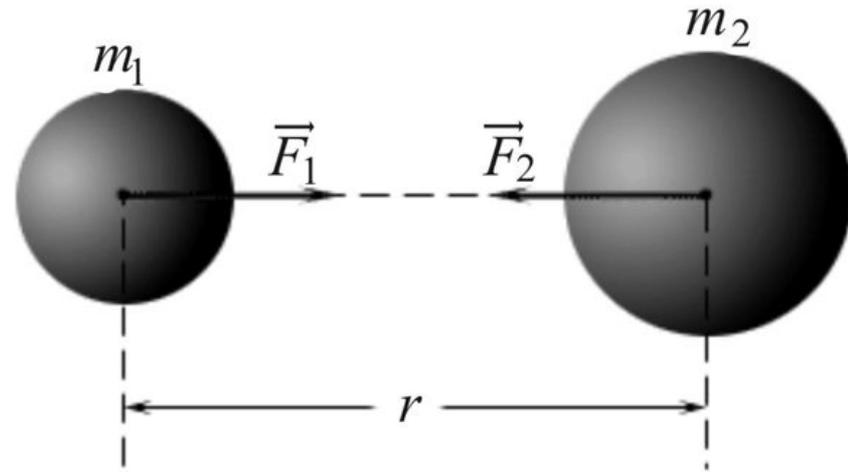
- 1) *гравитационное взаимодействие, возникающее между всеми телами, обладающими массой;*
- 2) *электромагнитное взаимодействие между телами или частицами, обладающими электрическими зарядами;*
- 3) *сильное взаимодействие, существующее, например, между частицами, из которых состоят ядра атомов;*
- 4) *слабое взаимодействие, характеризующее, например, процессы превращения некоторых элементарных частиц.*

Силы в механике

- В задачах механики учитываются гравитационные силы (силы тяготения) и две разновидности электромагнитных сил – силы упругости и силы реакции (нормальной реакции и трения).
- *Силы тяготения – силы, возникающие между всеми телами в соответствии с законом всемирного тяготения Ньютона: между двумя материальными точками действуют силы взаимного притяжения, прямо пропорциональные массам этих точек и обратно пропорциональные квадрату расстояния между ними (эти силы направлены вдоль прямой, соединяющей данные материальные точки*

Силы в механике

$$F_{\text{тяг}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$



□ Гравитационная постоянная G – фундаментальная константа, коэффициент пропорциональности в законе всемирного тяготения

$$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

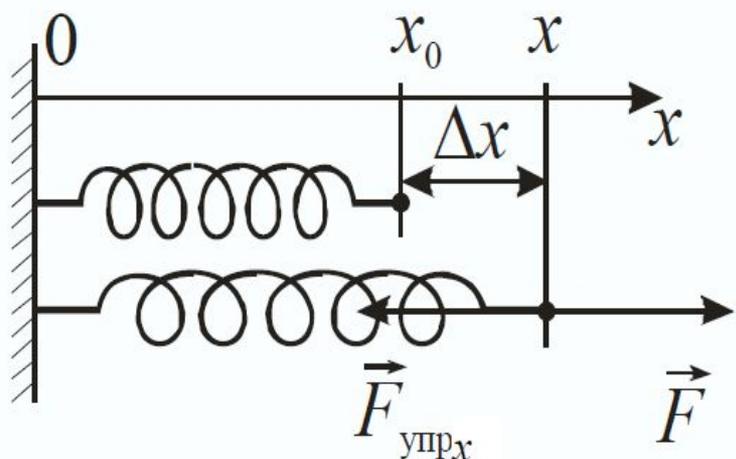
Силы в механике

- С каждым телом неразрывно связано гравитационное поле, проявляющееся в том, что на помещенную в поле материальную точку действует гравитационная сила, пропорциональная массе этой точки.
- Силовой характеристикой гравитационного поля является *напряженность гравитационного поля (ускорение свободного падения) в данной точке пространства.*
- Сила, действующая на тело массой m со стороны гравитационного поля в точке с напряженностью g , называется *силой тяжести:*

$$\vec{F} = m\vec{g}$$

Силы упругости – силы, возникающие при упругой деформации тел.

Деформация называется *упругой*, если после прекращения действия внешних сил восстанавливаются прежние размеры и форма тела.



Установленный экспериментально закон Гука утверждает, что *при упругой деформации удлинение образца пропорционально внешней силе* (рис. 1.11):

$$F_{\text{упр}_x} = -k \Delta x,$$

где k – жесткость (коэффициент упругости) образца или пружины, Н/м; Δx –

абсолютное удлинение образца (абсолютная деформация), $\Delta x = x - x_0$,

x_0 – длина нерастянутого образца.

Силы в механике

Сила реакции опоры \vec{R} (натяжения нити \vec{T}) – сила, действующая на тело со стороны опоры (подвеса). При этом силу, с которой тело действует на опору или подвес, называют *весом* \vec{P} тела.

Силу реакции опоры \vec{R} чаще рассматривают как сумму двух сил: силы *нормальной реакции опоры* \vec{N} , направленной перпендикулярно поверхности опоры, и *силы трения* $\vec{F}_{\text{тр}}$, направленной вдоль этой поверхности:

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}}.$$

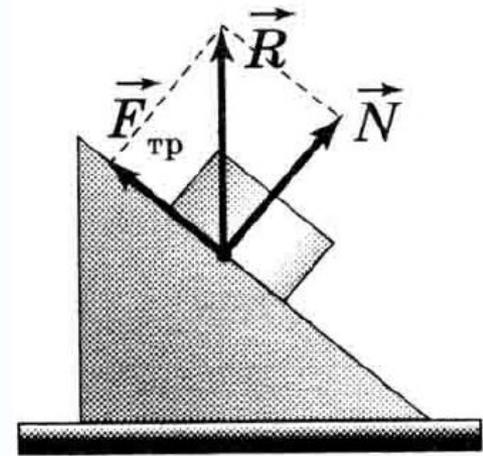
Силы в механике

При контакте гладких поверхностей $F_{\text{тр}} = 0$ и $\vec{R} = \vec{N}$. Для шероховатых поверхностей в простейшем случае формулируется закон сухого трения: *при скольжении модуль силы трения прямо пропорционален модулю силы нормальной реакции опоры:*

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ – безразмерный коэффициент трения, зависящий от типов соприкасающихся поверхностей.

В состоянии покоя модуль и направление силы трения заранее неизвестны, поэтому их находят из условий равновесия.



Сила трения

Различают **внешнее** (сухое) и **внутреннее** (жидкое или вязкое) трение.

Внешним трением называется трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении.

- **Трение покоя** (соприкасающиеся тела неподвижны относительно друг друга)
 - **Трение скольжения**
 - **Трение качения**
- } (происходит относительное перемещение этих тел)
-



Сила трения

Различают **внешнее** (сухое) и **внутреннее** (жидкое или вязкое) трение.

Внутренним трением называется трение между частями одного и того же тела (между различными слоями жидкости или газа, скорости которых меняются от слоя к слою).



Законы Ньютона

Первый закон Ньютона: всякая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока *воздействие со стороны других тел не* заставит ее изменить это состояние.

Законы Ньютона

Второй закон Ньютона: ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела).

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Законы Ньютона

Третий закон Ньютона: *всякое* действие материальных точек (тел) друг на друга носит характер взаимодействия; силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки, всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21},$$



Закон сохранения импульса

- ▣ **Силы взаимодействия между материальными точками механической системы называются внутренними.**
- ▣ **Силы, с которыми на материальные точки системы действуют внешние тела, называются внешними.**
- ▣ Механическая система тел, на которую не действуют внешние силы, называется **замкнутой (или изолированной)**

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const}.$$



Механика

Работа и

энергия

Энергия, работа, мощность

Изменение механического движения тела вызывается силами, действующими на него со стороны других тел.

Чтобы количественно характеризовать процесс обмена энергией между взаимодействующими телами, в механике вводится понятие **работы силы**.

$$A = F_s s = F s \cos \alpha.$$

Единица работы — **джоуль**
(Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Энергия, работа, мощность

Чтобы охарактеризовать скорость совершения работы, вводят понятие **МОЩНОСТИ**:

$$N = \frac{A}{t}$$

За время dt сила F совершает работу Fdr , и мощность, развиваемая этой силой, в данный момент времени

$$N = \frac{\vec{F} d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \vec{v},$$

Единица мощности — **ватт (Вт)**:

1 Вт — мощность, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж (1 Вт = 1 Дж/с).

Потенциальные силы в механике

- *Потенциальными (консервативными) называются силы, работа которых зависит только от начального и конечного положения перемещающегося в пространстве тела и не зависит от формы траектории. При замкнутой траектории работа потенциальной силы всегда равна нулю. Примерами потенциальных сил являются силы тяжести и упругости.*
- *Силы, работа которых зависит от формы траектории, называются непотенциальными. Примерами непотенциальных сил являются силы трения и сопротивления.*
- *Система тел называется консервативной, если внутренние и внешние силы, действующие на тела системы, являются потенциальными, иначе система называется неконсервативной (диссипативной).*

Кинетическая и потенциальная энергии

▣ **Потенциальная энергия** — механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

$$dA = -d\Pi.$$

▣ Потенциальная энергия тела массой m , поднятого на высоту h над поверхностью Земли

$$\Pi = mgh,$$

Кинетическая и потенциальная энергии

- ▣ **Кинетическая энергия механической системы**
— энергия механического движения этой системы.

$$dA = dT.$$



$$T = \frac{mv^2}{2}.$$

Полная механическая энергия системы

Полная механическая энергия системы — энергия механического движения и взаимодействия:

$$E = T + \Pi,$$

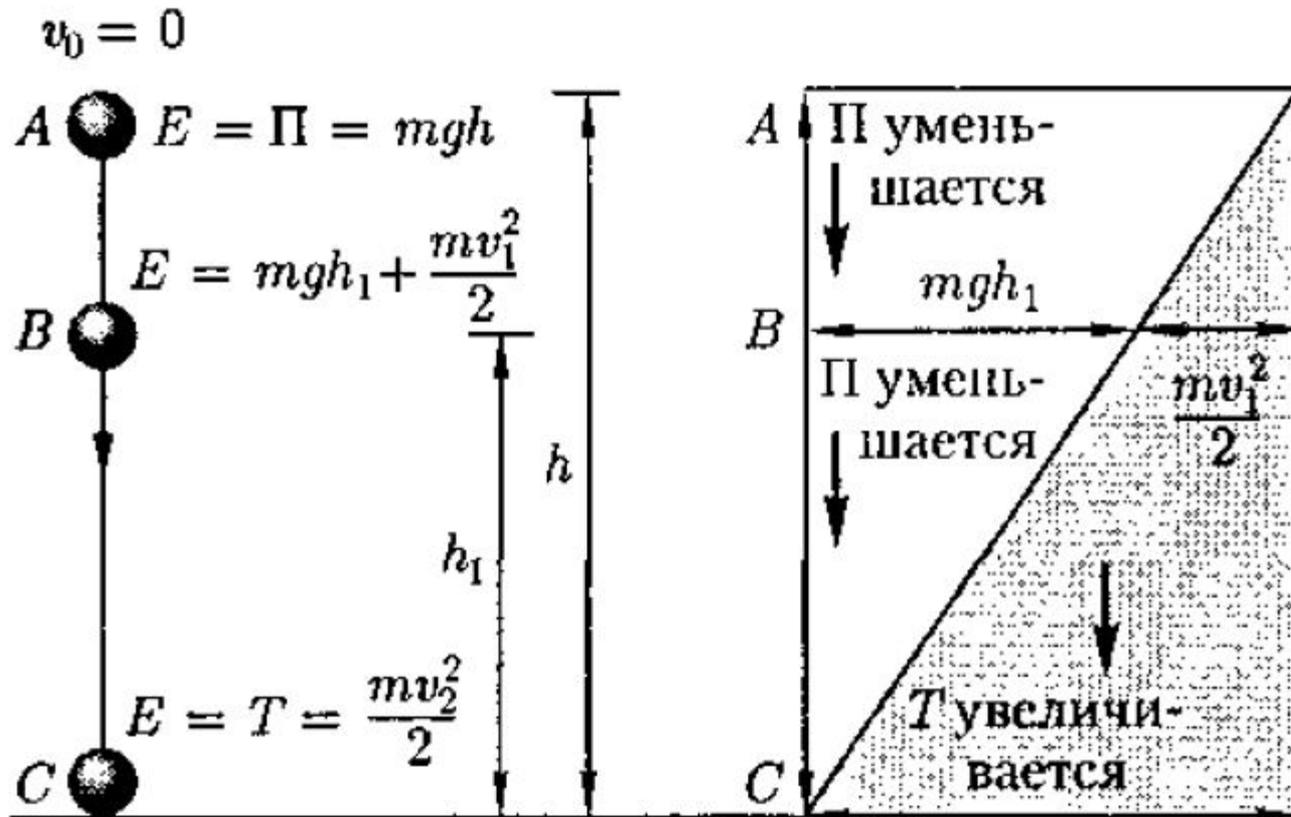
т. е. равна сумме кинетической и потенциальной энергий.

Закон сохранения механической энергии

- ▣ **Закон сохранения механической энергии:** в системе тел, между которыми действуют только **консервативные силы**, полная механическая энергия сохраняется, т. е. не изменяется со временем.
- ▣ Механические системы, на тела которых действуют только консервативные силы (внутренние и внешние), называются **консервативными системами**.

$$T + \Pi = E = \text{const},$$

Закон сохранения механической энергии



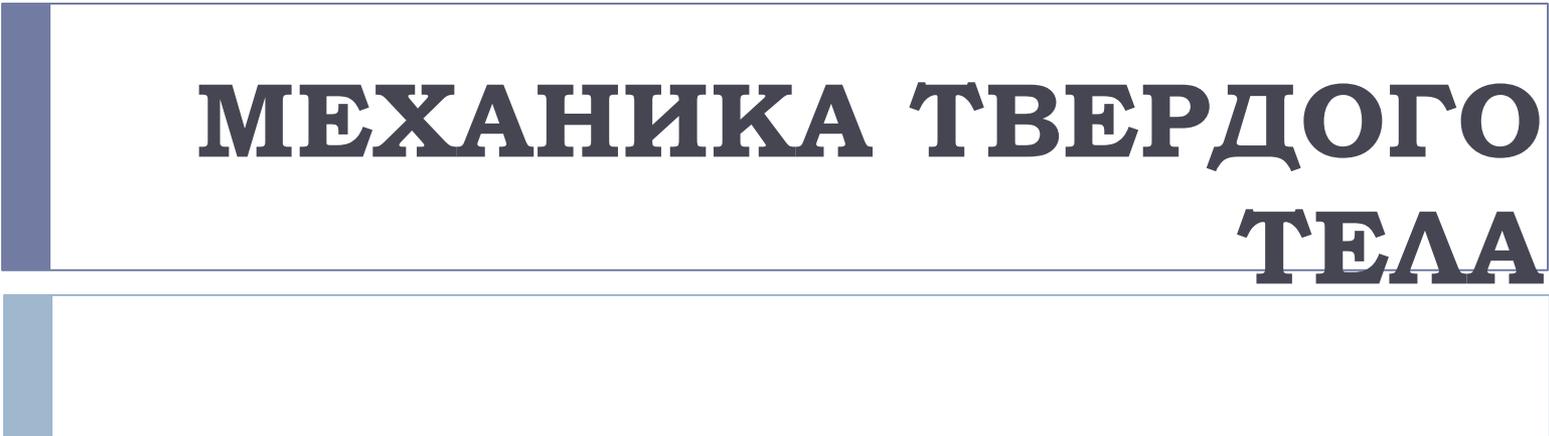
Закон сохранения механической энергии

Энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой.

*В этом и заключается физическая сущность **закона сохранения и превращения энергии** — сущность неуничтожимости материи и ее движения.*



Механика



МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

В динамике поступательного и вращательного движений существуют следующие аналогии:

существуют следующие аналогии:

Физические величины			
Масса	m , кг	Момент инерции	I_z , кг·м ²
Сила	\vec{F} , F_x , Н	Момент силы	\vec{M}_O , M_z , Н·м
Импульс	\vec{p} , p_x , кг·м/с	Момент импульса	\vec{L}_O , L_z , кг·м ² /с

В динамике поступательного и вращательного движений суще-

ствуют следующие аналогии:

Поступательное движение	Вращательное движение
Основное уравнение для тела	
$m a_{Cx} = \sum_i F_{ix}^{\text{внеш}}$	$I_z \varepsilon = \sum_i M_{zi}^{\text{внеш}}$
Работа, Дж	
$\Delta A = F_{\tau} \Delta s$	$\Delta A = M_z \Delta \varphi$
Мощность, Вт	
$N = F_{\tau} v$	$N = M_z \omega$
Кинетическая энергия, Дж	
$W_k = \frac{mv^2}{2}$	$W_k = \frac{I_z \omega^2}{2}$

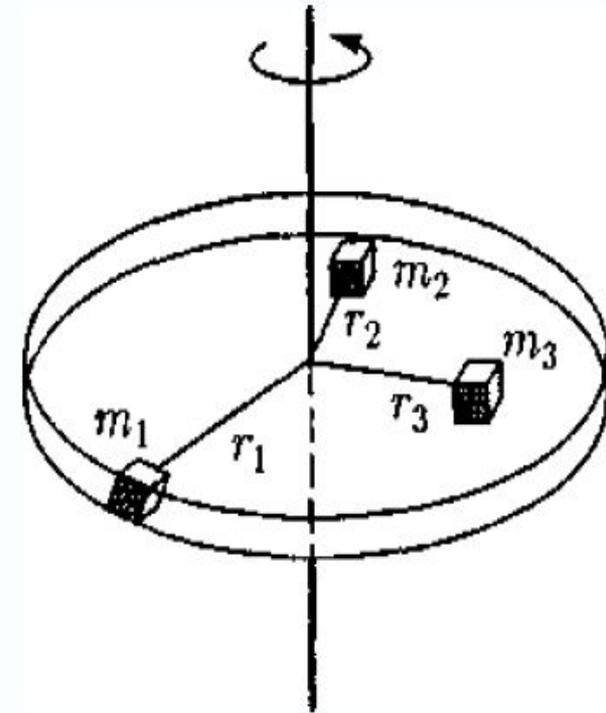
Момент инерции

- **Моментом инерции системы (тела)** относительно данной оси Oz называется физическая величина, равная сумме произведений масс всех точек системы на квадраты их расстояния до рассматриваемой оси:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

- В случае непрерывного распределения масс эта сумма сводится к интегралу:

$$J = \int r^2 dm,$$



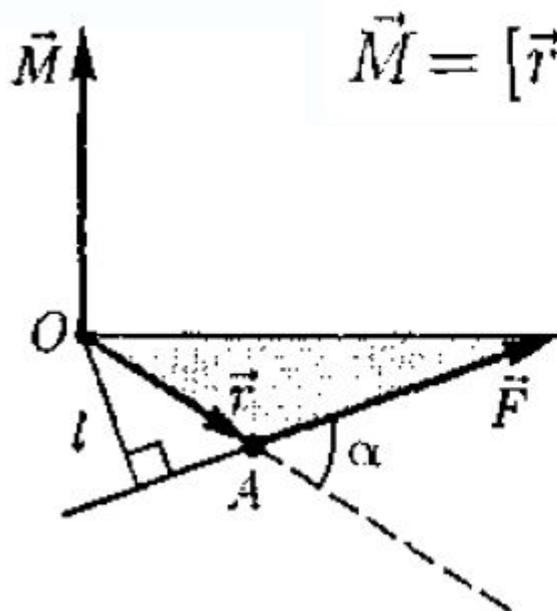
Момент инерции

▣ **Теорема Штейнера:** момент инерции тела J относительно произвольной оси равен моменту его инерции J_C относительно параллельной оси, проходящей через центр масс C тела, сложенному с произведением массы m тела на квадрат расстояния a между осями:

$$J = J_C + ma^2.$$

Момент силы. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела

□ **Моментом силы** относительно неподвижной точки O называется физическая величина M , определяемая векторным произведением радиус-вектора \vec{r} , проведенного из точки O в точку A приложения силы, на силу F

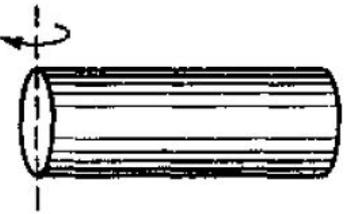
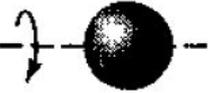


$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{F}],$$

Модуль момента силы

$$M = Fr \sin \alpha = Fl,$$

Момент инерции разных тел относительно различных осей вращения

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр радиусом R	Ось симметрии 	$J = mR^2$
Сплошной цилиндр или диск радиусом R	Ось симметрии 	$J = \frac{1}{2}mR^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину 	$J = \frac{1}{12}ml^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец 	$J = \frac{1}{3}ml^2$
Шар радиусом R	Ось проходит через центр шара 	$J = \frac{2}{5}mR^2$

Сравнение величин и уравнений поступательного и вращательного движения

Поступательное движение		Вращательное движение	
Масса	m	Момент инерции	J
Скорость	$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$	Угловая скорость	$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$
Ускорение	$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$	Угловое ускорение	$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$
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	$M_z = J_z\varepsilon;$ $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$
Работа	$dA = F_s ds$	Работа	$dA = M_z d\varphi$
Кинетическая энергия	$\frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия	$\frac{J_z\omega^2}{2}$