

# Лекция 2. Динамика.

К.ф.-м. наук, доцент, доцент  
департамента общей и  
экспериментальной физики  
ДВФУ  
Дьяченко О.И.



## План лекции:

1. Первый закон Ньютона;
2. Принцип относительности Галилея;
3. Второй закон Ньютона;
4. Третий закон Ньютона;
5. Фундаментальные физические взаимодействия. Гравитационное взаимодействие;
6. Электромагнитное взаимодействие;
7. Сильное и слабое взаимодействия.

# 1. Первый закон Ньютона.

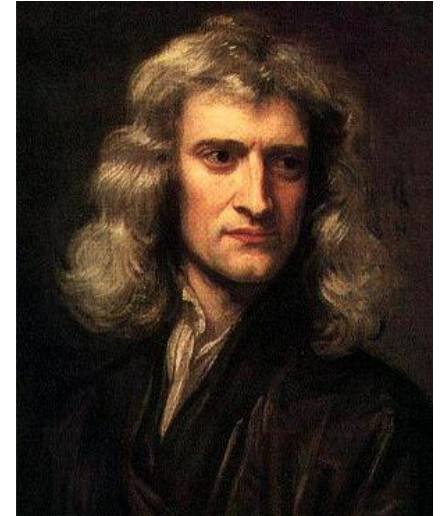
Раздел механики «Динамика» занимается изучением причин движения.

В основе ньютоновской механики лежат три закона динамики, сформулированные Ньютоном в 1686-1687 гг.

**Первый закон Ньютона:** всякое тело находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние.

Система (группа систем) в которой выполняется первый закон Ньютона – **инерциальная система отсчета.**

Установить, инерциальна система или нет может только опыт. Но ни один опыт не может со 100% гарантией подтвердить это. Система отсчета, связанная с Землей, строго говоря инерциальной не является из-за вращения Земли как вокруг собственной оси, так и вокруг Солнца. Можно считать инерциальной гелиоцентрическую систему отсчета (начало совмещено с центром Солнца (гелиос), а оси направлены на неподвижные звезды). Любая система отсчета, которая движется относительно инерциальной равномерно и прямолинейно тоже является инерциальной.

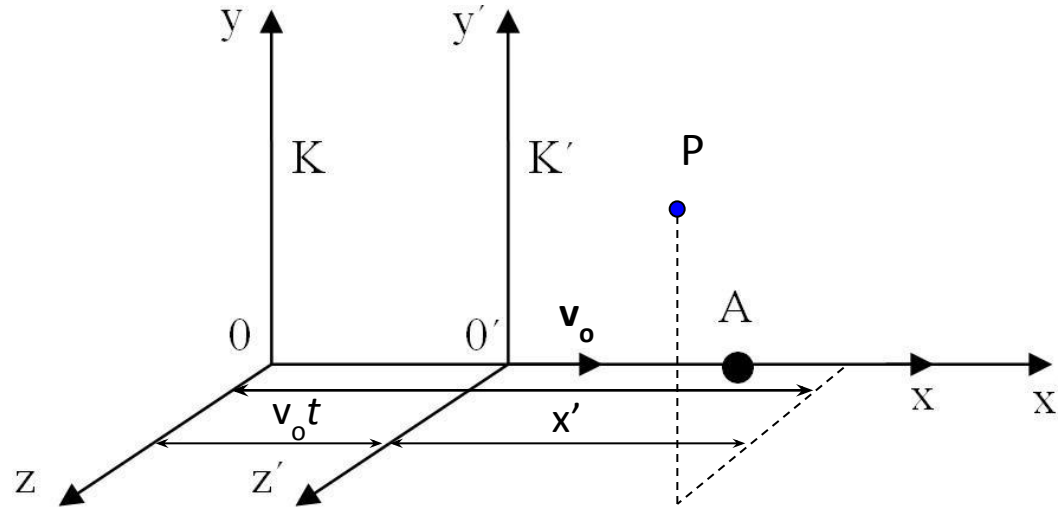


**Сэр Исаак Нью́тон**  
([1642](#) - [1727](#))

английский физик, математи  
и астроном, один из  
создателей классической  
физики

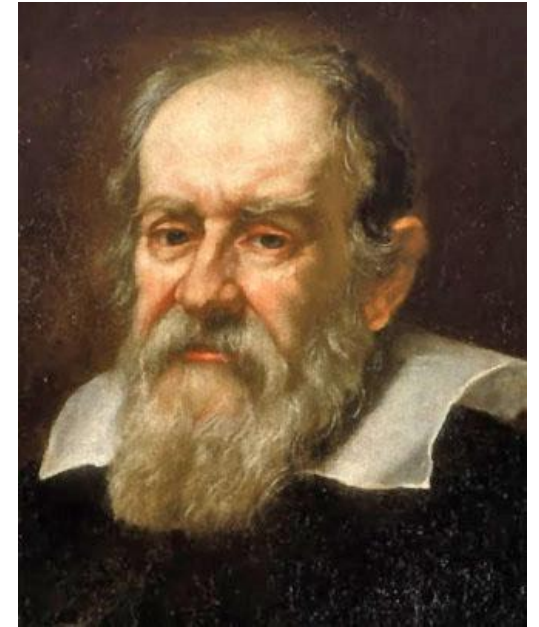
## 2. Принцип относительности Галилея.

Рассмотрим две системы отсчета, движущиеся относительно друг друга с постоянной скоростью  $v_0$ . Найдем связь между координатами точки P в системе K и координатами той же точки в системе K'.



$$x = x' + v_0 t', y = y', z = z', t = t'$$

Совокупность этих четырех уравнений называется преобразованиями Галилея



Галиле́о Галиле́й (1564 — 1642) — итальянский физик, механик, астроном

## 2. Принцип относительности Галилея.

Продифференцировав полученные соотношения получим:

$$v_x = v'_x + v_0, v_y = v'_y, v_z = v'_z$$
$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0$$

**Закон сложения скоростей:** скорость тела относительно неподвижной системы отсчёта есть скорость тела относительно движущейся системы отсчёта плюс скорость движущейся системы относительно неподвижной

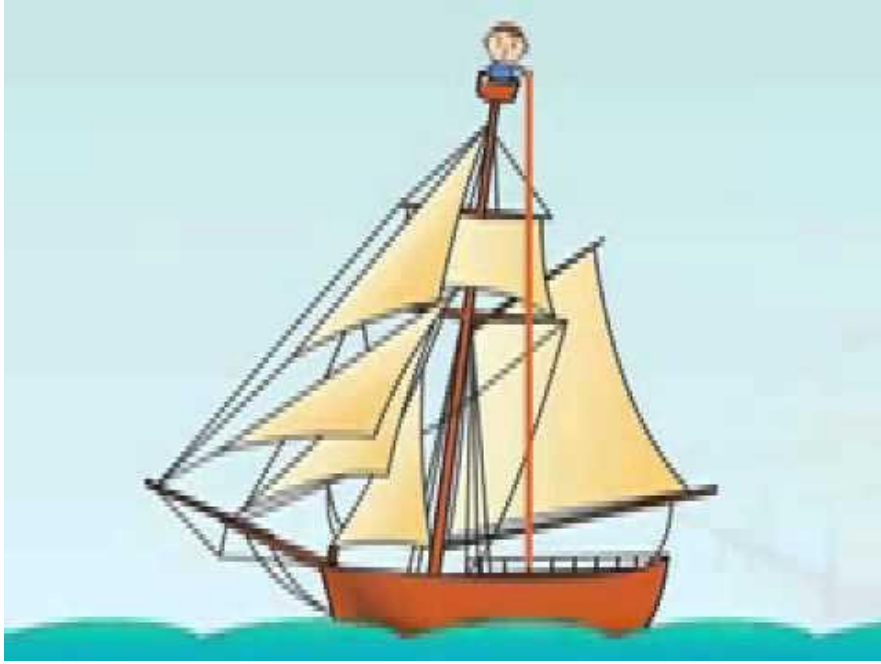
$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_0$$

Важным свойством инерциальных систем является их **инвариантность** по отношению к преобразованию координат при переходе из одной инерциальной системы к другой. Иначе говоря, ***уравнения динамики не изменяются при переходе от одной инерциальной системы к другой.***

Для выполнения принципа относительности Галилея пространство должно обладать симметрией. Под этим понимают однородность пространства (равноправие всех точек), изотропность пространства (равноправие всех направлений) и однородность времени (равноправие всех моментов).

Положение о том, что все механические явления в различных инерциальных системах отсчета протекают одинаковым образом, вследствие чего никакими механическими опытами невозможно установить, покоится данная система отсчета или движется прямолинейно и равномерно носит название **принципа относительности Галилея**

## 2. Принцип относительности Галилея.



Если с мачты сбросить камень, то он упадет в одно и то же место как неподвижного корабля, так и движущегося равномерно.

Экспериментальная проверка 1642 г., Марсель, физиком Пьером Гассендом

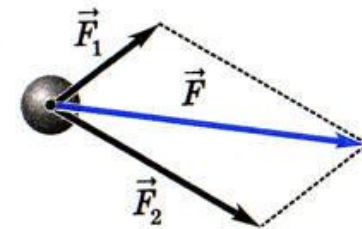
Уединитесь в просторное помещение под палубой корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными летающими насекомыми; пусть будет у вас там также сосуд с водой и плавающими в нем рыбками; подвесьте далее наверху ведро, из которого вода будет капать в другой сосуд с узким горлышком, поставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте *прилежно* как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы будут плавать во всех направлениях; все падающие капли попадут в поставленный сосуд, и вам, бросая другу какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую... Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно...»

### 3. Второй закон Ньютона.

**Сила** ( $F$ ) – векторная физическая величина являющаяся мерой воздействия (способности изменять положение, скорость, форму и т.д.) на данное тело со стороны других тел.

Измеряется в ньютонах [ $H$ ].

Подчиняется **принципу суперпозиции**: результат воздействия на частицу нескольких внешних сил есть векторная сумма воздействия этих сил.



**Масса** ( $m$ ) – мера **инертности** тела (, а так же определяет гравитационные свойства).

В Международной системе единиц СИ (у нас введена с 1982 года), единица измерения массы – 1 кг. Масса земли  $M_3 \sim 6 \cdot 10^{27}$  кг.  $M_c \sim 2 \cdot 10^{33}$  кг. **Килограмм** – это масса цилиндра платино-иридиевого эталона (на который могут прилипнуть или отделяться молекулы) , хранящегося в Международном бюро мер и весов в Севре (близ Парижа). Материал выбран с идеей минимального взаимодействия эталона с окружающей средой (инертности, отсутствие окисления, сорбции и тд)

**Инертность** – способность тела оставаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения в отсутствие внешних воздействий, а также препятствовать изменению своей скорости при наличии внешних сил.

**Импульс** – векторная физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость :  $\vec{p} = m\vec{v}$

**Второй закон Ньютона**: в инерциальной системе отсчета ускорение всякого тела прямо пропорционально результирующей силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе тела.

$$\vec{a} = \frac{1}{m} \sum \vec{F} \quad m\vec{a} = \sum \vec{F} \quad m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F} \quad \rightarrow \quad m \frac{d}{dt} \frac{d\vec{r}}{dt} = m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = m\ddot{\vec{r}} = \sum \vec{F}$$

### 3. Второй закон Ньютона.

Поскольку ускорение определяет быстроту изменения скорости материальной точки и, если её масса не изменяется при движении, то второй закон Ньютона может быть сформулирован так:

«Быстрота изменения импульса материальной точки определяется силой, действующей на неё».

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

Формулировка второго закона Ньютона в таком виде является более точной, так как описывает движение не только материальных точек с постоянной массой, но и твёрдых тел, а также тел с переменной массой (реактивное движение). Именно в такой форме второй закон динамики был сформулирован И.Ньютоном в «Математических началах натурфилософии» в 1687 году.

Если на материальную точку действует несколько сил, то быстрота изменения её импульса определяется результирующей всех действующих на неё сил:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum \vec{F}$$

Если ввести величину, равную произведению силы на время её действия, называемую импульсом силы, то второй закон Ньютона может быть представлен в такой форме – изменение импульса материальной точки равно импульсу силы, действующей на неё:

$$d\vec{p} = \vec{F} dt$$



## 4. Третий закон Ньютона.

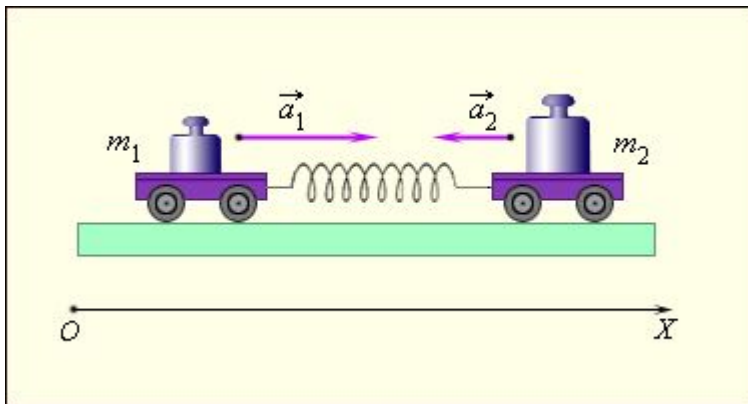
**Третий закон Ньютона** : «Силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по модулю и противоположны по направлению»

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

Всякое действие тел друг на друга носит характер взаимодействия: если тело 1 действует на тело 2 с силой  $\vec{F}_{12}$ , то и тело 2 в свою очередь действует на тело 1 с силой  $\vec{F}_{21}$ .

Третий закон Ньютона называют законом действия и противодействия.

«Если кто нажимает пальцем на камень, то и палец его тоже нажимается камнем. Если лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и обратно она с равным усилием оттягивается к камню..» И. Ньютон.



Третий закон Ньютона справедлив во всех (даже в неинерциальных) системах отсчета.

## 5. Фундаментальные физические взаимодействия. Гравитационное взаимодействие

В природе существуют четыре фундаментальные силы и все физические явления обусловлены всего **четырьмя видами взаимодействий**:

сильное

электромагнитное

слабое

гравитационное

**1. Гравитационное взаимодействие:** Работает в том числе и для космических тел. Радиус действия не ограничен. Очень слабое и составляет примерно  $10^{-40}$  от сильного. Нет преград и не возможна экранировка.

**Закона всемирного тяготения:** две материальные точки притягивают друг друга с силой, пропорциональной массам этих точек и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

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

где коэффициент пропорциональности  $G = 6,66 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$  ( $\text{м}^3\text{кг}^{-1}\text{с}^{-2}$ ) называется

## 5. Фундаментальные физические взаимодействия. Гравитационное взаимодействие

Сила гравитации, проявляется на Земле в виде силы тяжести – силы, с которой все тела

притягиваются к Земле:

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

$$g = G \frac{M}{r^2}$$

- $g$  – уменьшается на 0.2% от полюсов к экватору так как Земля сплюснута (от полюсов до центра на 21 км меньше чем от экватора).
- На Луне в 6 раз меньше
- На высоте 350 километров (высота нахождения станции) ускорение свободного падения имеет значение 8,8 м/с<sup>2</sup>, что всего лишь на 10 % меньше, чем на поверхности Земли
- Растениям достаточно 10% от величины  $g$ , чтобы знать направление роста.

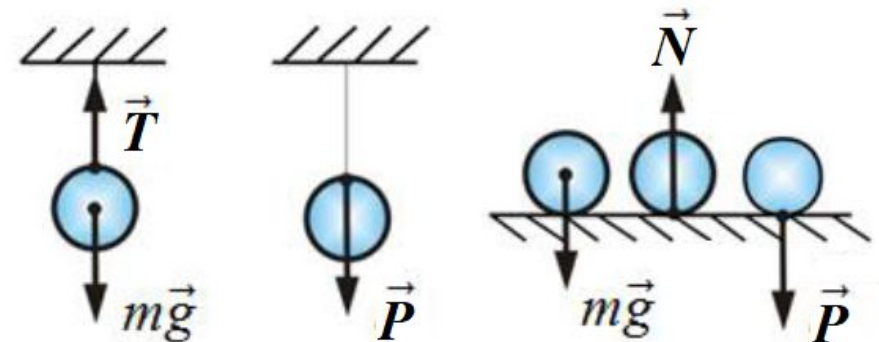
Если подвесить тело или положить его на опору, то сила тяжести уравнивается силой, которую называют реакцией опоры  $\vec{N}$ , или подвеса  $\vec{T}$ .

Вес тела  $\vec{P}$  – это сила, с которой тело действует на подвес или опору вследствие гравитационного притяжения к Земле

Если подвес (опора) и тело покоятся относительно Земли (или движутся равномерно, прямолинейно), то *вес и сила тяжести равны друг другу*:  $P = mg$

Если имеет место движение с ускорением, то  $P = mg \pm ma$

Вес тела может быть больше или меньше силы тяжести: если  $g$  и  $a$  направлены в одну сторону (тело движется вниз или падает), то  $P < mg$ , и если наоборот, то  $P > mg$ . Если же тело движется с ускорением  $a = g$ , то  $P = 0$  – т. е. наступает *состояние невесомости*.



## 6. Электромагнитное взаимодействие

**2. Электромагнитное взаимодействие:** Радиус действия **неограничен**, или, как говорят, радиус действия стремится к бесконечности:  $r \rightarrow \infty$ . К этому взаимодействию относятся **силы трения, упругости и наших мышц**. Взаимодействия передаваемые посредством поля со скоростью  $c$ . Переносчиком является фотон.

### Сила упругости

Под действием внешних сил возникают **деформации**, т. е. смещение частиц тела из равновесных положений. Если после прекращения действия внешних сил восстанавливаются прежние форма и размеры тела, то деформация называется **упругой**. Деформация имеет упругий характер в случае, если внешняя сила не превосходит определенного значения, называемого **пределом упругости**. При превышении этого предела деформация становится **пластичной**, или **неупругой**, т. е. первоначальные размеры и форма тела полностью не восстанавливаются.

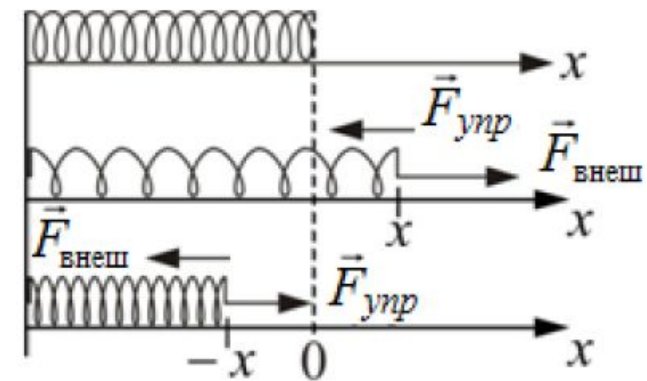
**Сила упругости** – это сила, возникающая при упругой деформации тела.

**Закон Гука для пружины:** сила упругости прямо пропорциональна смещению тела и противоположна ему по знаку:

$$F_{\text{упр}} = -kx$$

**Потенциальная энергия** упругой пружины равна работе, совершенной над пружиной. **Полная работа**, которая совершена пружиной, равна:

$$A = \int_0^x F dx = \int_0^x -kx dx = -\frac{kx^2}{2}$$



## 6. Электромагнитное взаимодействие

**Обобщенный закон Гука (закон Гука для стержня):** относительное приращение длины стержня прямо пропорционально напряжению и обратно пропорционально модулю Юнга.

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma$$

**Нормальное напряжение  $\sigma$**  – величина, равная отношению силы к площади поверхности, на которую она действует. Единица измерения – [Па]

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$$

**Относительное приращение длины стержня  $\varepsilon$**  (относительное продольное растяжение/сжатие) – отношение абсолютного удлинения к начальной длине образца

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

**Модуль Юнга  $E$**  – величина, характеризующая упругие свойства материала стержня. Единица измерения – [Па]. Физический смысл модуля Юнга: он равен такому нормальному напряжению, при котором относительное удлинение было бы равно единице.

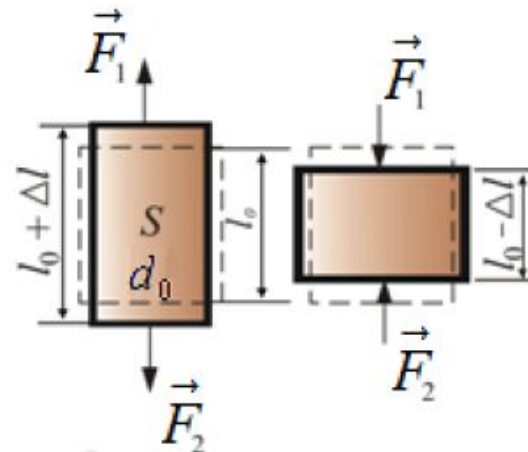
**Обобщенный закон Гука:**  $F_{\text{упр}} = S\sigma = S\varepsilon E = S \frac{\Delta l}{l_0} E = S \frac{E}{l_0} \Delta l = k\Delta l$

Отношение относительного поперечного растяжения стержня  $\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d_0}$  к относительному продольному растяжению  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  называют **коэффициентом Пуассона**:  $\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$

**Потенциальная энергия упруго растянутого (сжатого) стержня:**  $E_{\text{п}} = \int_0^{\Delta l} F dx = \frac{1}{2} S \frac{E}{l_0} (\Delta l)^2 = \frac{1}{2} E \varepsilon V$ , где

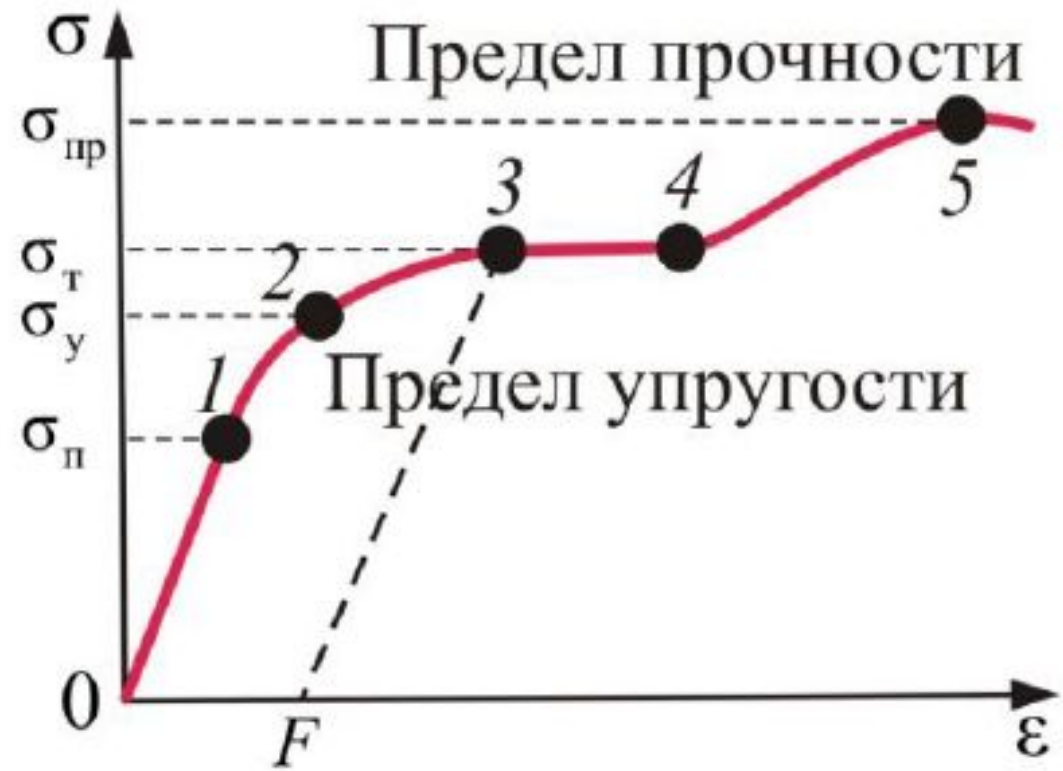
$V$  – объем стержня. **Объемная плотность потенциальной энергии тела** при растяжении определяется

удельной работой по преодолению упругих сил  $A_{\text{упр}}$ , рассчитанной на единицу объема тела:  $w_{\sigma} = A_{\text{упр}} = \frac{\sigma^2}{2E}$



# 6. Электромагнитное взаимодействие

## Диаграмма деформации



## 6. Электромагнитное взаимодействие

**Силой трения** называют силу, которая возникает при движении одного тела по поверхности другого. Она всегда направлена противоположно направлению движения. Сила трения прямо пропорциональна силе нормального давления на трущиеся поверхности и зависит от свойств этих поверхностей. *Законы трения связаны с электромагнитным взаимодействием, которое существует между телами.*

Различают трение *внешнее и внутреннее.*

**Внешнее трение** возникает при относительном перемещении двух соприкасающихся твердых тел (трение скольжения или трение покоя).

**Внутреннее трение** наблюдается при относительном перемещении частей одного и того же сплошного тела (например, жидкость или газ).

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

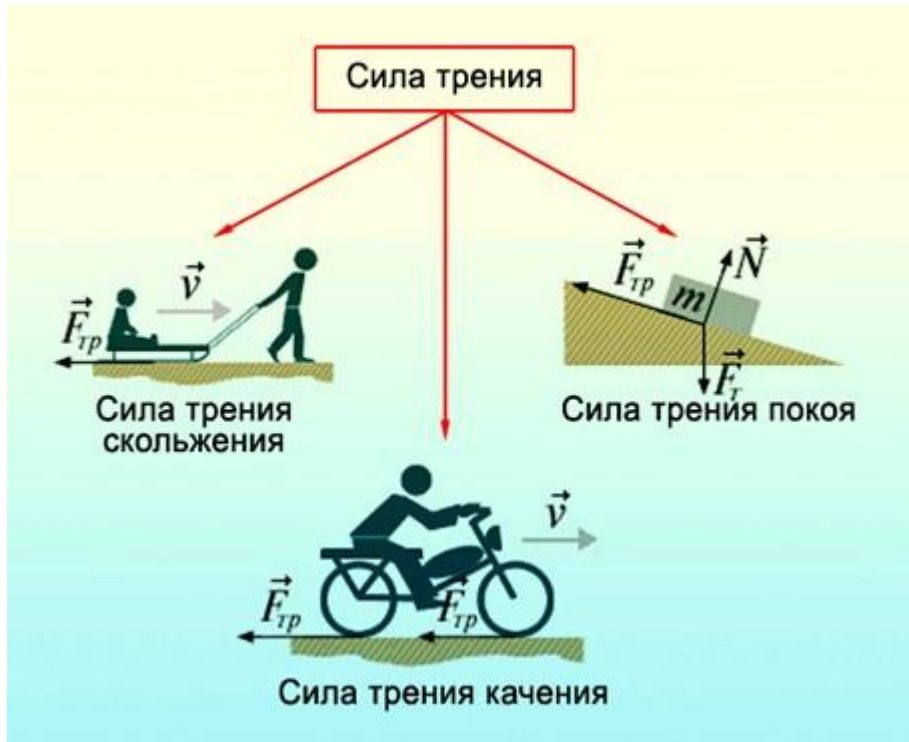
**Сухое трение** возникает между поверхностями твердых тел в отсутствие смазки.

**Жидким (вязким)** называется трение между твердым телом и жидкой или газообразной средой или ее слоями.

Сухое трение, в свою очередь, подразделяется на **трение скольжения** и **трение качения**.

## 6. Электромагнитное взаимодействие

### Виды сухого трения



**Сила трения покоя** – это сила, возникающая между двумя контактирующими телами и препятствующая возникновению относительного движения. Эту силу необходимо преодолеть для того, чтобы привести два контактирующих тела в движение друг относительно друга. Она действует в направлении, противоположном направлению возможного относительного движения.

$$F_{тр.п.} = \mu_0 N$$

**Сила трения скольжения** – это сила, возникающая при движении одного тела по поверхности другого и направленная против движения.

$$F_{тр.с.} = \mu N$$

**Сила трения качения** – это сила, возникающая между шарообразным телом и поверхностью, по которой оно катится.

$$F_{тр.к.} = \frac{\mu N}{R}$$



## 6. Слабое и сильное взаимодействия

**Слабое взаимодействие:** Такое же короткодействующее, как и сильное, но составляет от него примерно  $10^{-15}$  и, например, отвечает за все виды  $\beta$ -распада ядер (спонтанный процесс превращения нейтрона в протон, электрон и антинейтрино). Если его выключить погаснет Солнце (4 протона превращаются в  ${}^4\text{He}$ ). Гораздо сильнее гравитационного. Отвечает за распад радиоактивных элементов. Его переносчиком (в квантовой физике у каждого взаимодействия есть переносчик) являются так называемые Z и W бозоны.

**Сильное взаимодействие:** Это действительно самое сильное из четырех видов взаимодействия, но радиус его действия очень мал и ограничивается размерами атомного ядра:  $r \sim 10^{-15}$  м. Сильное взаимодействие просто обеспечивает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов. Это взаимодействие переносится глюонами.



## **Дополнительный материал**

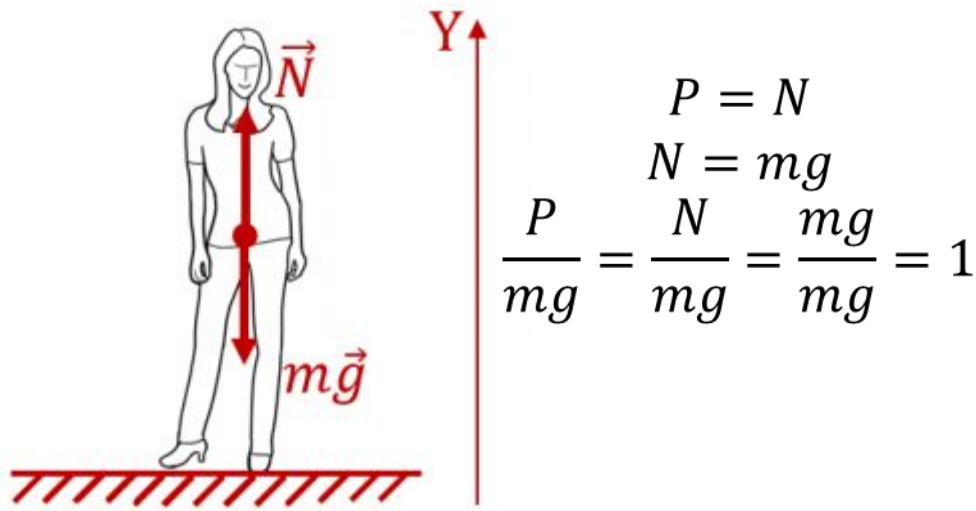
## 6. Перегрузки

**Перегрузкой** называется отношение веса тела к величине силы тяжести, действующей на это тело у поверхности земли:

$$\frac{P}{mg}$$

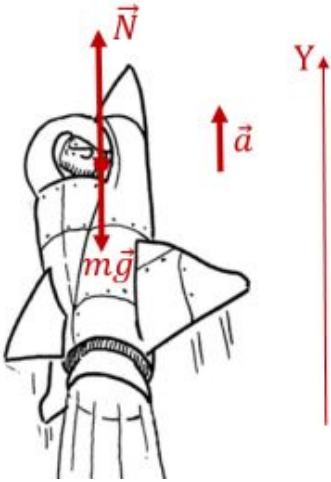
Величина безразмерная!

**Пример 1.** Чему равна перегрузка человека, стоящего на земле? Чему равна перегрузка человека, свободно падающего с некоторой высоты?



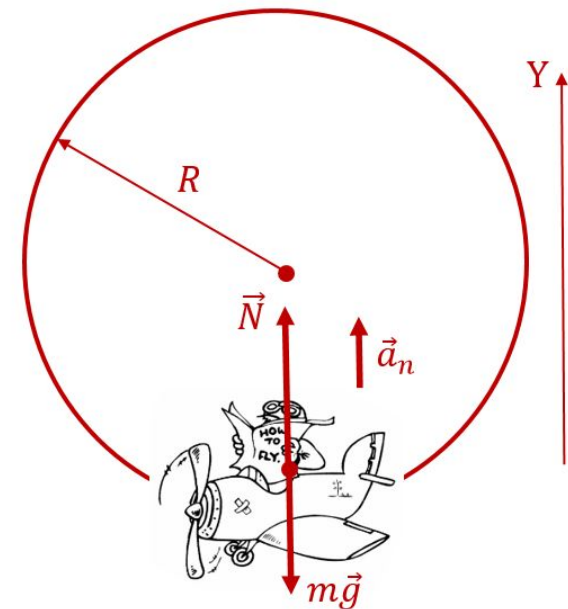
## 6. Перегрузки

**Пример 2.** Определите перегрузку космонавтов, находящихся в ракете, движущейся на небольшой высоте вверх с ускорением  $40 \text{ м/с}^2$ .



$$\begin{aligned}P &= N \\N - mg &= ma \\N &= mg + ma \\ \frac{P}{mg} &= \frac{N}{mg} = \frac{mg + ma}{mg} = \frac{m(g + a)}{mg} = \frac{g + a}{g} = 5\end{aligned}$$

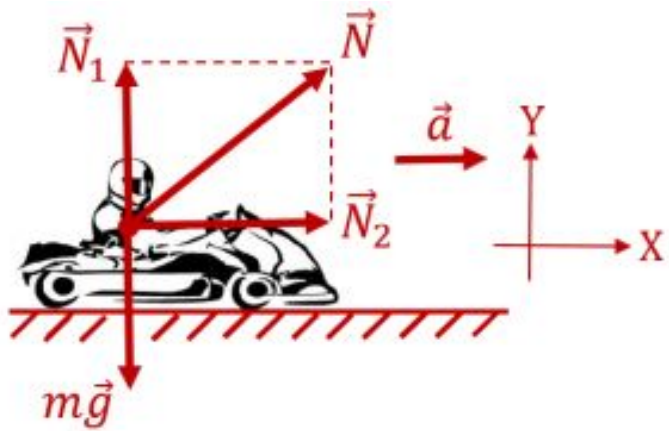
**Пример 3.** Рассчитайте перегрузку, которую испытывает пилот самолёта, выполняющего «мёртвую петлю» в нижней точке траектории. Скорость самолёта в этой точке составляет  $360 \text{ км/ч}$ . Радиус «мёртвой петли» составляет  $200 \text{ м}$ .



$$\begin{aligned}P &= N \\N - mg &= ma_n = m \frac{v^2}{R} \\N &= m \left( g + \frac{v^2}{R} \right) \\ \frac{P}{mg} &= \frac{N}{mg} = \frac{m \left( g + \frac{v^2}{R} \right)}{mg} = \frac{g + \frac{v^2}{R}}{g} = 6\end{aligned}$$

## 6. Перегрузки

**Пример 4.** Рассчитайте перегрузку, которую испытывает водитель автомобиля, разгоняющегося с места до скорости 180 км/ч за 10 с.



$$P = N$$
$$N = \sqrt{N_1^2 + N_2^2} = \sqrt{(mg)^2 + (ma)^2}$$
$$\frac{P}{mg} = \frac{N}{mg} = \frac{\sqrt{(mg)^2 + (ma)^2}}{mg} = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{g}\right)^2} = 1.1$$