

Динамика

Раздел механики, в котором изучаются законы движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение

- **Законы движения (законы Ньютона)**
- **Силы в природе**
- **Неинерциальные системы отсчета**
- **Динамика вращательного движения**
- **Энергия. Работа. Мощность**
- **Законы сохранения**

От динамики Аристотеля к динамике Ньютона



**Аристотель,
384-322 г. до н.э.**

Аристотель:

- каждому телу свойственно определенное место: легкие тела наверху, тяжелые – внизу
- тела стремятся к своим местам, такое движение является естественным
- другие движения являются насильственными и требуют указания причины, почему они происходят
- причина, по которой шар катится по столу – **сила**, которая передается шару из окружающей среды



**Николай Кузанский
1401-1464**

Николай Кузанский: сила передается шару в момент толчка, а дальше находится в нем и обеспечивает существование его скорости

Галилей

- показал, что нуждается в объяснении не сохранение скорости, а ее изменение, и **связал понятие силы** не со скоростью, а с **ускорением**
- **сохранение** же телом имеющейся у него скорости происходит по закону инерции

Динамика как раздел механики

При движении тела его **скорость** может изменяться по модулю и направлению

$$\forall v \neq const$$



движение с ускорением

$$\forall a \neq 0$$

В чем причины ускорения



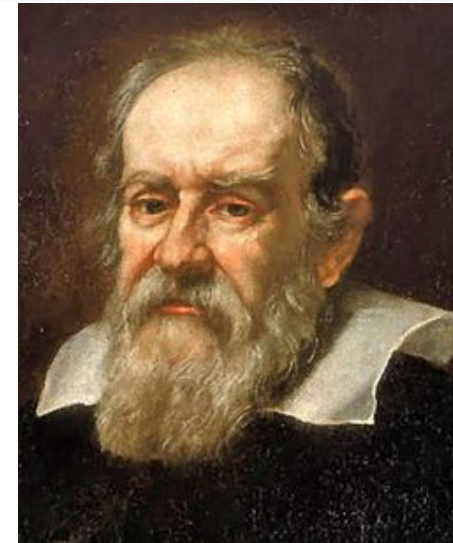
Взаимодействие тел

взаимное влияние тел на движение каждого из них

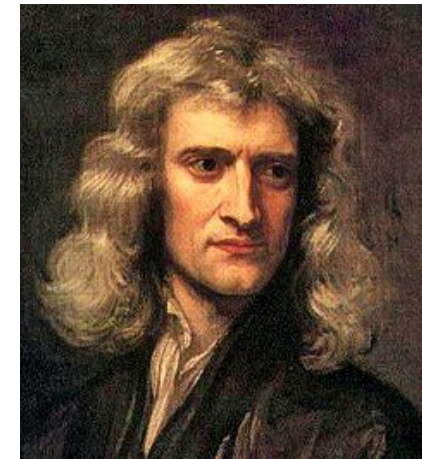
Законы Ньютона (1687 г.)

- **обобщение опытных фактов**
- **лежат в основе классической механики**

$$v \ll c$$



Галилео Галилей (1564-1642)

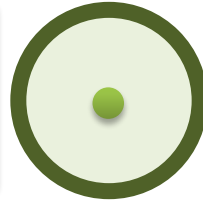


Исаак Ньютон (1643-1727)

I закон Ньютона

Простейшая
механическая
система

Изолированное
тело



НЕ действуют никакие силы

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0 \Rightarrow \vec{v} = const$$

I закон
Ньютона

Закон
инерции

Если на тело не действуют никакие силы
или действие сил скомпенсировано,
то тело движется прямолинейно и равномерно
или сохраняет состояние покоя

движение
и покой
относительны



движение различно
в различных системах
отсчета

$$\begin{aligned} \vec{v} = const & \quad a = 0 \\ \vec{v} \neq const & \quad a \neq 0 \end{aligned}$$

- Г.Галилей (1632 г.) впервые сформулировал закон инерции
- И.Ньютон обобщил выводы Галилея и включил их в число основных законов движения

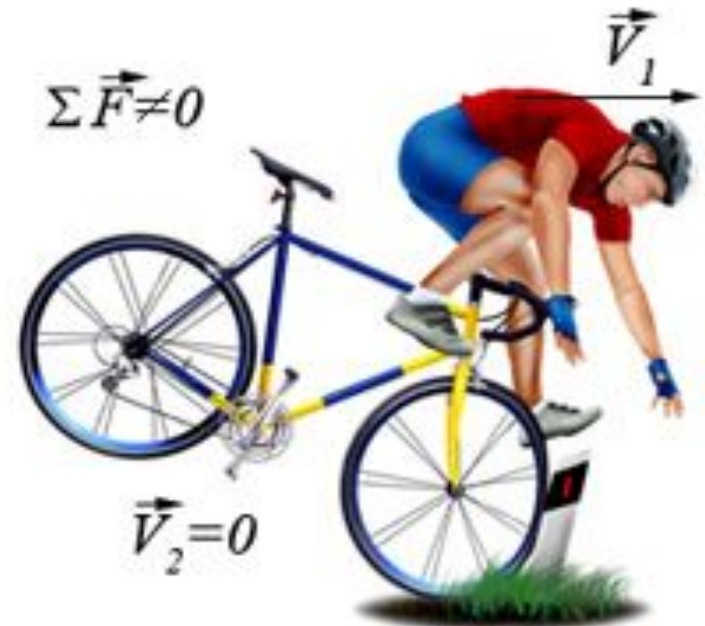
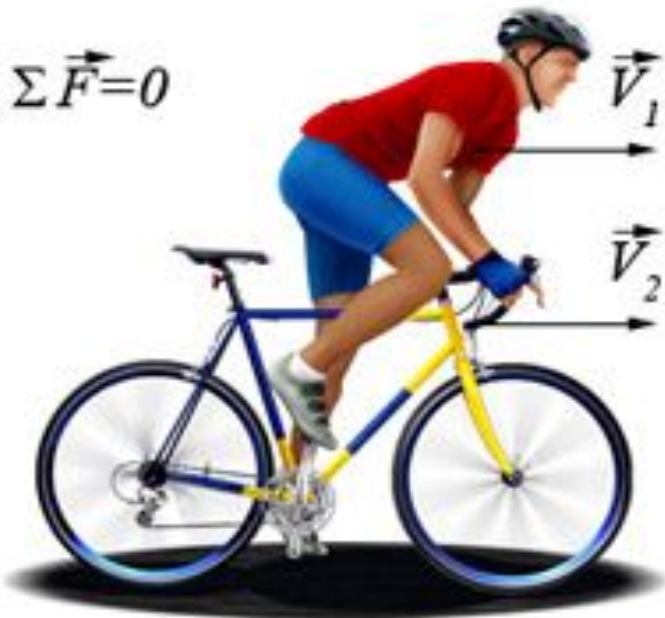
Инерция и инертность

Инерция

ЯВЛЕНИЕ сохранения скорости тела при отсутствии действия на него других тел

Инертность

СВОЙСТВО ТЕЛА оказывать сопротивление изменению его скорости



Масса в классической механике

Инертная
масса
тела

Количественная мера **инертности** тела

Скалярная физическая величина, характеризующая **способность тела приобретать определенное ускорение под действием других тел**

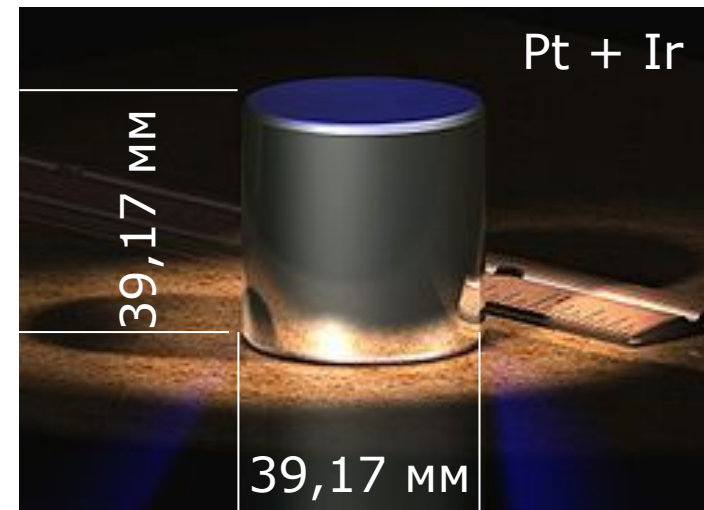
- **определяет количество вещества в теле**
- **не зависит от скорости тела**
- **величина аддитивная**
- **справедлив закон сохранения массы**

$$m_{\text{системы}} = \sum_{i=1}^n m_i$$

[m] = кг

Международный прототип (эталон) килограмма

- **хранится в Международном бюро мер и весов (Севр под Парижем)**
- **представляет собой цилиндр**
d=h=39,17 мм
из платино-иридиевого сплава
(90% платины, 10% иридия)



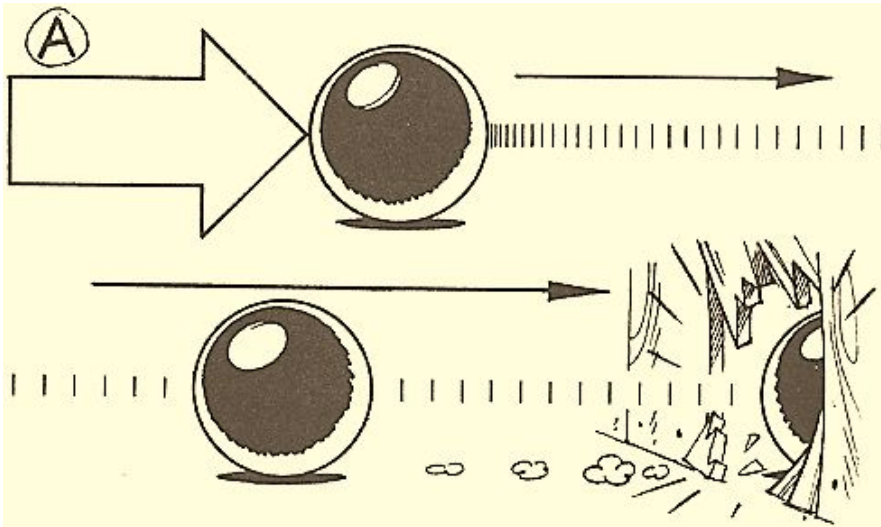
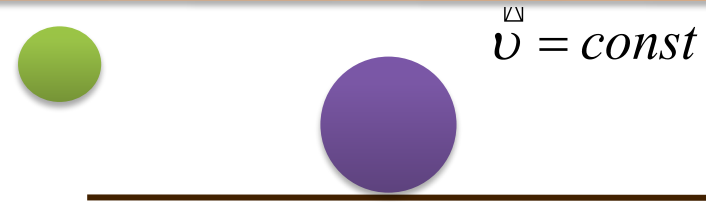
Масса – мера инертности

Взаимодействие тел

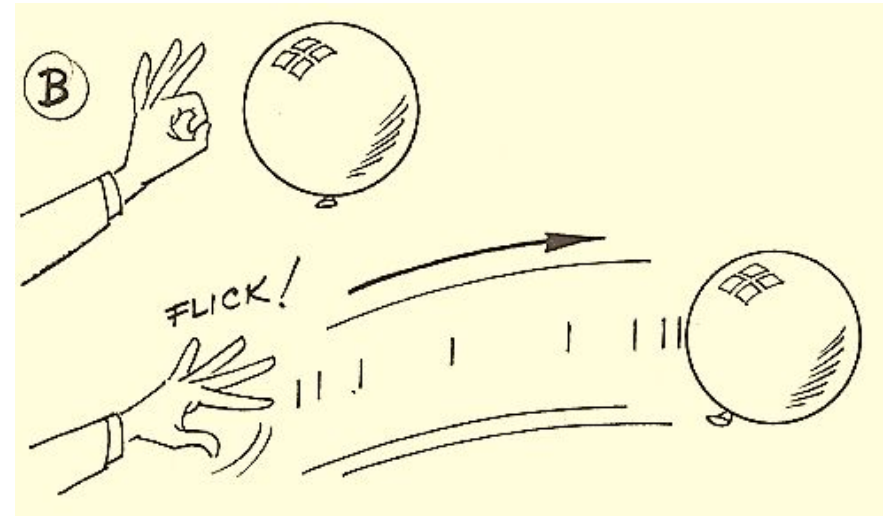
$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i \neq 0$$

причина 

изменения
скорости
движения тел



Пушечное ядро требует большой силы для придания ему движения. Чтобы остановить его, также требуется большая сила



Воздушный шарик приходит в движение от легкого толчка, но сопротивление воздуха быстро останавливает его

Мера физического воздействия

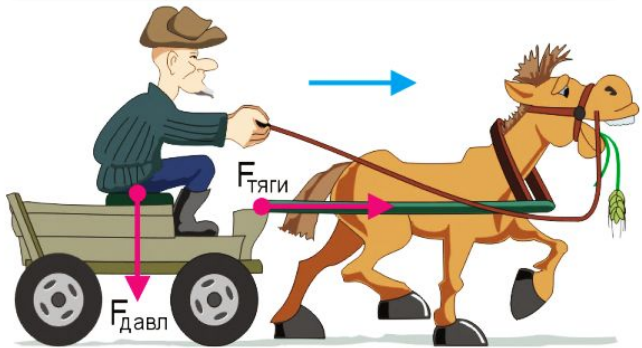
Для количественного описания движения тела под воздействием других тел – **сила** и инертная **масса** тела

Сила

векторная физическая величина, являющаяся **количественной мерой воздействия тел**, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры

Равнодействующая сила

Векторная сумма всех сил, действующих на тело



$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

$$[F] = \text{Н}$$

Принцип суперпозиции
(независимого действия)

Действие каждой силы не зависит от присутствия или отсутствия других сил

Два тела взаимодействуют друг с другом:

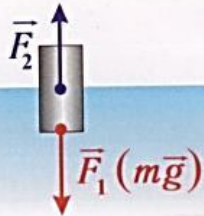
изменяется **скорость** обоих тел

оба тела приобретают **ускорения**

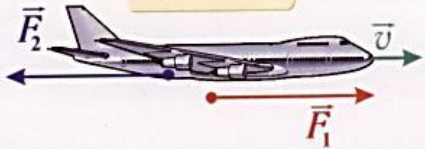
изменяются **форма** и **размеры** тел

Силы могут иметь различную физическую природу

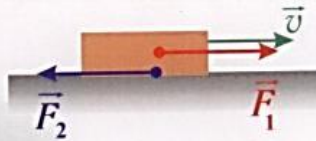
$$F_A = \rho g V$$



$$F = r \cdot v$$

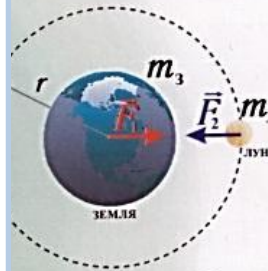
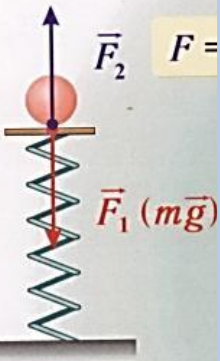


$$F_{тр} = \mu N$$

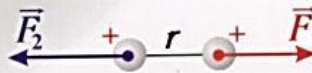


Сила F характеризуется:

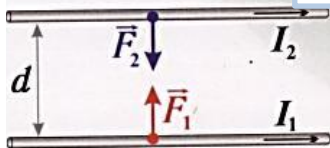
- численным значением
- направлением в пространстве
- точкой приложения



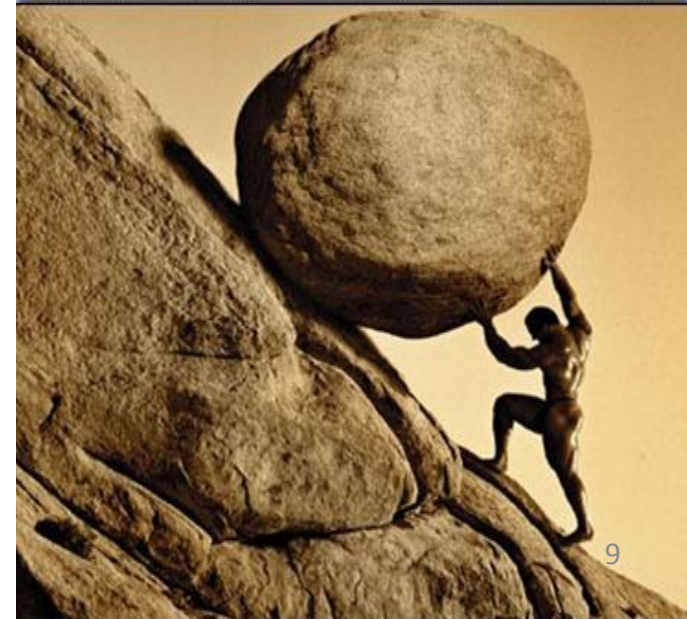
$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



$$F = \frac{I_1 I_2 \mu_0 l}{2\pi d}$$



II закон Ньютона

Если на тела разной массы подействовать **одинаковой силой**, то ускорения, приобретаемые телами, оказываются **обратно пропорциональны массам**

$$F = const \quad \Rightarrow \quad a \sim \frac{1}{m}$$

Если силами разной величины подействовать на одно и то же тело, то ускорения тела оказываются **прямо пропорциональными приложенным силам**

$$m = const \quad \Rightarrow \quad a \sim F$$

обобщение опытных фактов:

Ускорение, приобретаемое телом, **прямо пропорционально** действующей на него **силе** и **обратно пропорционально** массе

$$a = \frac{F}{m}$$

Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой **ускорение**

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

Импульс тела

Количество движения

$$H = \frac{KЭ \cdot M}{c^2}$$

$$p = mv$$

$$F = \frac{dp}{dt}$$

III закон Ньютона

Два тела действуют друг на друга с силами, равными по величине и $\uparrow\downarrow$ по направлению

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

Сила действия равна силе противодействия

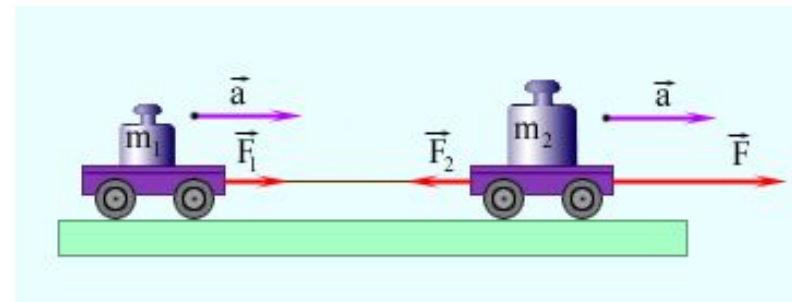
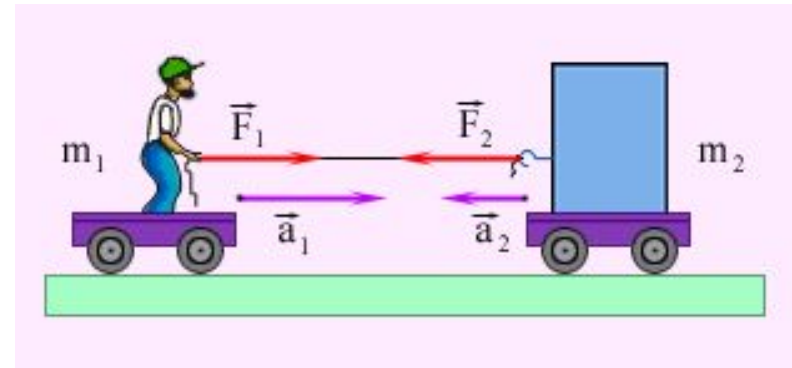
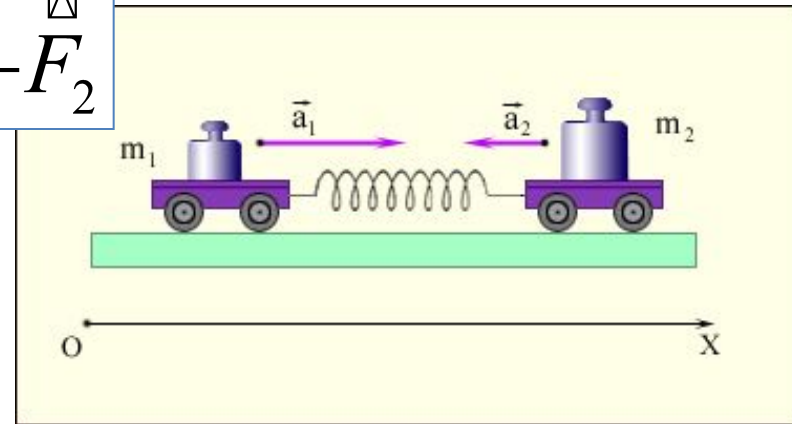
Знак «минус»

ускорения взаимодействующих тел всегда направлены в $\uparrow\downarrow$ стороны

Силы, возникающие при взаимодействии тел

всегда имеют одинаковую природу приложены к разным телам

НЕ могут уравнивать друг друга !



Законы Ньютона

1 закон Ньютона

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0 \Rightarrow \vec{v} = const$$

для инерциальных систем отсчета
(т.е. движущихся без ускорения)

Инерция

ЯВЛЕНИЕ сохранения скорости тела при отсутствии действия на него сил

Инертность

СВОЙСТВО тел – для изменения скорости необходимо определенное воздействие на тело

Масса

мера инертности

$$m \quad [m] = \text{кг}$$

Сила

мера воздействия

$$F \quad [F] = \text{кг м/с}^2 = \text{Н}$$

2 закон Ньютона

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i \neq 0 \Rightarrow \vec{v} \neq const$$

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

Импульс тела
(количество движения)

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

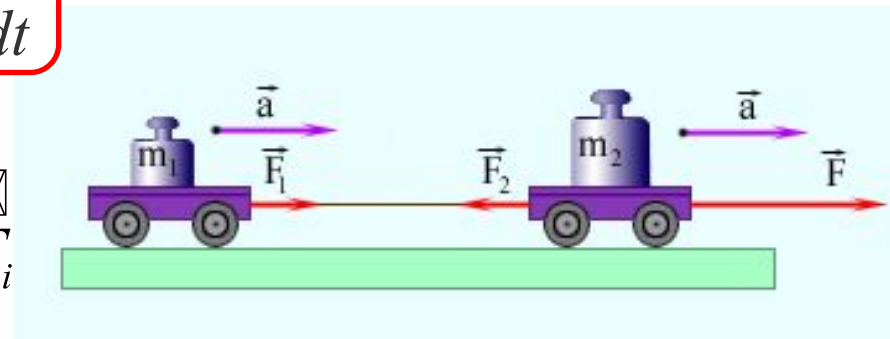
$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

3 закон Ньютона

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

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

резльтирующая сила



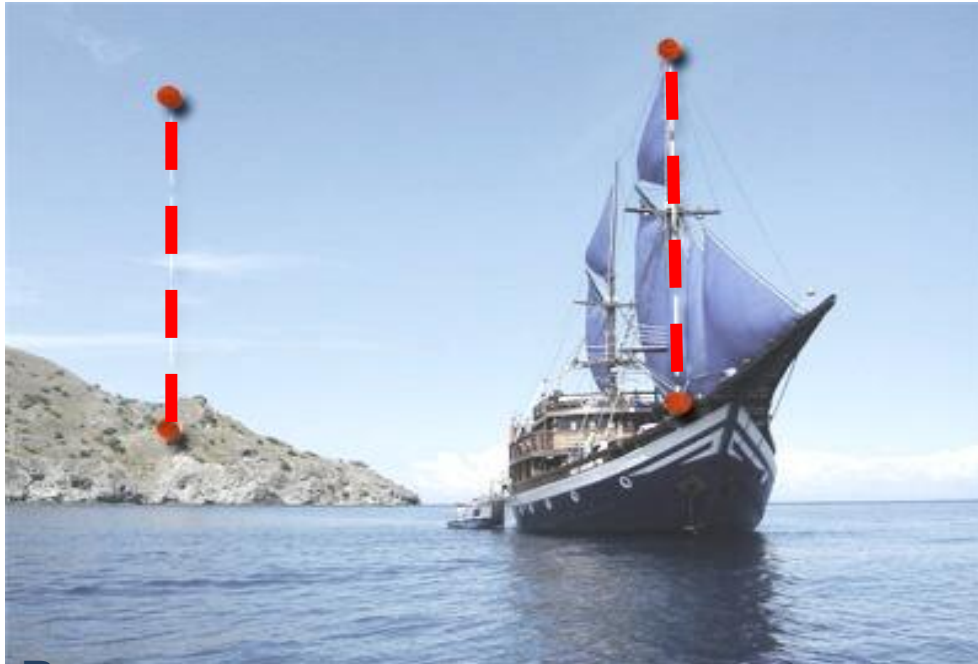
Инерциальные системы отсчета

В механике Ньютона законы взаимодействия тел формулируются для класса ИСО

Инерциальные системы отсчета (ИСО)

системы отсчета, относительно которых **изолированные поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость неизменной по модулю и направлению**

Во всех инерциальных системах отсчета законы классической динамики имеют один и тот же вид



Брошенное тело падает отвесно как в неподвижной системе отсчета, так и в системе, движущейся равномерно и прямолинейно относительно первой

Всякая система отсчета, движущаяся относительно инерциальной равномерно и прямолинейно, также является инерциальной

Система отсчета, связанная с Землей

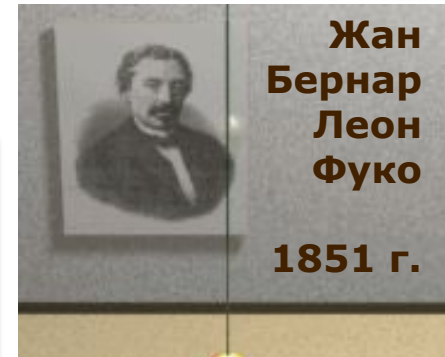
При описании движения тел вблизи поверхности Земли

\approx ИСО

НО при повышении точности экспериментов обнаруживаются отклонения от инерциальности **СО, связанной с Землей**

причина

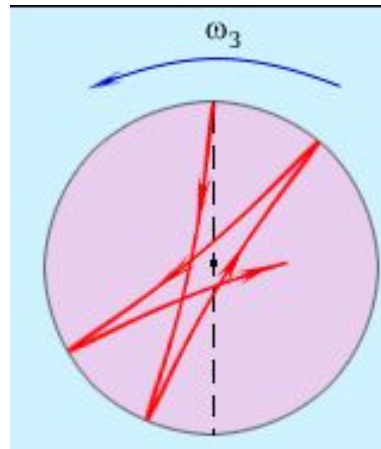
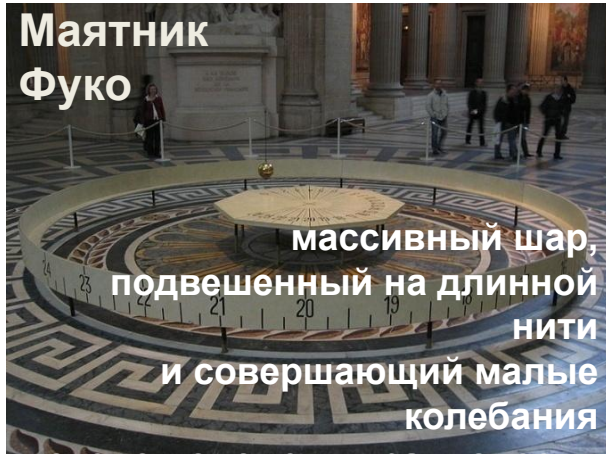
вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца



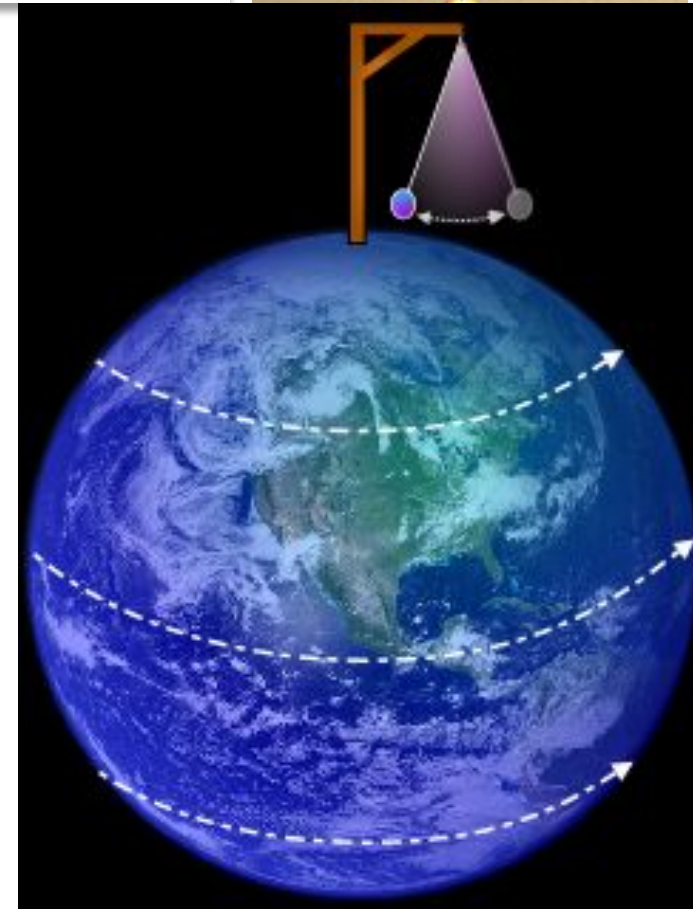
Если бы **система, связанная с Землей**, была **инерциальной**



плоскость качаний маятника Фуко оставалась бы неизменной относительно Земли



При решении многих задач эффекты, обусловленные неинерциальностью, малы, и в этих случаях СО, связанную с Землей можно считать инерциальной



Инерциальные системы отсчета

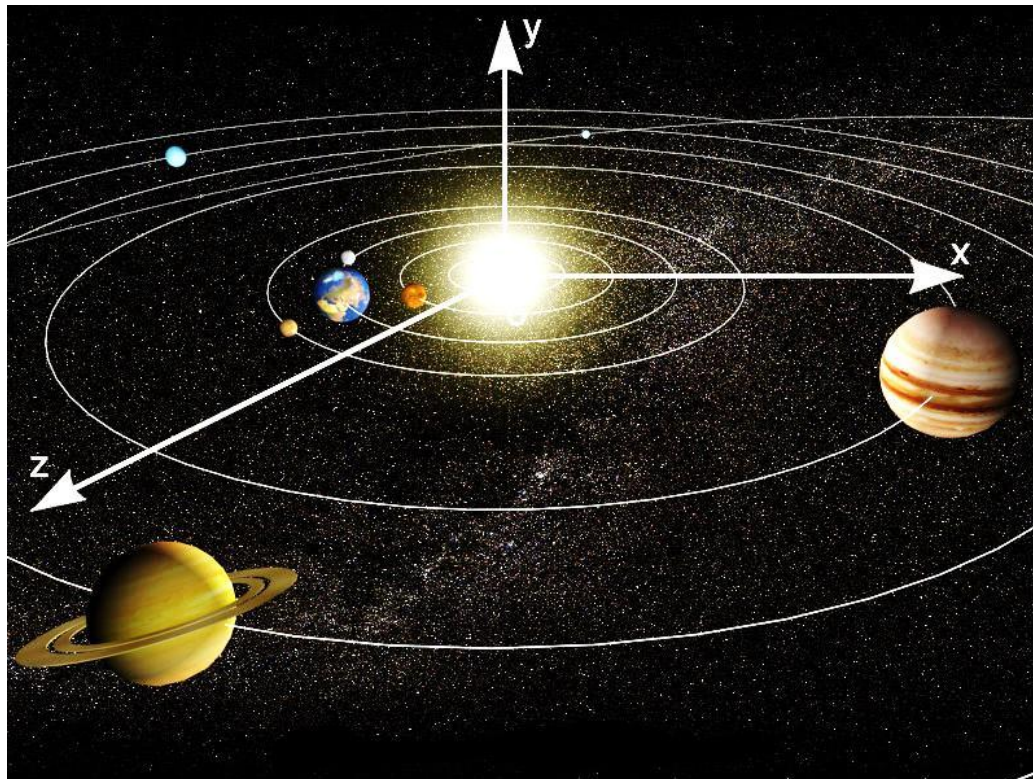
ИСО с высокой степенью точности:

**гелиоцентрическая (звездная)
система отсчета:**

- начало координат – в центре Солнца,
- оси проведены в направлении определенных звезд

**Установлено
опытным путем**

**Использовал Ньютон
при открытии
закона всемирного
тяготения**



**Инерциальных систем
существует ∞ множество**

**Все ИСО образуют класс
систем, движущихся друг
относительно друга
равномерно и
прямолинейно**

**Ускорения какого-либо тела
в разных инерциальных
системах одинаковы**

Уравнение движения МТ

II з-н Ньютона

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

называется (является)
уравнением движения МТ

Если на МТ действует несколько сил,
можно найти их равнодействующую

$$\vec{F}_{\text{равн}} = \sum \vec{F}_i$$

и по ней определить ускорение МТ:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}_i}{m}$$

Дальше задача решается кинематически:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}(0) + \int_0^t \vec{a}(t) dt \quad \vec{r}(t) = \vec{r}(0) + \int_0^t \vec{v}(t) dt$$

При решении конкретных задач уравнения движения записываются в проекциях на оси координат:

$$ma_x = F_x$$

$$ma_y = F_y$$

$$ma_z = F_z$$

Уравнение движения МТ

Уравнение движения материальной точки

$$F = ma$$

позволяет решать две основные задачи динамики МТ

ПРЯМАЯ задача

Найти закон движения точки, если известны ее масса и действующая на нее сила

$$\begin{array}{l} x_0 = ! \\ v_0 = ! \\ a = ! \end{array} \left| \begin{array}{l} \Rightarrow x(t) = ! \\ \Rightarrow v = ! \end{array} \right.$$

Позволяет из начальных условий и известных законов действия сил, предсказать будущее МТ и восстановить прошлое

ОБРАТНАЯ задача

Найти действующую на МТ силу, если известны масса и закон движения $F = m \frac{d^2 r}{dt^2}$

по известному закону движения планеты Уран открытие (1845) планеты Нептун



Урбен Жан Жозеф
Лeverье
(1811-1877)
Франция

Преобразования Галилея

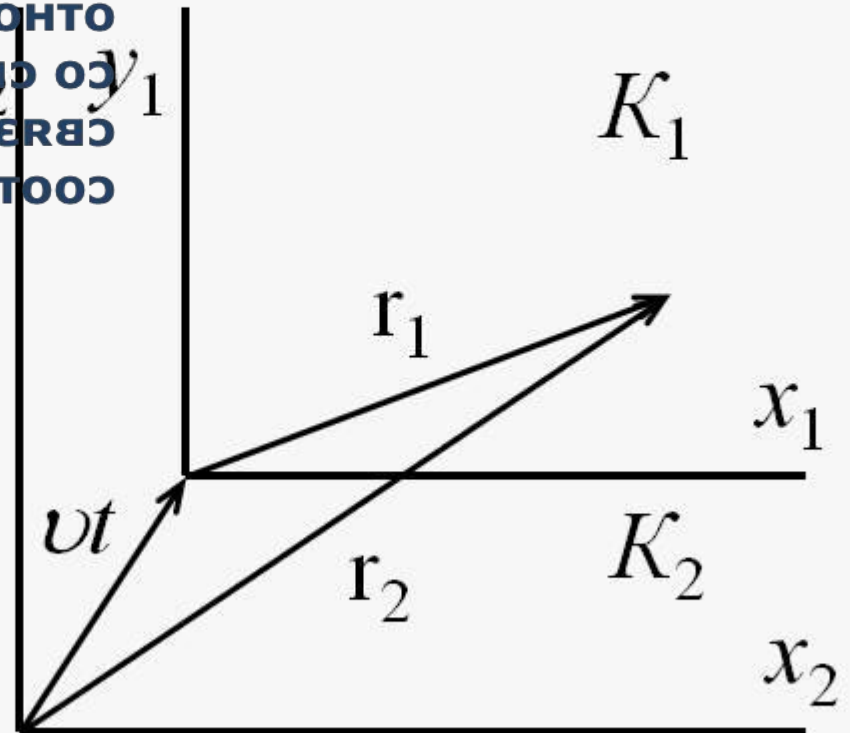
Законы Ньютона справедливы
в инерциальных системах отсчета
при скоростях, много меньших скорости света

$$v \ll c$$

Преобразования Галилея

Координаты точек в одной инерциальной системе отсчета K_1 и в другой K_2 связаны соотношением

$$\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \vec{v}t$$



Принцип относительности Галилея

$$\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \vec{v}t$$

Скорость $\frac{d\vec{r}_2}{dt} = \frac{d\vec{r}_1}{dt} + \vec{v} \Rightarrow \boxed{\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}}$

Ускорение $\frac{d\vec{v}_2}{dt} = \frac{d\vec{v}_1}{dt} + 0 \Rightarrow \boxed{\vec{a}_2 = \vec{a}_1}$

Принцип
относительности
Галилея

**Все механические явления
в различных ИСО
(инерциальных системах отсчета)
подчиняются одним и тем же
физическим законам
(протекают одинаковым образом)**

Принцип относительности справедлив и для всех других явлений: электромагнитных оптических и др.

Движение системы МТ

Масса системы N
материальных точек:

$$m = \sum_{i=1}^N m_i$$

Импульс системы МТ:

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i = \sum_{i=1}^N m_i \vec{v}_i$$

Сумма сил,
действующих на i -ую МТ:

$$\vec{F}_i = \vec{F}_i^{\text{внеш}} + \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij}$$

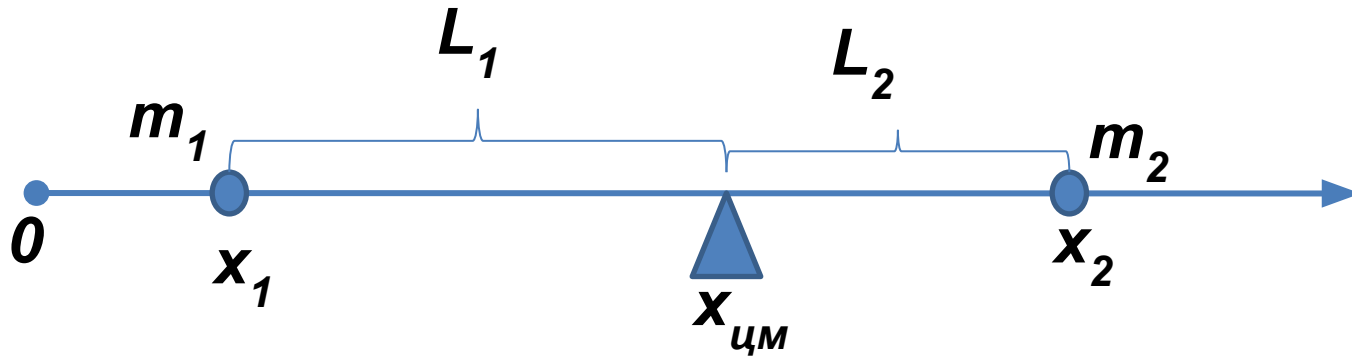
Уравнение движения
системы МТ:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum \vec{F}_i^{\text{внеш}}$$

Силы взаимодействия между МТ системы – $\vec{F}_{ij}^{\text{внеш}}$

Силы взаимодействия между МТ системы – \vec{F}_{ij}

Центр масс системы МТ



$$m_1 L_1 = m_2 L_2$$

$$m_1 (x_{\text{цм}} - x_1) = m_2 (x_2 - x_{\text{цм}})$$

$$\Rightarrow x_{\text{цм}} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

$$\vec{r}_{\text{цм}} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i}$$

СКОРОСТЬ движения центра масс:

$$\vec{v}_{\text{цм}} = \frac{d\vec{r}_{\text{цм}}}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i} = \frac{\sum m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt}}{\sum m_i} = \frac{\sum m_i \vec{v}_i}{\sum m_i} = \frac{\vec{p}}{m}$$



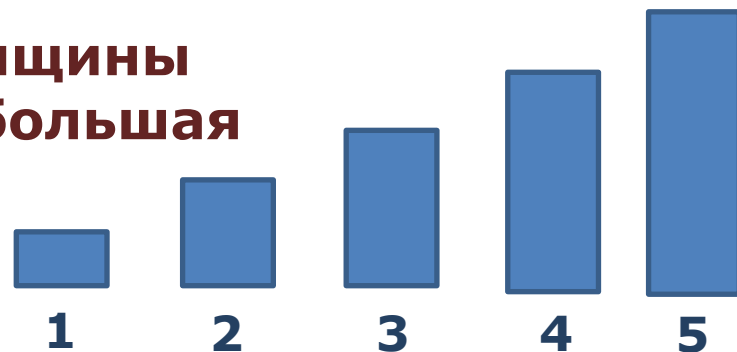
ИМПУЛЬС системы МТ:

$$\vec{p} = m \vec{v}_{\text{цм}}$$

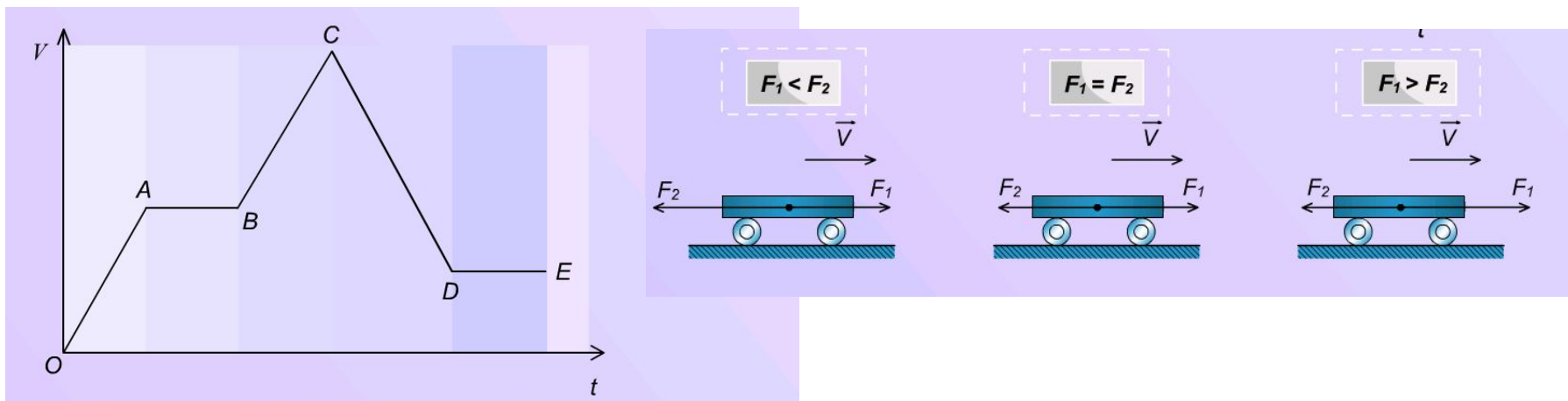


Контрольные вопросы

1. Пять пластинок одинаковой толщины имеют одинаковую массу. Наибольшая плотность у пластинки...



2. Для каждого из участков графика зависимости скорости движения тележки от времени подберите соответствующий вариант соотношения сил F_1 и F_2



3. Какая сила требуется для подъема груза массой 15 кг с ускорением 0,0 м/с²?

Силы в природе

Чтобы решать уравнение движения, необходимо знать законы действующих на тело сил

В современной физике различают виды взаимодействия:

Гравитационное

- Проявляется при взаимодействии масс
- Участвуют все частицы
- Слабее, чем ЭМ \sim на 40 порядков
- Наиболее важное на макроуровне

Масса

Электромагнитное

- Определяет взаимодействие между заряженными частицами
- Действует на любых расстояниях

Электрический заряд

Сильное

- Определяет взаимодействие между кварками и определяет структуру ядер
- Действует на расстояниях $r \sim 10^{-15}$ м
- Сильнее электромагнитного \sim в 100 раз

Слабое

- Проявляется при взаимодействиях с участием нейтрино
- Действует на расстояниях $r \sim 10^{-18}$ м
- На макроуровне почти незаметно

В классической физике рассматриваются **силы: гравитационные и ЭМ**, а также **упругие, силы трения** – сводятся к межмолекулярным взаимодействиям, т.е. имеют ЭМ природу

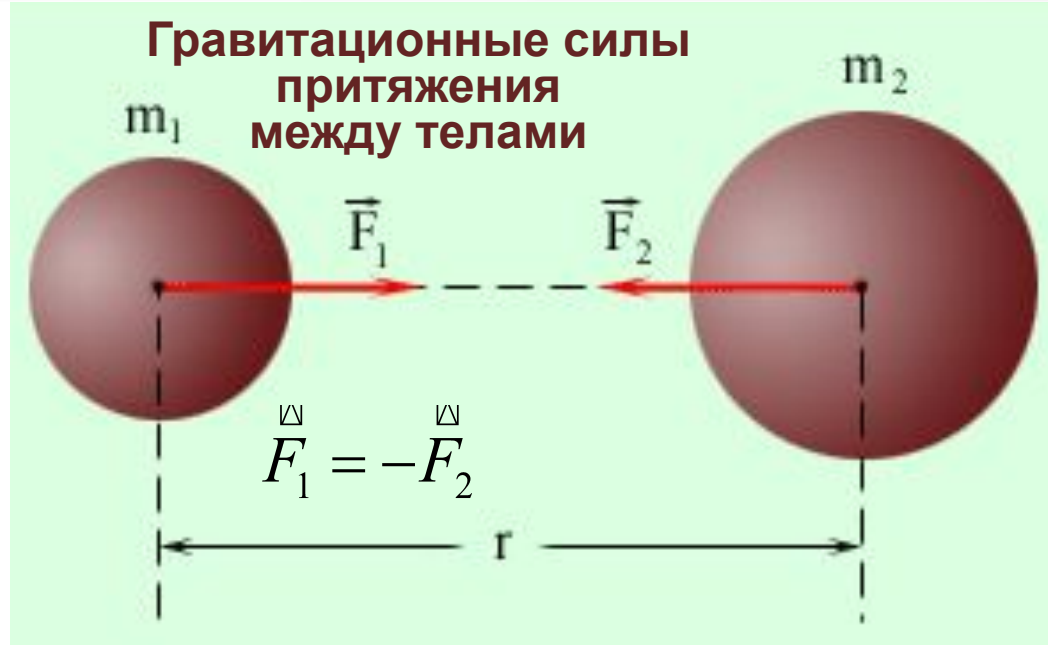
Гравитационная сила

**Закон
всемирного
тяготения**

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

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$$

**Гравитационная
постоянная**



**Сила
тяжести**

$$F = G \frac{M}{R^2} m = mg$$

**Ускорение
свободного
падения**

$$g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$$

Среднее значение на Земле

Масса Земли

$$M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}$$

Радиус Земли:

на экваторе

$$R_{\text{э}} = 6378 \text{ км}$$

$$g \approx 9,780 \text{ м/с}^2$$

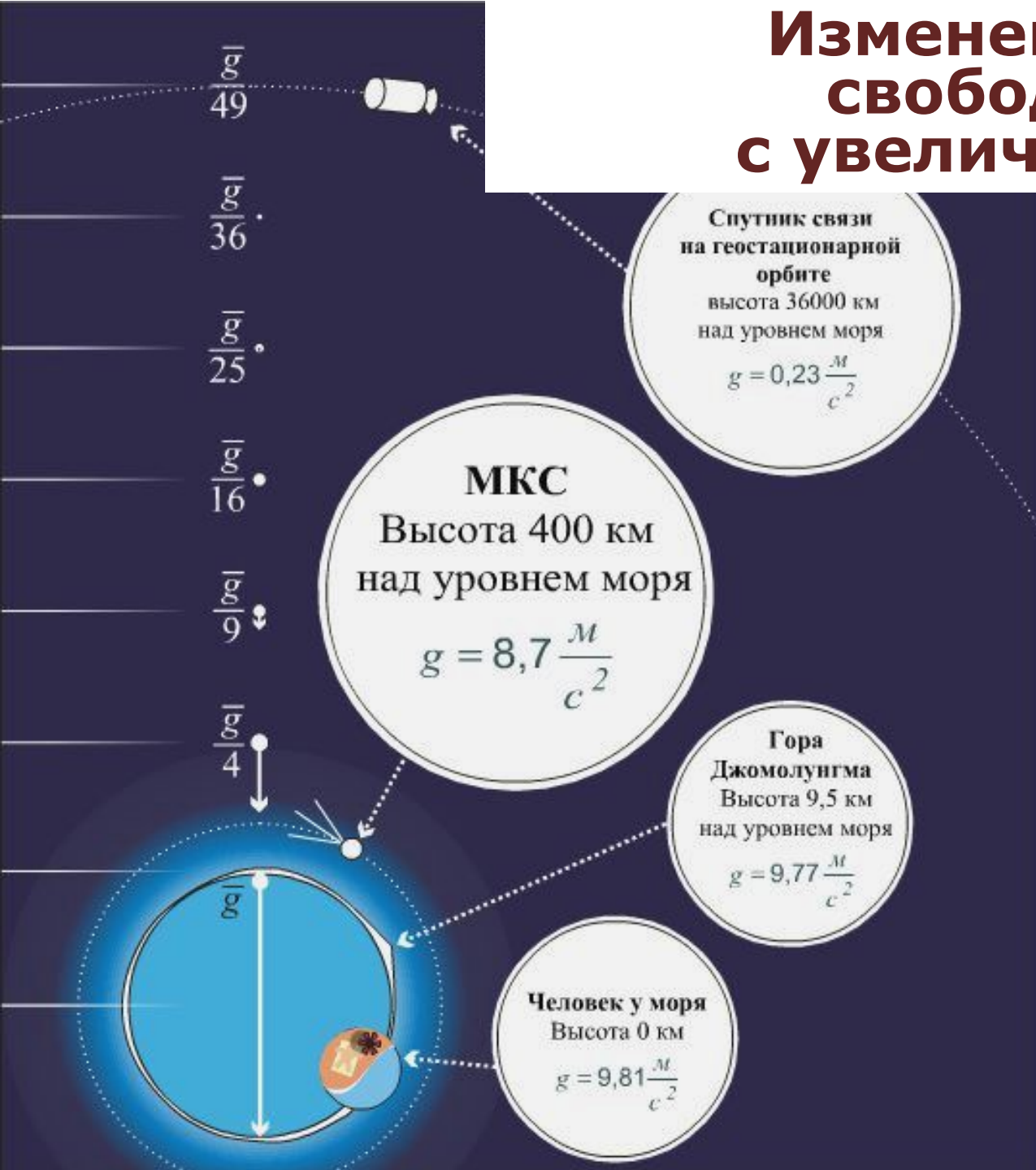
на полюсах

$$R_{\text{п}} = 6357 \text{ км}$$

$$g \approx 9,832 \text{ м/с}^2$$

g зависит от высоты

Изменение ускорения свободного падения с увеличением высоты



На высоте h от поверхности Земли ускорение свободного падения определяется:

$$g_h = G \frac{M}{(R + h)^2}$$

Сила тяжести

В СО, связанной с Землей,
на всякое тело действует сила:

$$F = mg$$

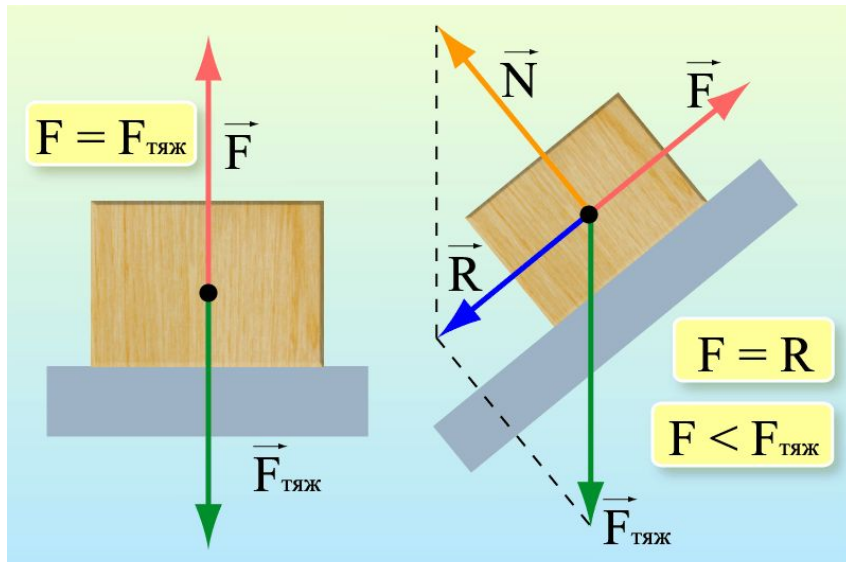
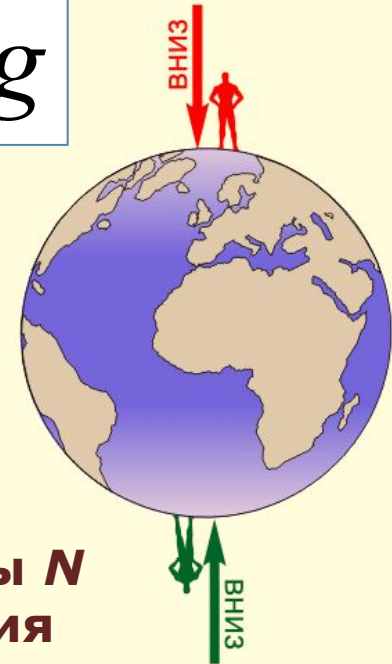
**Сила
тяжести**

сила, с которой тело
притягивается к Земле

Направление: к центру Земли

Точка приложения: центр масс

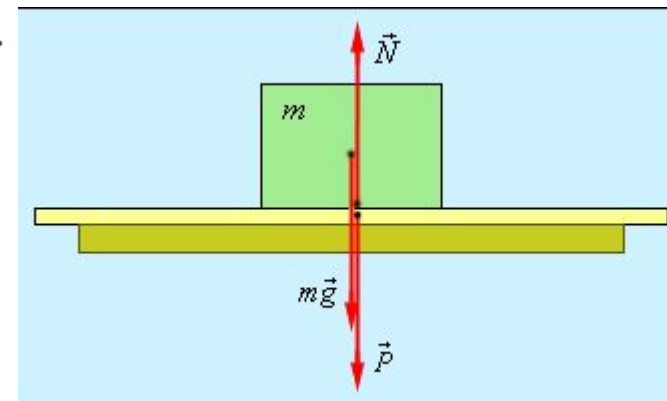
Когда тело покоится относительно Земли,
 $F_{\text{тяж}}$ уравнивается силой реакции опоры N
или подвеса T , удерживающих тело от падения



→ тело действует на опору
или подвес с силой

$$\vec{P} = -\vec{N}$$

$$\vec{P} = -\vec{T}$$

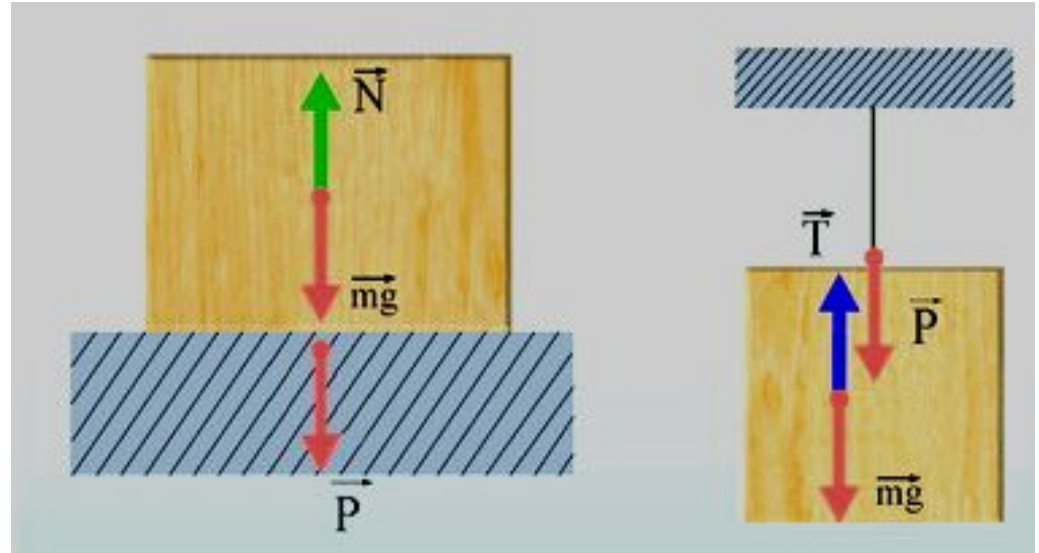


Вес тела. Изменение веса тела

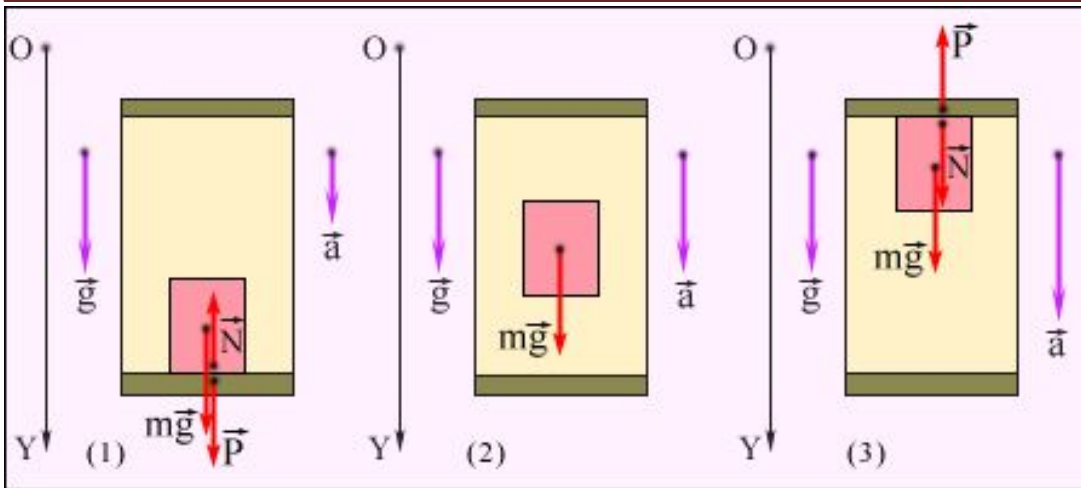
Вес тела

Сила, с которой тело действует на опору или растягивает вертикальный подвес

Вес тела в ускоренно движущемся лифте



движение вниз

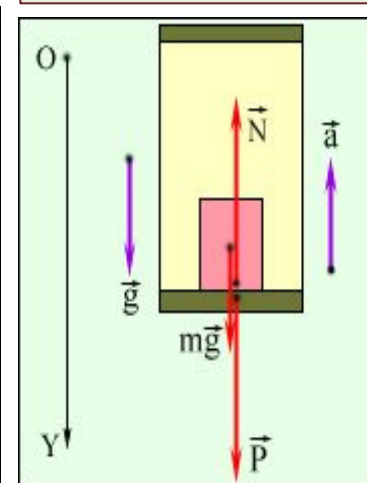


$a < g,$
 $P < mg$

$a = g, P = 0$
невесомость

$a > g,$
 $P < 0$

вверх



перегрузки

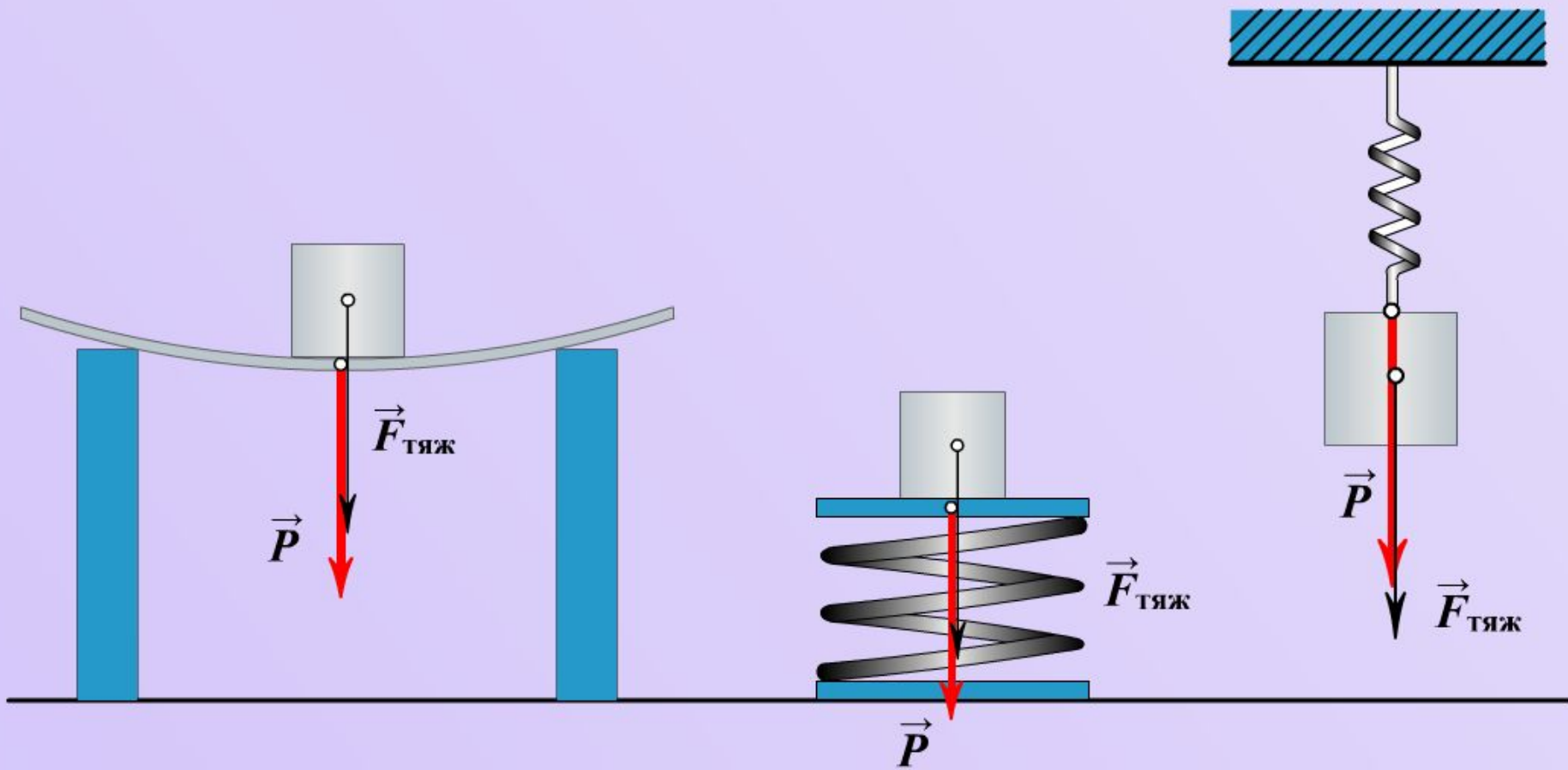
Вес тела
В общем
случае

$$P = mg - N$$

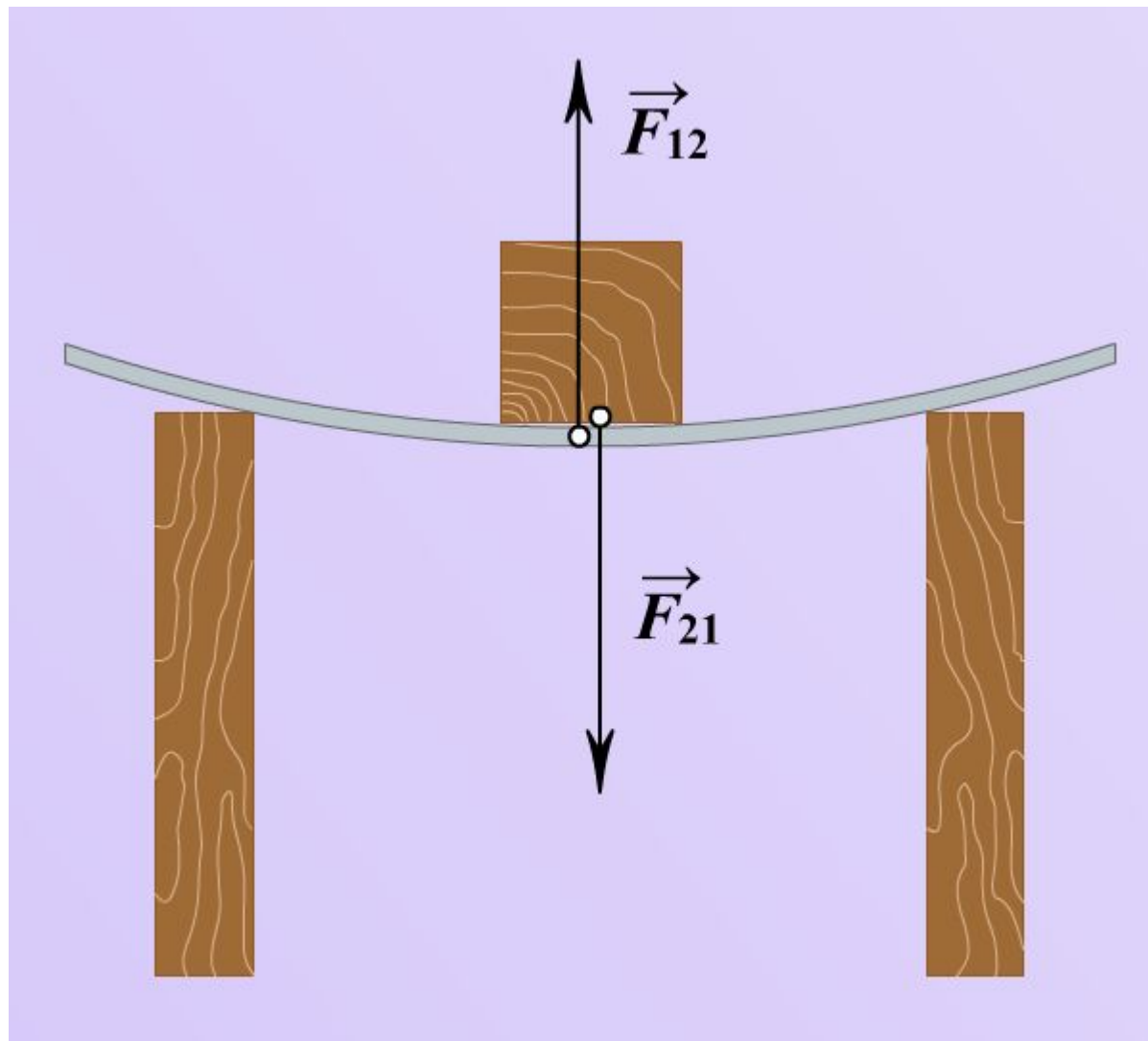
При
ускоренном
движении
по вертикали

$$P = m(g - a)$$

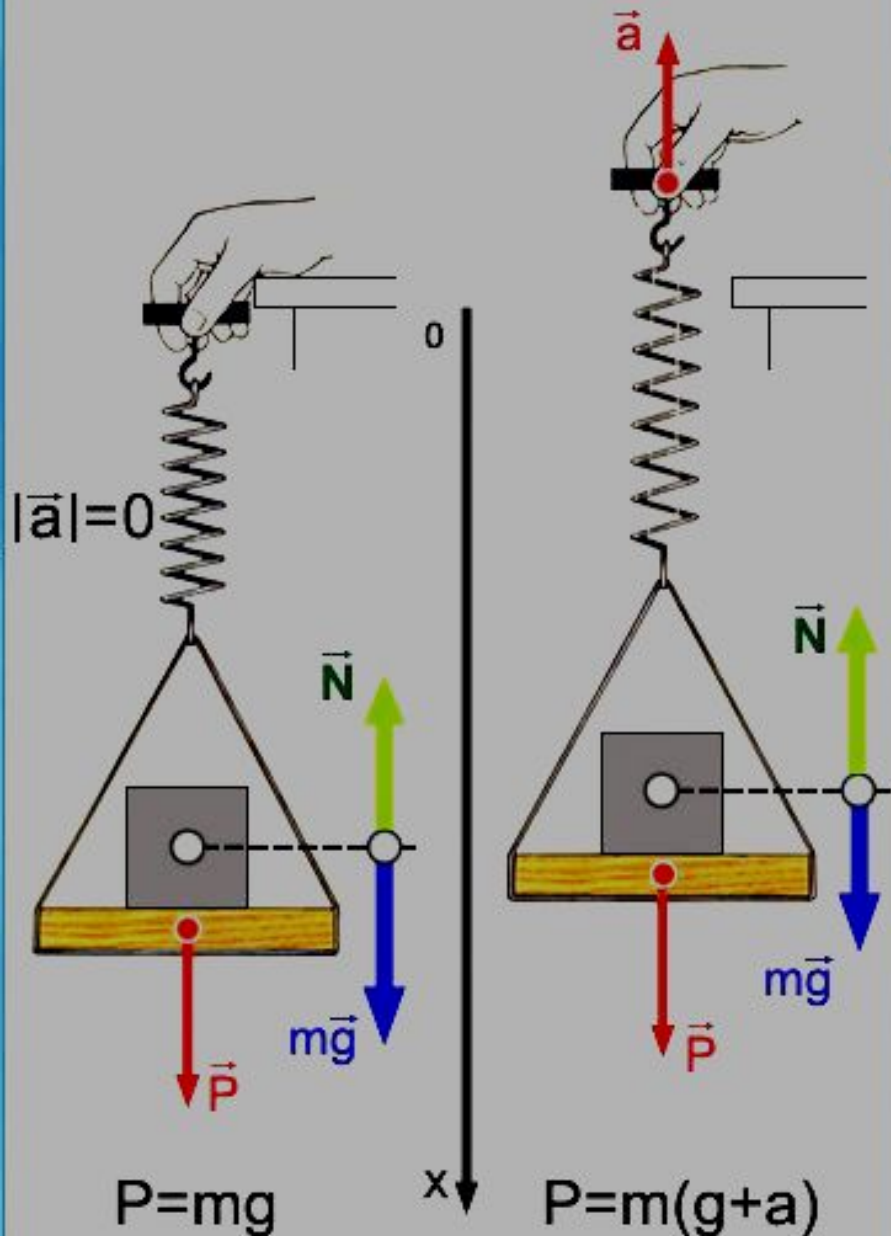
Сила тяжести и вес тела



Сила реакции опоры



Перегрузки



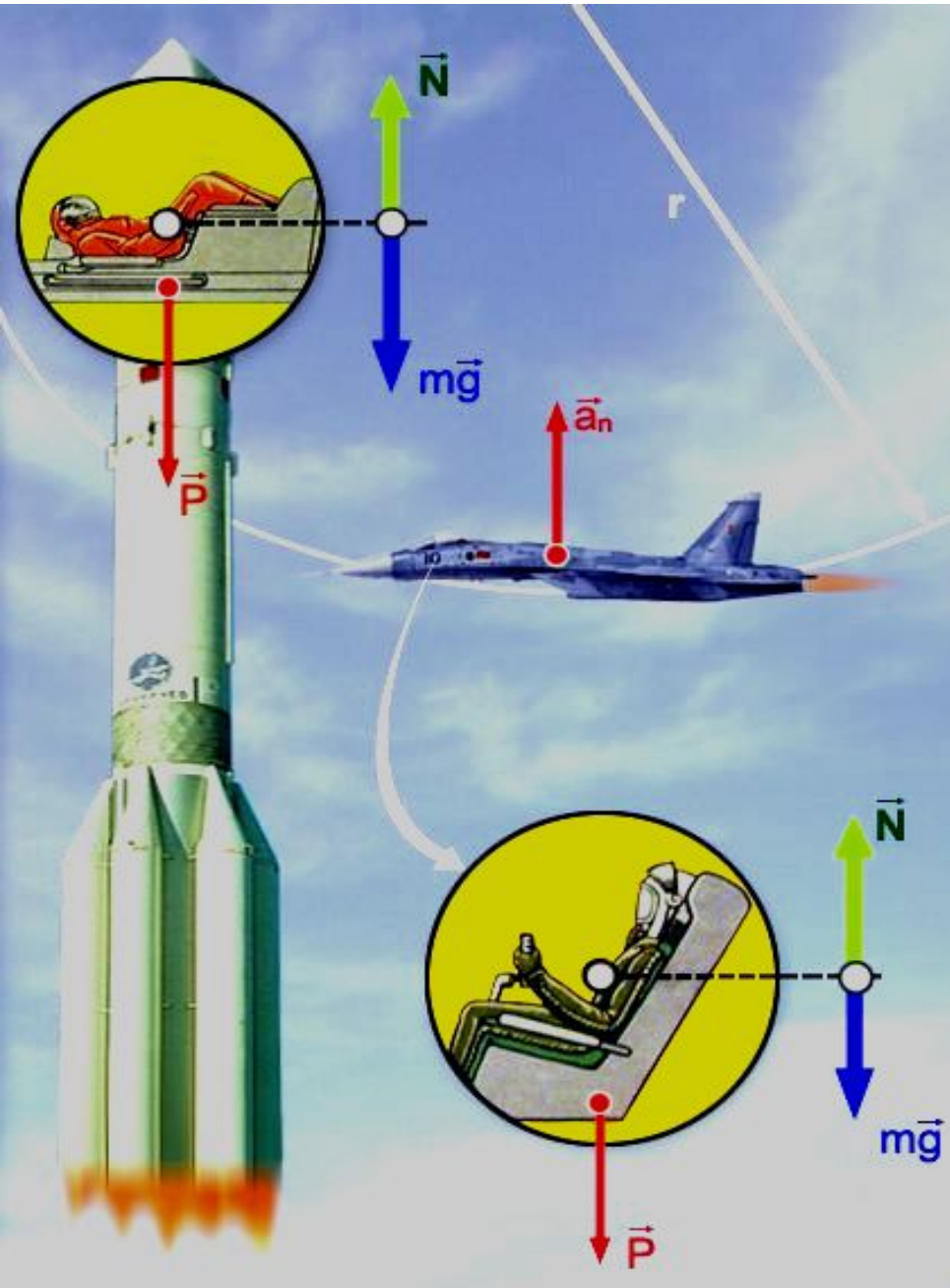
Увеличение веса тела,
вызванное ускоренным
движением опоры
или подвеса

Состояние тела, при котором
его вес больше силы тяжести

Возникает

при ускоренном движении
тела и опоры с ускорением,
направленным вертикально
вверх

Перегрузки

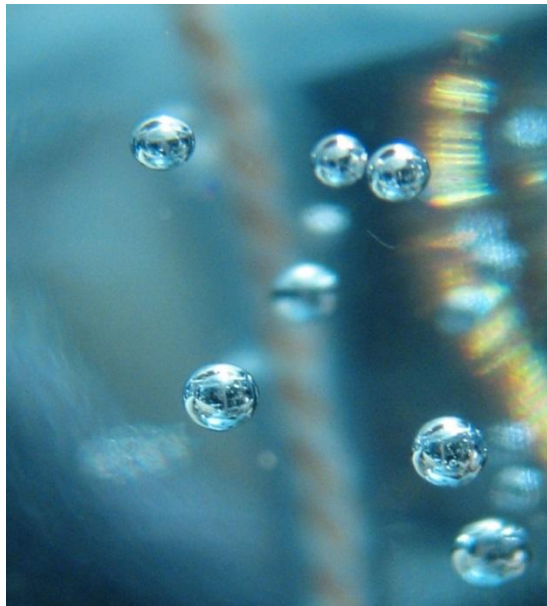


Человек, стоящий неподвижно	1
Пассажир в самолете при взлете	1,5
Парашютист при приземлении со скоростью 6 м/с	1,8
Парашютист при раскрытии парашюта	до 10,0
Космонавты при спуске в космическом корабле «Союз»	до 3,0-4,0
Летчик спортивного самолета при выполнении фигур высшего пилотажа	до 12
Перегрузка (длительная), соответствующая пределу физиологических возможностей человека	8,0-10,0
Наибольшая (кратковременная) перегрузка автомобиля, при которой человеку удалось выжить	214

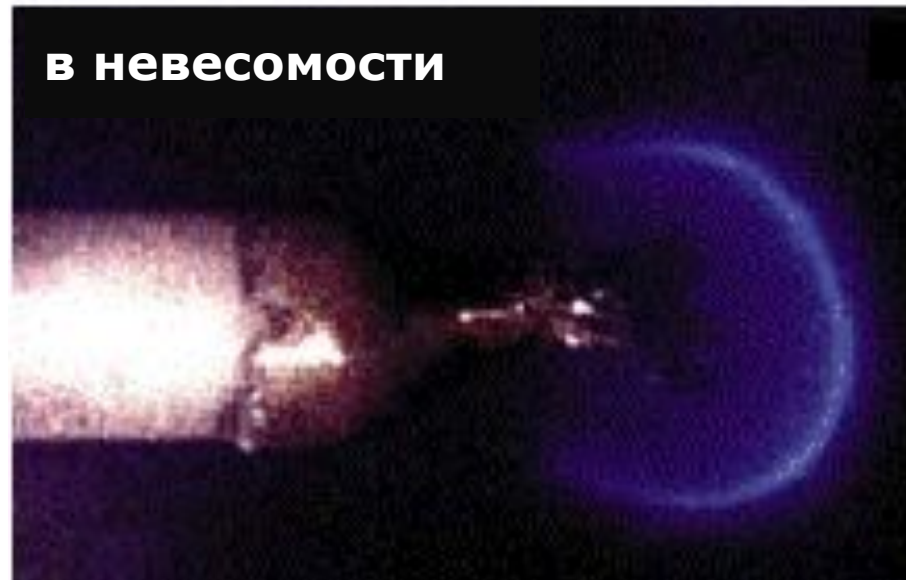
Невесомость



на Земле



В НЕВЕСОМОСТИ



Упругие силы

- Под действием приложенных к нему сил всякое реальное тело **ДЕФОРМИРУЕТСЯ**, т.е. **изменяет свои размеры и форму**
- Если после прекращения действия силы тело принимает первоначальные размеры и форму



деформация упругая

**Деформации упругие,
если**

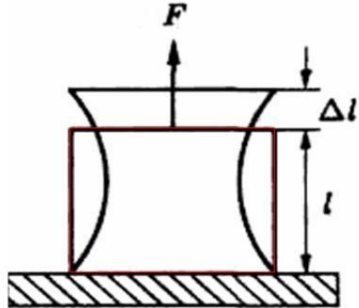
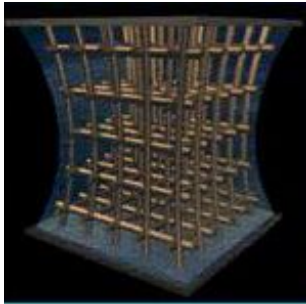
$$F \leq F_{\text{предел упругости}}$$

**Сила
упругости**

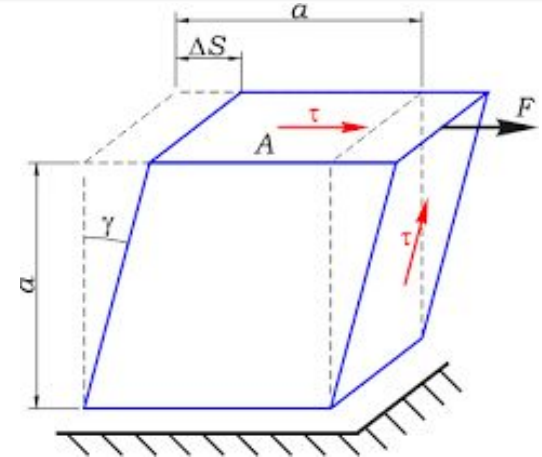
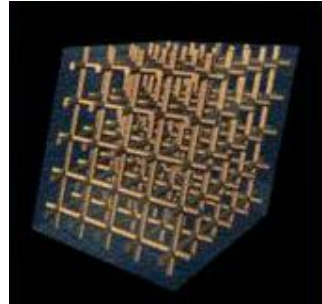
**Возникает при деформации тела
и направлена противоположно
направлению смещения частиц
при деформации**

Основные типы упругой деформации

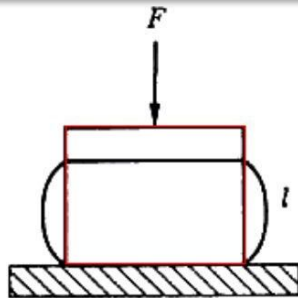
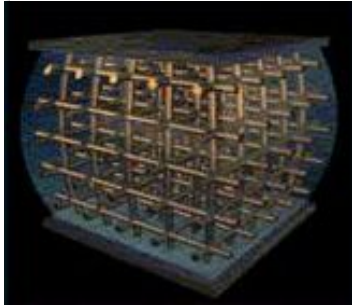
Растяжение



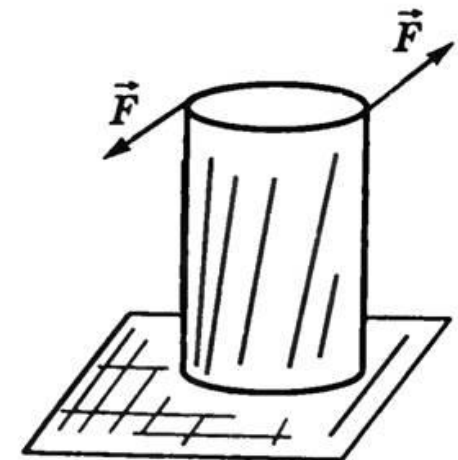
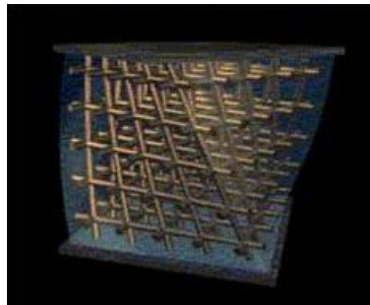
Сдвиг



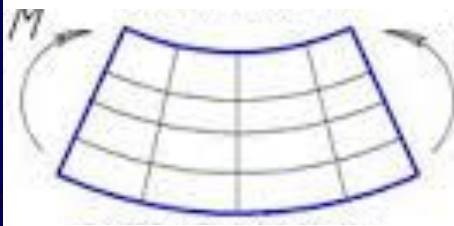
Сжатие



Кручение



Изгиб



Сводится к сдвигу

Сочетание растяжения и сжатия

Сила упругости

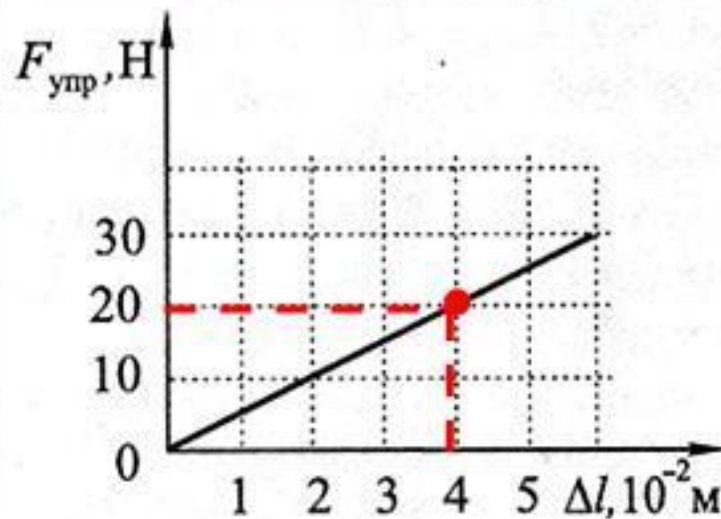
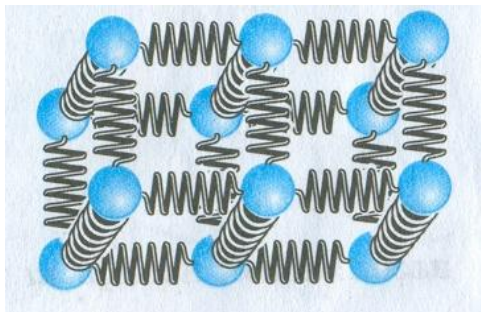
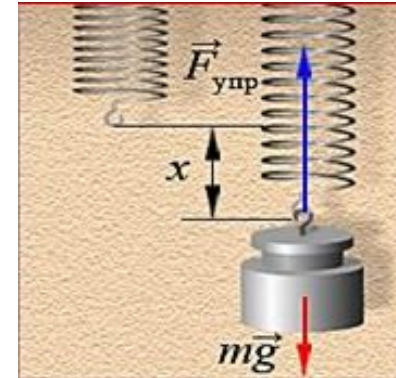
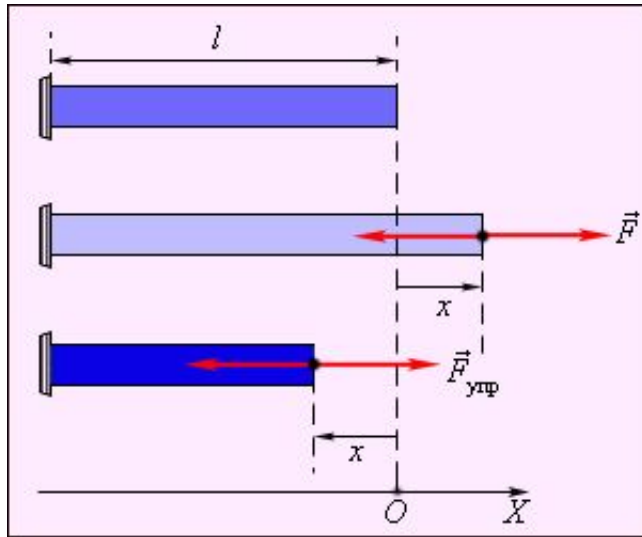
Сила упругости

Возникает в теле при его деформации, направлена противоположно направлению смещения частиц при деформации

При малых деформациях ($|x| \ll l$) справедлив закон Гука:

$$F_{\text{упр}} = -kx$$

k – коэффициент упругости (жесткость)



Сила упругости

Возникает при упругой деформации тел

Закон Гука

$$\vec{F} = -k\Delta\vec{l}$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела

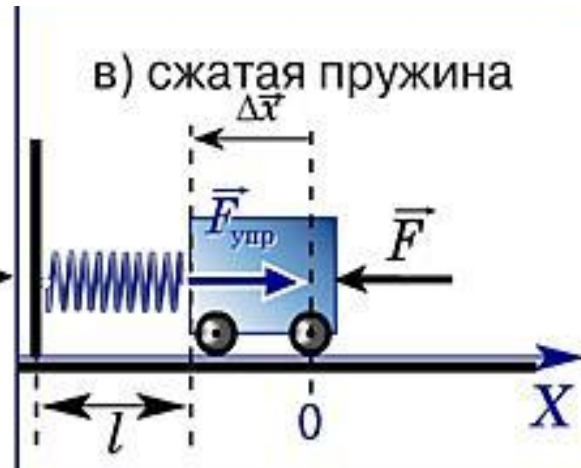
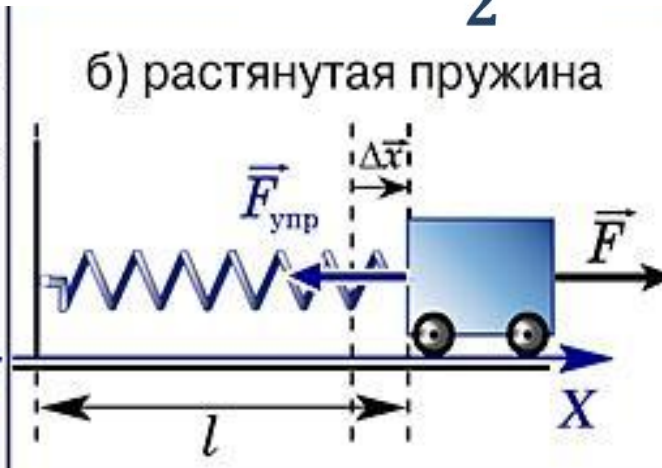
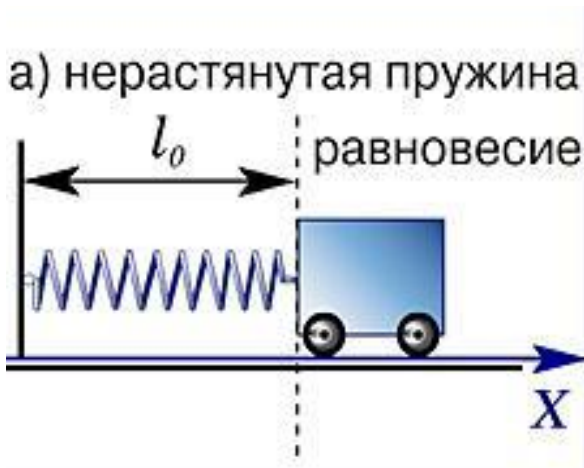
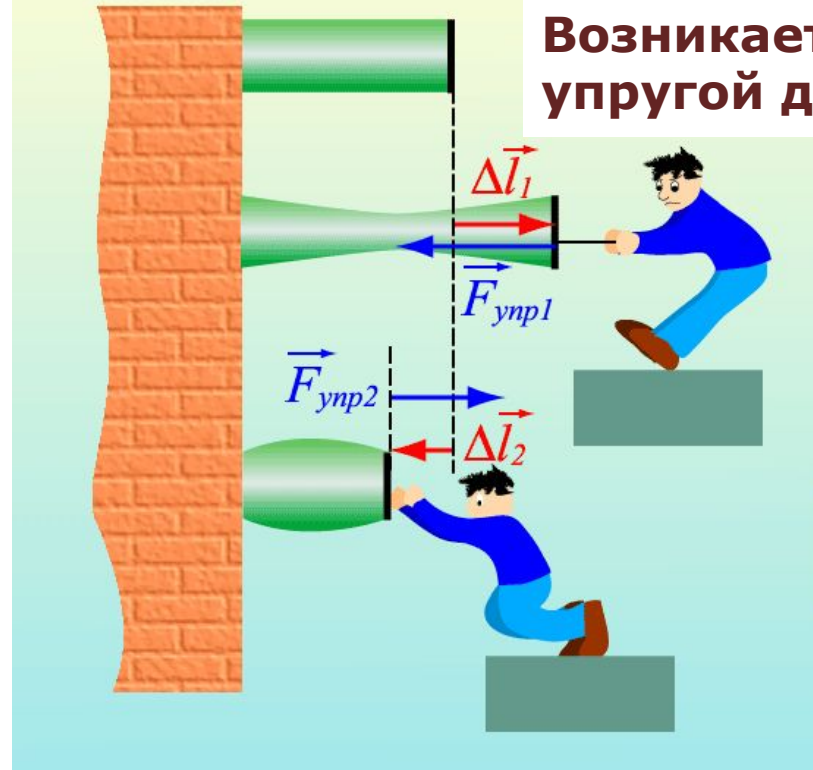
$$E = \frac{kx^2}{2}$$



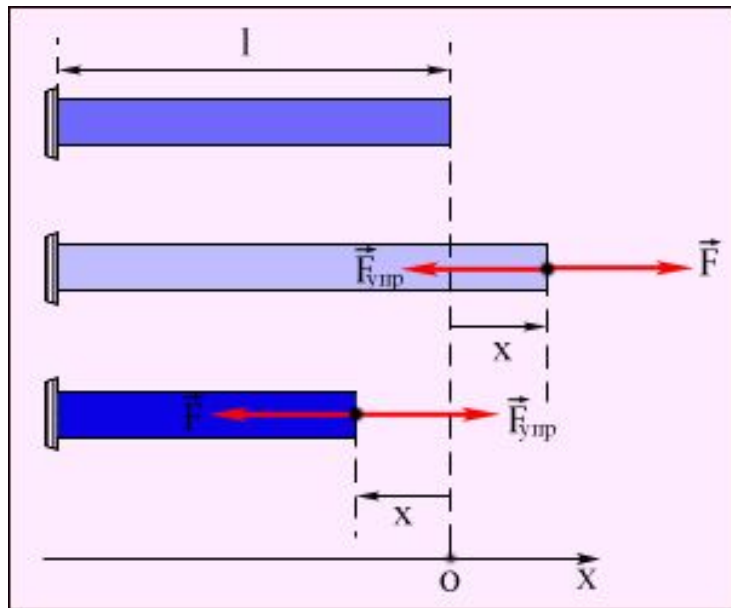
а)



б)

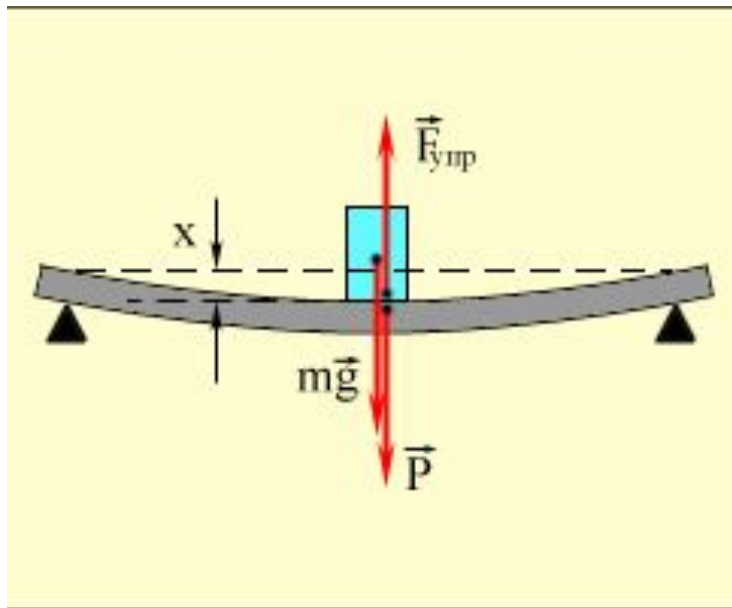


Сила упругости. Закон Гука

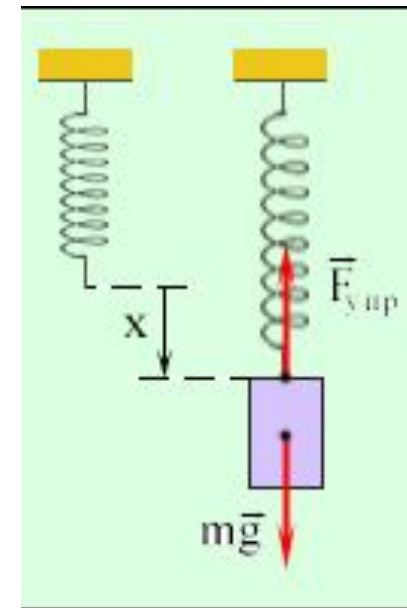


Деформация
растяжения и сжатия

$$\vec{F} = -\vec{F}_{упр}$$



Деформация изгиба



Деформация
растяжения

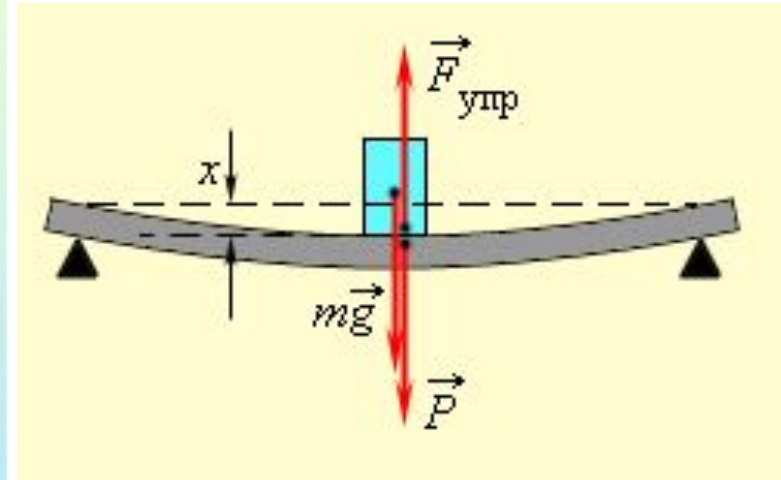
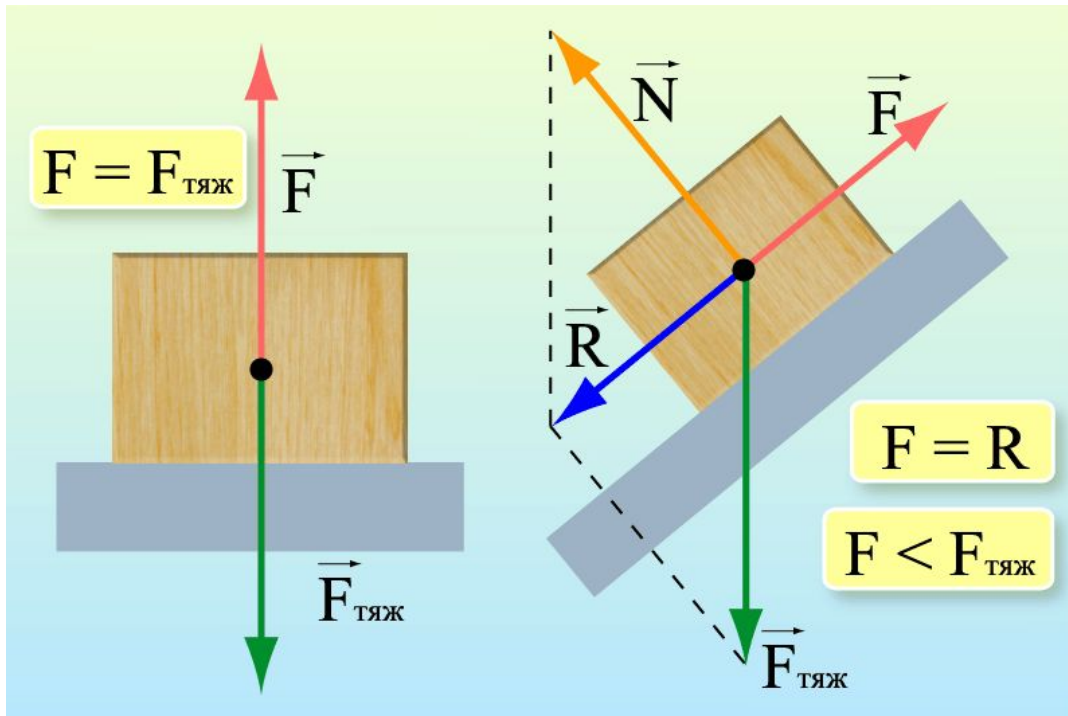
$$F_{упр} = -mg$$

$$F_{упр} = -kx$$

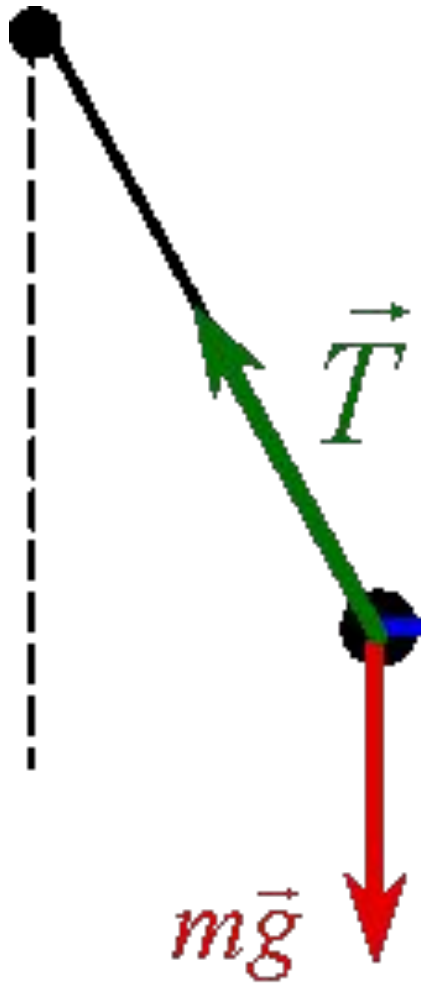
Сила нормальной реакции опоры

Природа: сила упругости,
возникающая при деформации

Направление: всегда перпендикулярно (нормально) к опоре



Сила натяжения

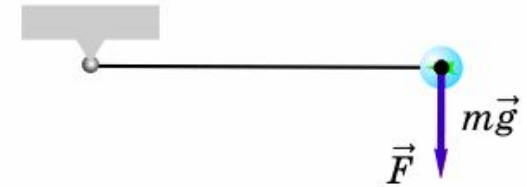


**Сила
натяжения**

\vec{T} сила, с которой нить
действует на тело

Точка приложения: точка подвеса

Направление: вдоль нити

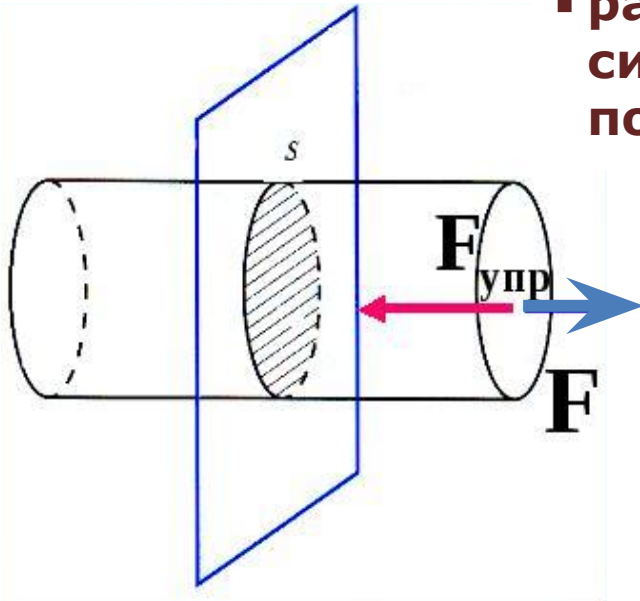


Механическое напряжение

- Однородные стержни ведут себя при растяжении или однородном сжатии подобно пружине
- Величина, характеризующая деформацию стержня – **относительное изменение его длины**

Механическое напряжение

- сила упругости, действующая на единицу площади
- равно отношению модуля силы упругости к площади поперечного сечения тела



При малых деформациях:

$$\sigma = E \varepsilon$$

вывод формулы

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}$$

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$$

– нормальное напряжение

$$[\sigma] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}$$

E – модуль Юнга



$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S} = \frac{k|\Delta x|}{S} \cdot \frac{l_0}{l_0} = \frac{\overset{E}{kl_0}}{S} \cdot \frac{\overset{\varepsilon}{|\Delta x|}}{l_0} = E \cdot \varepsilon$$



$$\sigma = E\varepsilon$$

Модуль Юнга

- Зависит только от свойств материала
и НЕ зависит от размеров и формы тела
- Показывает **напряжение, которое необходимо приложить к телу, чтобы удлинить его в 2 раза**

в состоянии вольтерметрии хиперпелес рлд ▪
:хбпэдэп хнжорнш в

$$\sigma_m \backslash H^{1101} \cdot \Sigma \approx \Xi \text{ нлбтс рлд} \quad \blacksquare$$

$$\sigma_m \backslash H^{\delta 01} \cdot \Sigma \approx \Xi \text{ юннээр рлд} \quad \blacksquare$$

Батут



Катапульты



Лук

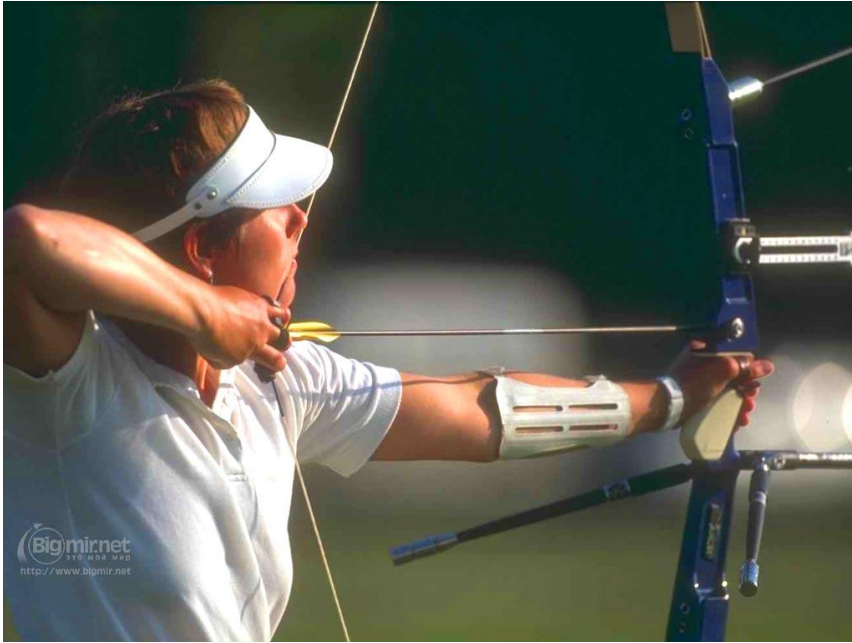
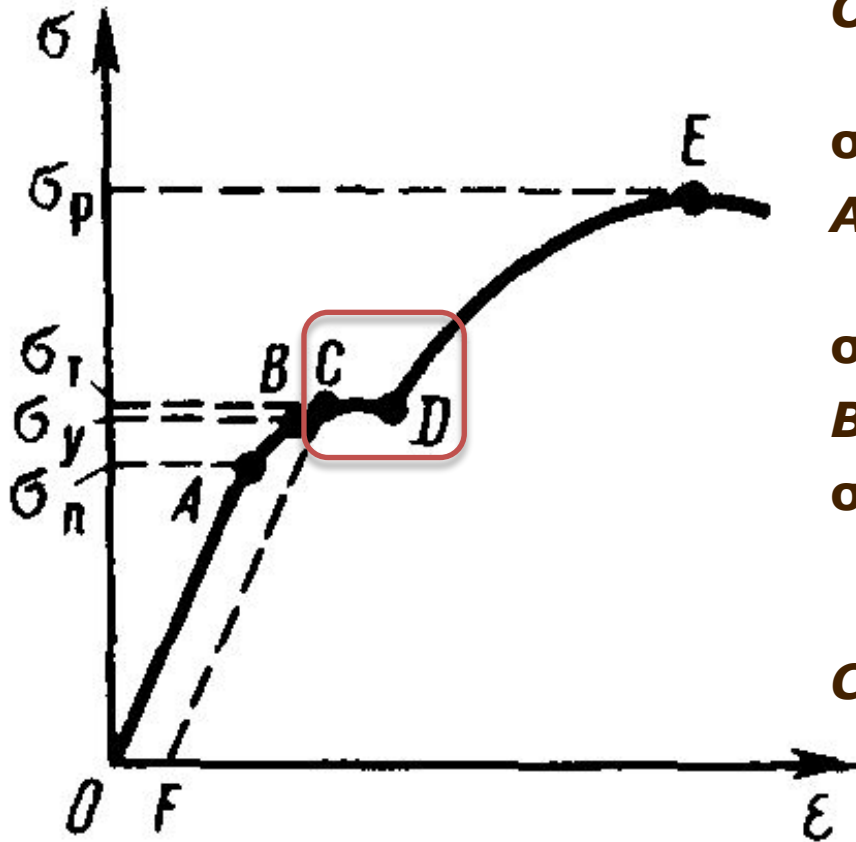


Диаграмма напряжений



OA – зависимость линейная, остаточной деформации нет

σ_p – **предел пропорциональности**

AB – деформация еще упругая, хотя зависимость $\sigma(\epsilon)$ уже нелинейная

σ_y – **предел упругости**

BC – возникают остаточные деформации

σ_t – **предел текучести** – напряжение, при котором появляется заметная остаточная деформация ($\approx 0,2\%$)

CD – деформация возрастает без увеличения напряжения – **область текучести** (или **область пластических деформаций**)

DE – происходит разрушение тела

σ_r – **предел прочности** – максимальное напряжение, возникающее в теле до разрушения

Вязкие материалы – CD значительная

Хрупкие материалы – CD мала

Деформация сдвига

- В любом сечении, параллельном граням возникает **тангенциальное напряжение**, где S – площадь грани

$$\tau = \frac{F}{S}$$

отр , жбт рэтэүқнмқофэд опэт йннэжрқпбн мэнвтэйэд доП
л эннротээбқ бн йотүрд оньпэтнэонто рэтнтээмэ ьнбқт бндо

- Характеристика деформации: **относительный сдвиг**

$$\gamma = \frac{a}{b}$$

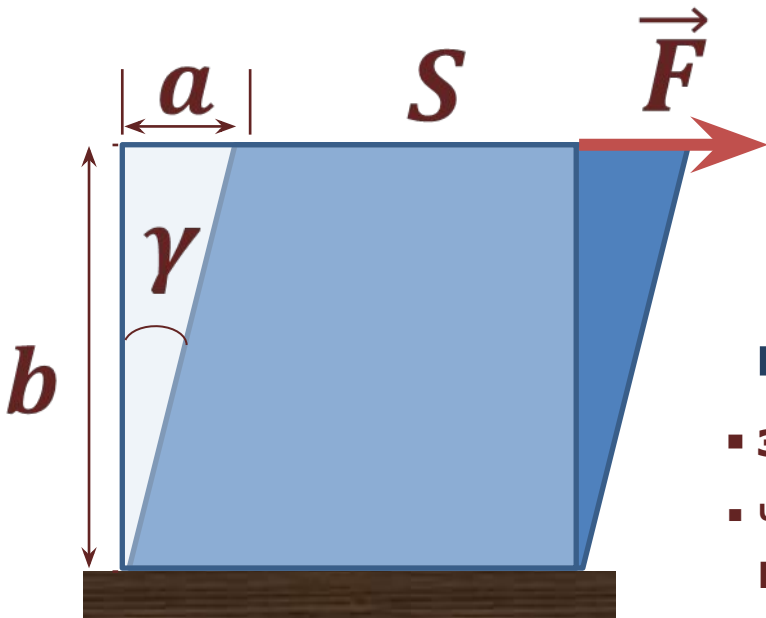
Опыт:

$$\gamma = \frac{1}{G} \cdot \tau$$

модуль сдвига \longrightarrow

$$G$$

- зависит только от свойств материала
- численно равен такому **тангенциальному напряжению**, при котором **угол сдвига = 45°**, если при этом предел упругости не превзойден



Силы трения

Силы трения

появляются при перемещении соприкасающихся тел или их частей друг относительно друга

Внешнее трение

возникает при перемещении двух соприкасающихся тел

Внутреннее трение

возникает между частями одного и того же сплошного тела (жидкости или газа)

Сухое трение

возникает между поверхностями твердых тел

Трение скольжения

возникает при относительном перемещении двух твердых тел

Трение покоя

возникает при попытке перемещения двух твердых тел

Трение качения

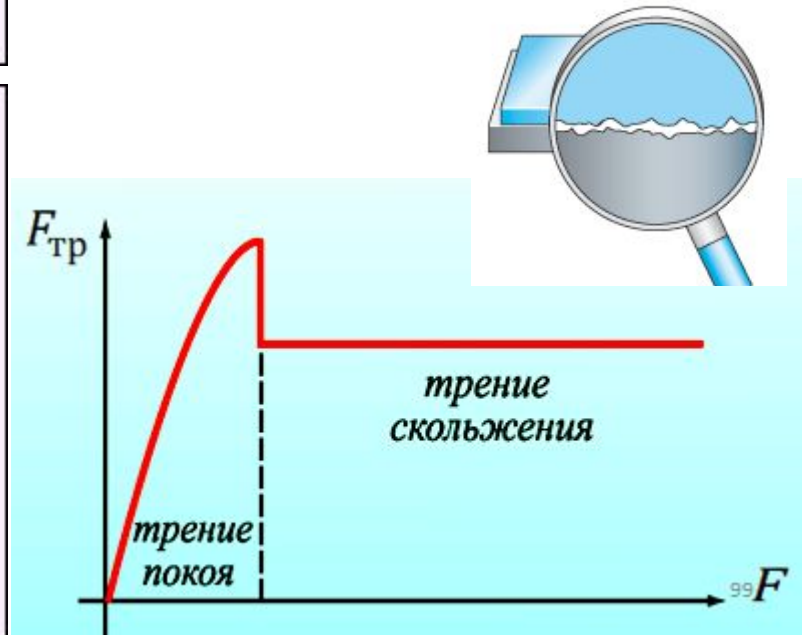
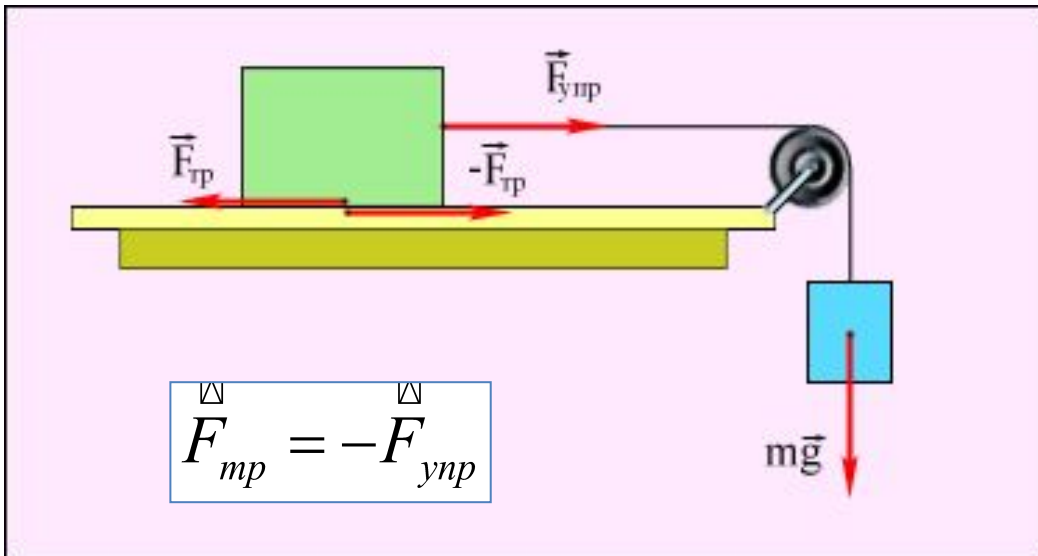
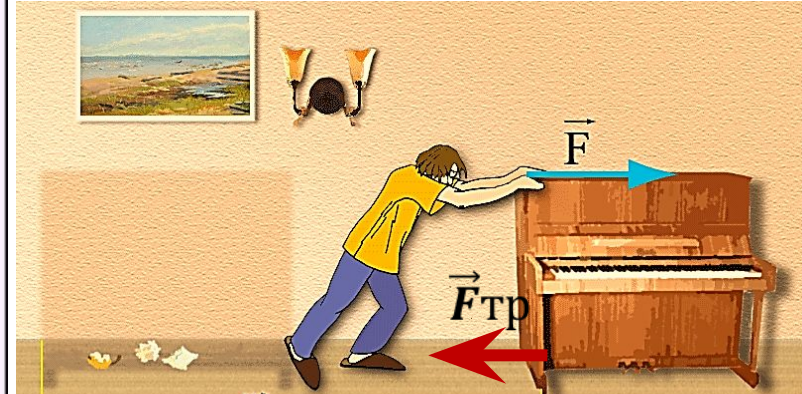
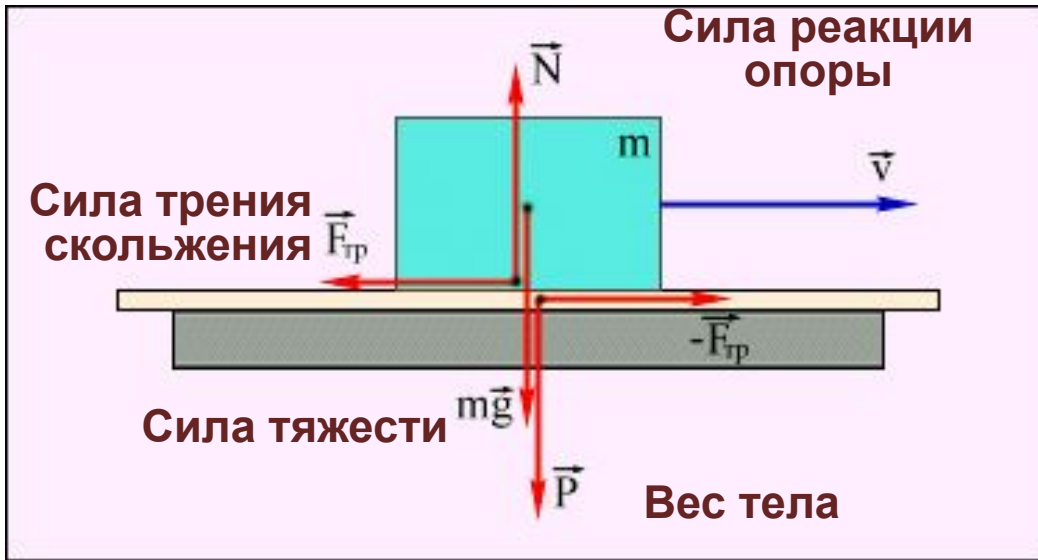
Вязкое трение

возникает между твердым телом и жидкой или газообразной средой, а также между слоями такой среды

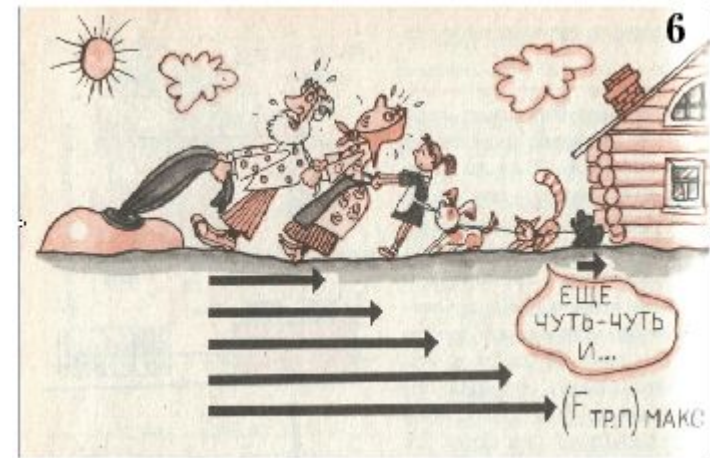
Сила трения

Сила, возникающая в плоскости касания тел при их относительном перемещении

$$F_{тр} = \mu N$$



Сила трения покоя



Сила трения покоя

Всегда равна по модулю и направлена противоположно силе, параллельной поверхности соприкосновения и стремящейся привести это тело в движение

$$\vec{F}_{тр} = -\vec{F}$$

Сила трения покоя НЕ может превышать некоторого \max значения

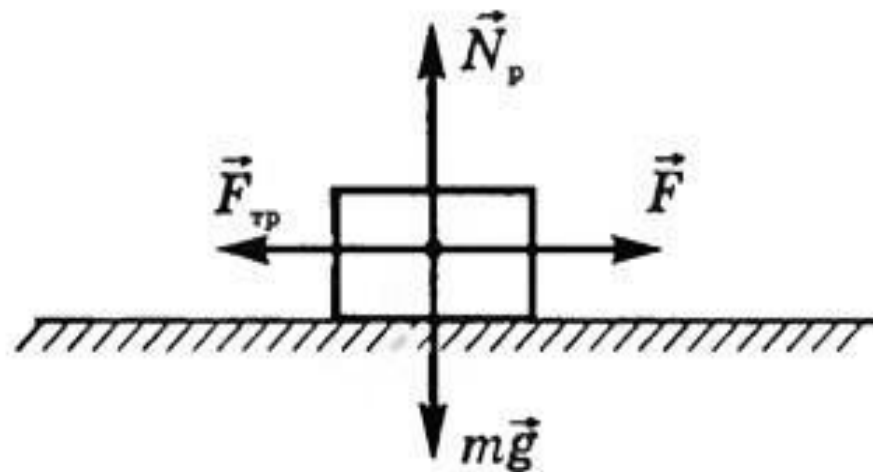
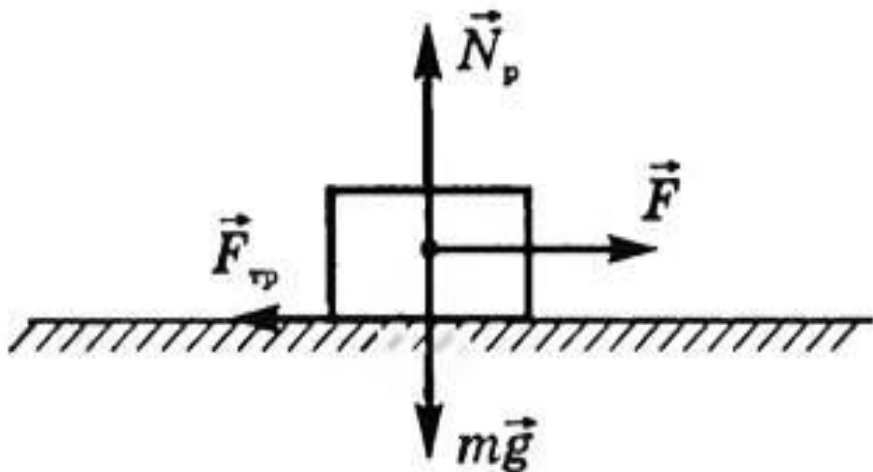
Если $F > F_0$ — тело движется

Если $F \leq F_0$ — тело покоится

При $F > (F_{тр})_{\max} = F_0$

Сила трения покоя — $F_{тр} = F$

Сила трения покоя \longrightarrow Сила трения скольжения



От чего зависит сила трения

Сила трения пропорциональна величине **силы нормального давления**, прижимающей трущиеся поверхности друг к другу

$$F_{\text{тр}} = \mu N$$

Максимальная сила трения покоя и сила трения скольжения **зависят от:**

- **силы давления тел друг на друга** (силы реакции опоры),
- **материалов трущихся поверхностей, от скорости относительного движения**

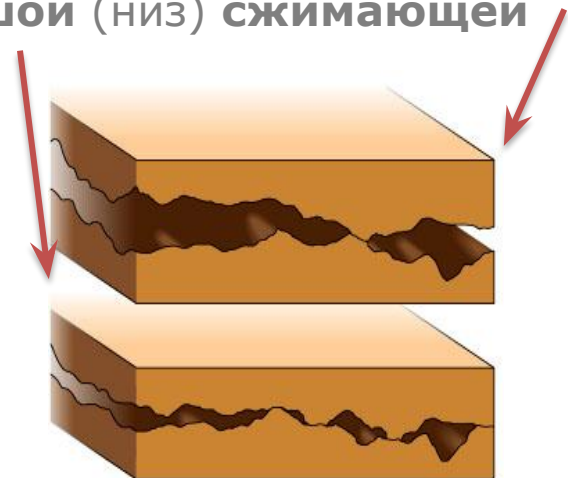
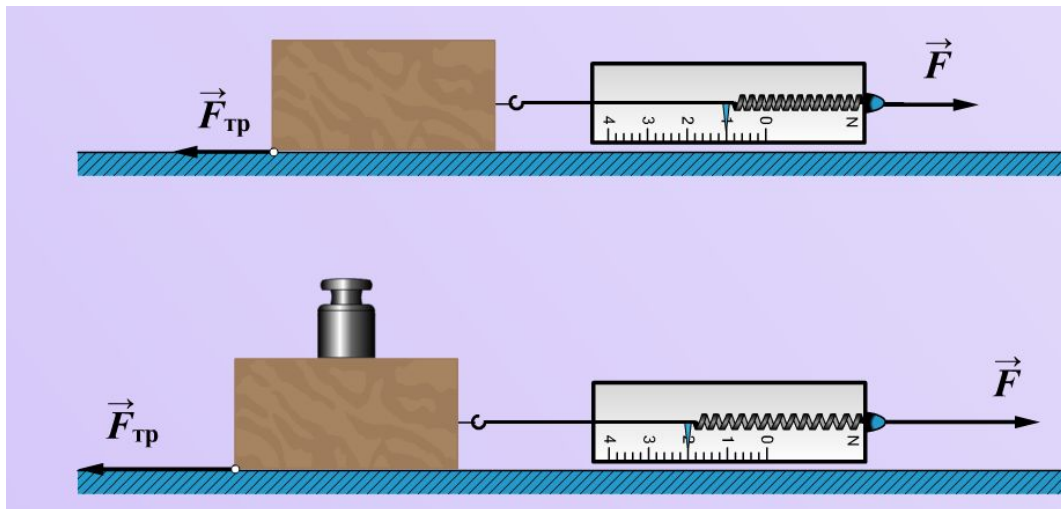
НЕ зависят от площади соприкосновения

μ - коэффициент трения, зависит от природы и состояния (шероховатости) трущихся поверхностей

В общем случае при скольжении

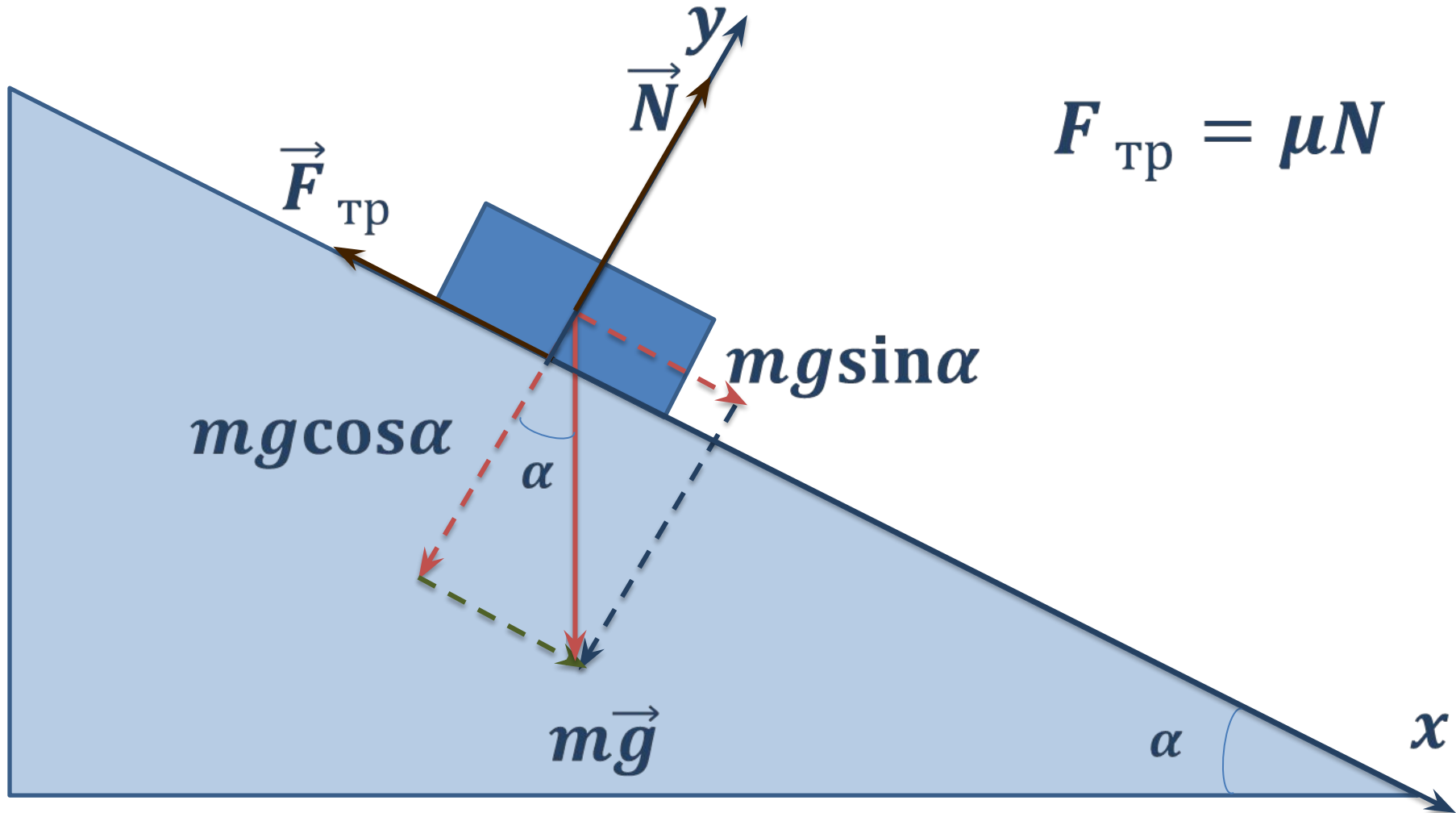
μ - функция скорости

Схематическое изображение места контакта скользящих поверхностей при малой (верх) и большой (низ) сжимающей их силе

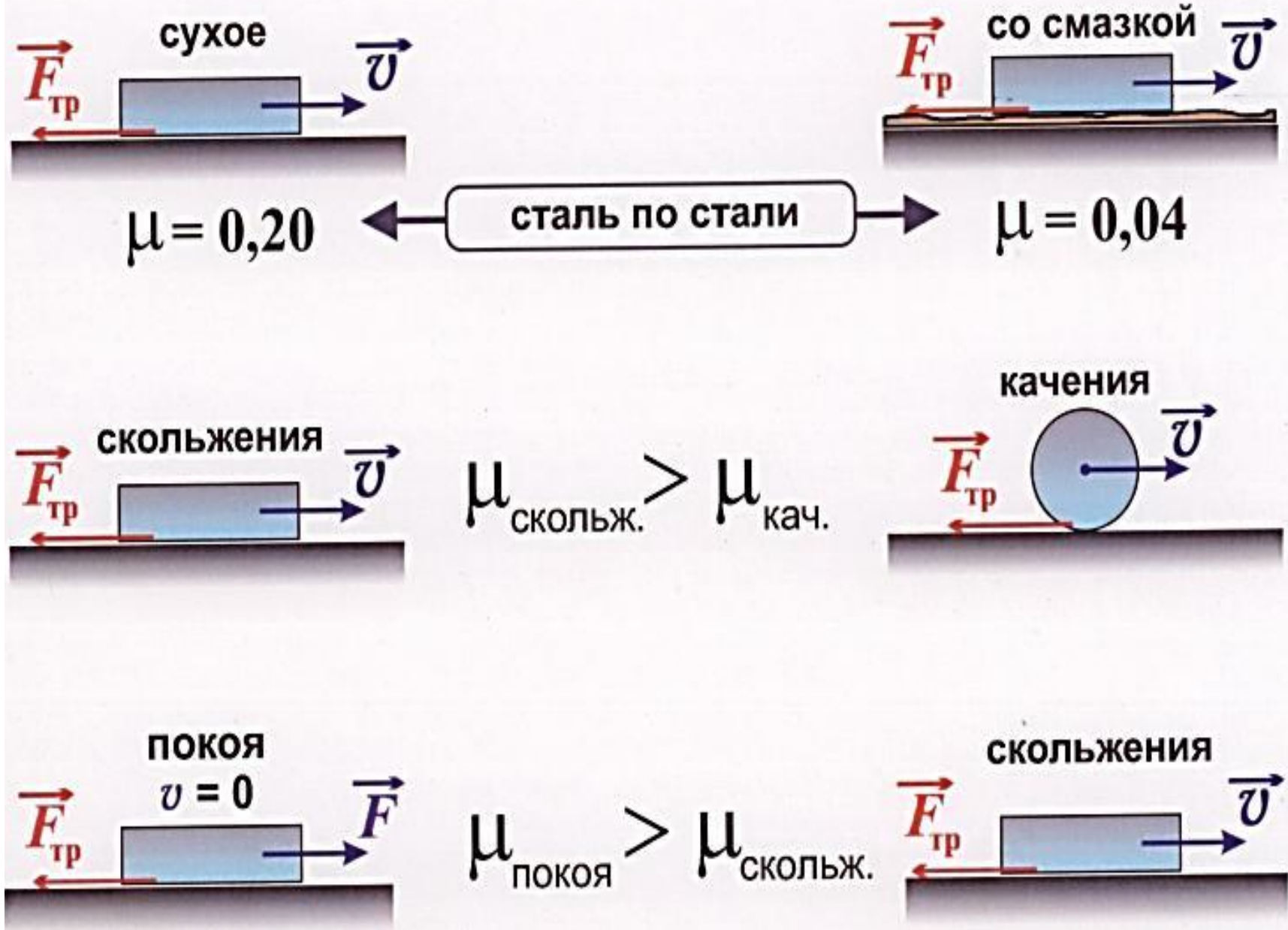


Уравнение движения тела

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}}$$



Виды сил трения



Сила трения качения

- Силы, действующие на тело вращающегося со стороны поверхности качения
- Не симметричны относительно вертикальной плоскости

Сила, возникающая в подшипнике, вращающемся в подшипнике, возникает со стороны поверхности качения, тогда как сила трения возникает со стороны поверхности скольжения.

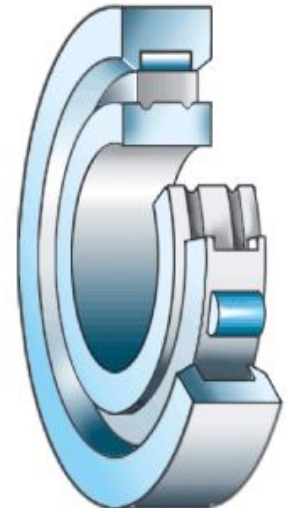
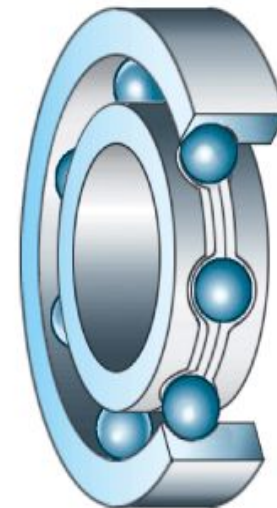
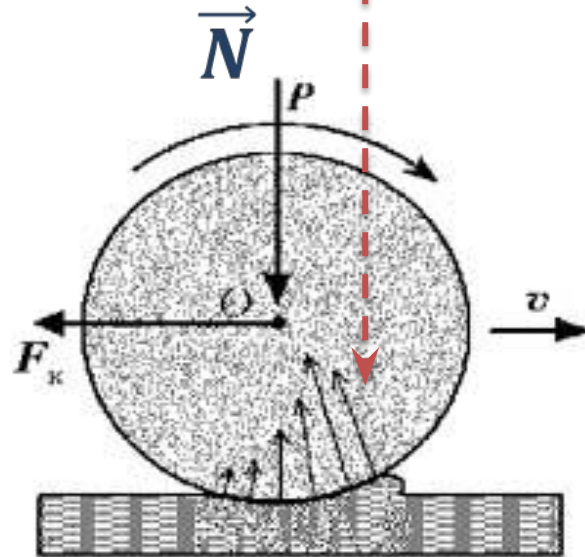
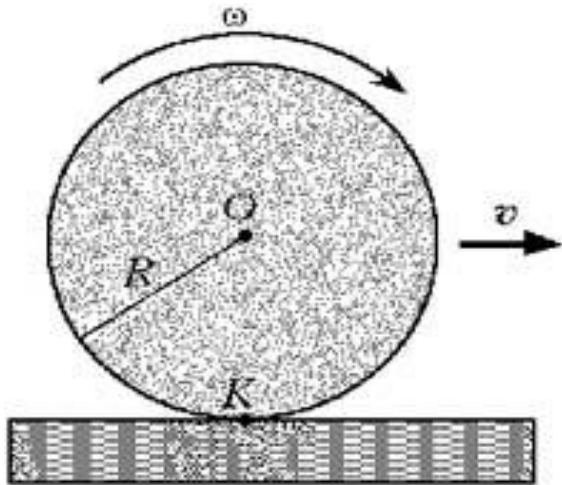
- Результирующая сила F направлена в сторону вращения

– для подшипника, вращающегося в подшипнике, результирующая сила направлена в сторону вращения

А сила трения качения $F_{тр. кач}$ направлена в сторону вращения

$$F_{тр. кач} = \mu_{кач} N$$

$$\mu_{кач} \ll \mu$$



Внутреннее трение

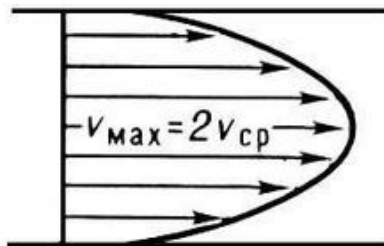
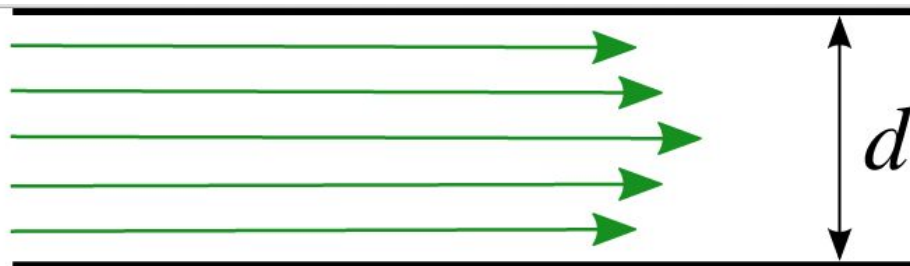
Внутреннее трение

возникает между слоями жидкости или газа, движущимися с различными скоростями, или при движении твердого тела в жидкой или газообразной среде

Виды течения жидкостей (газов)

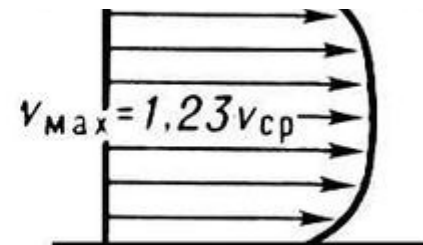
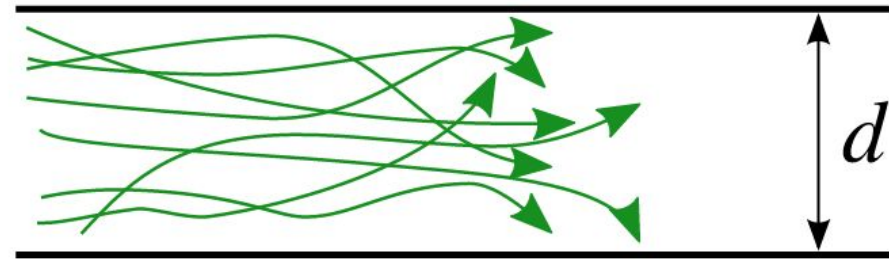
Ламинарное (слоистое) течение

при котором **отдельные слои жидкости (газа) движутся с параллельно направленными скоростями, не перемешиваясь**

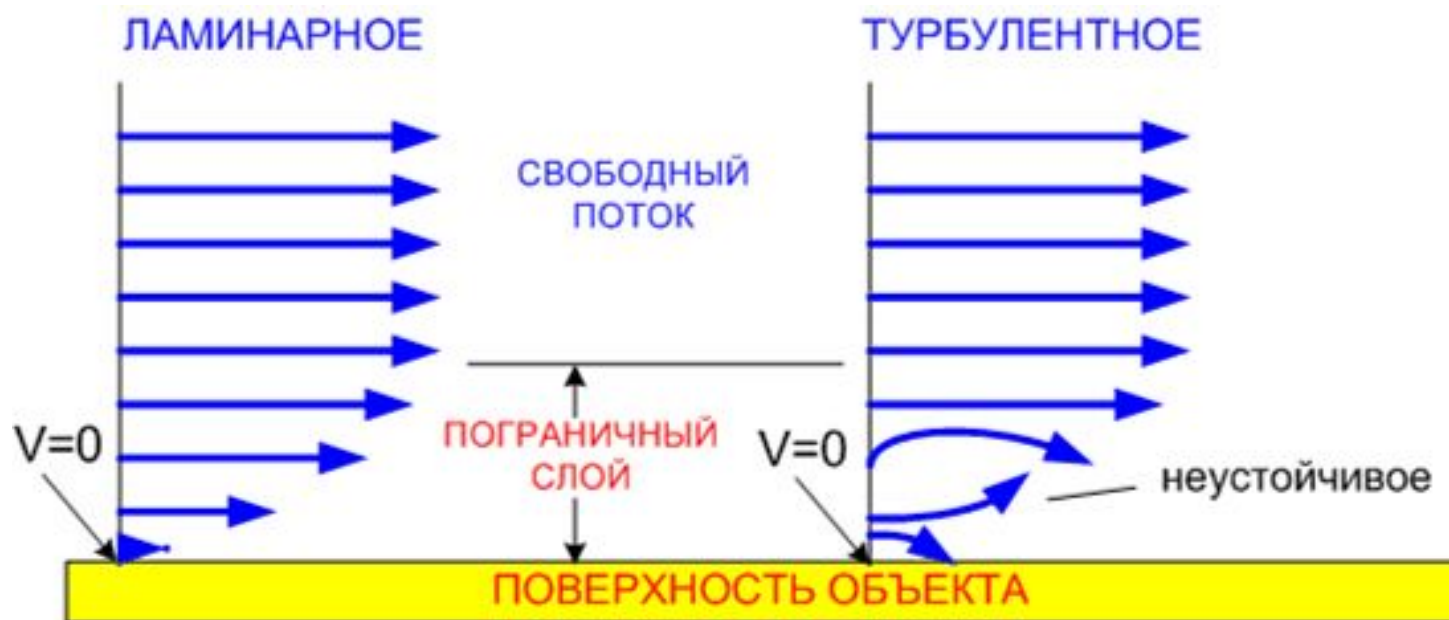
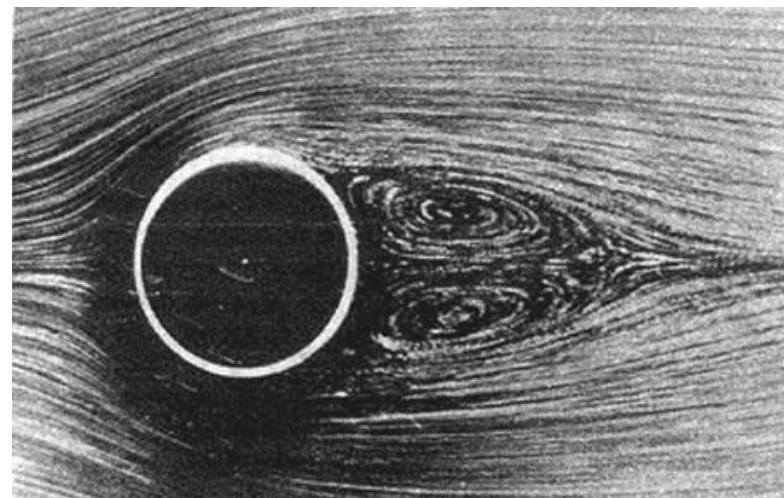
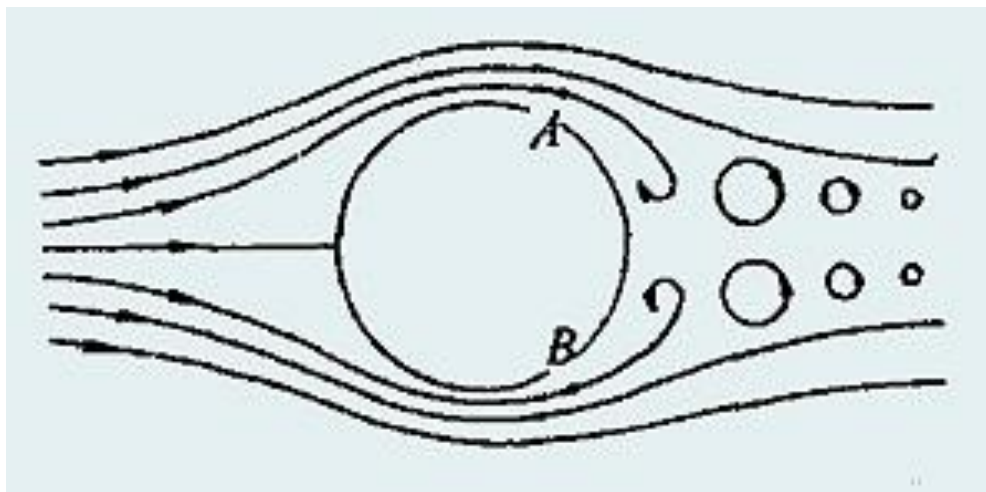


Турбулентное течение

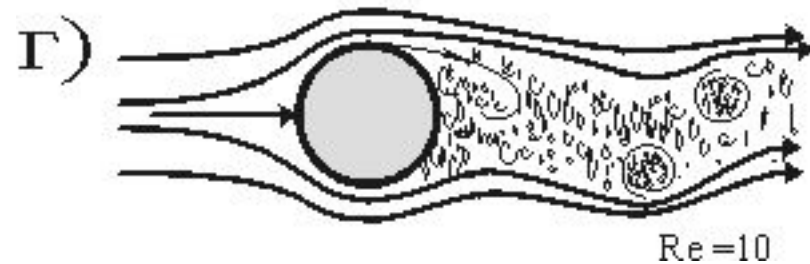
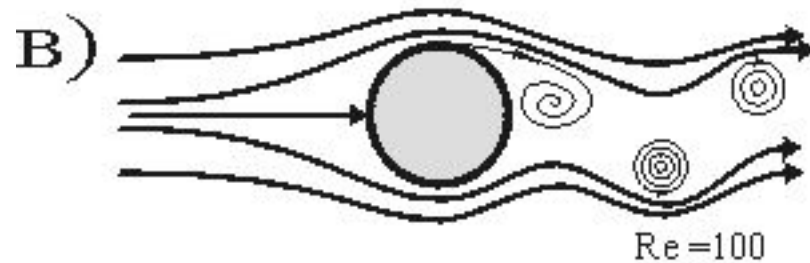
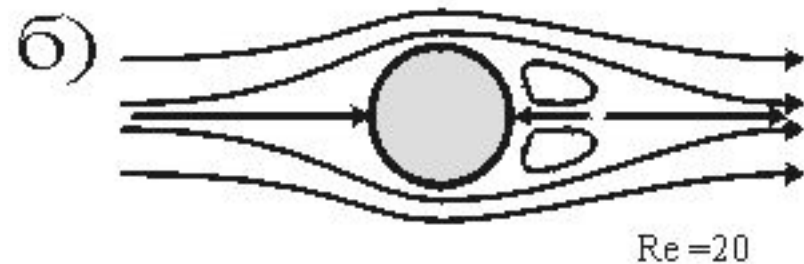
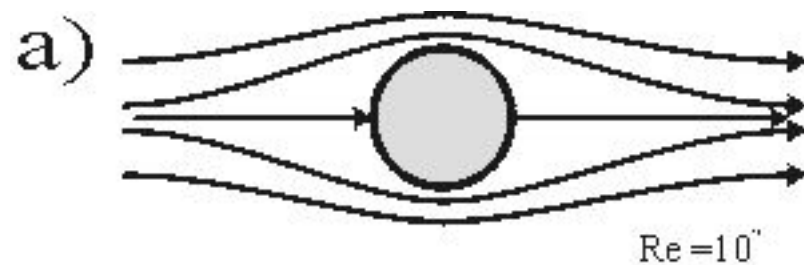
при котором возникает **энергичное перемешивание слоев**



Ламинарное и турбулентное течения



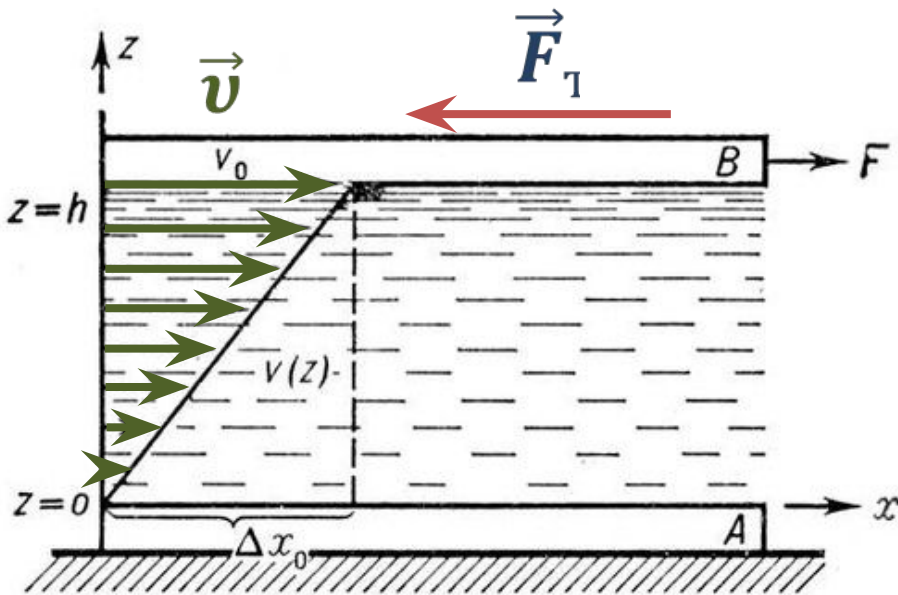
Ламинарное и турбулентное течения



Ламинарное течение

При ламинарном течении
модуль силы внутреннего трения
определяется
законом вязкого трения Ньютона

$$F_{\text{тр}} = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S$$



η – коэффициент внутреннего трения (вязкость)

S – площадь соприкасающихся слоев

модуль скорости по нормали к слоям – $\left| \frac{dv}{dx} \right|$

Вязкость

- **Вязкость** зависит от природы жидкости (газа) и для данной жидкости (газа) – от температуры
- **Вязкость газов** \ll (на несколько порядков), **чем жидкостей**

В газах

вследствие хаотического теплового движения молекулы переходят из слоя в слой, перенося с собой импульс упорядоченного движения слоев



выравнивание скоростей различных слоев газа

В жидкостях

одни слои увлекают (тормозят) другие в основном за счет сил межмолекулярного притяжения, **перенос импульса большой роли не играет**

Число Рейнольдса

- Характер течения жидкостей (газов) или обтекания тел средой определяется безразмерным **числом Рейнольдса**

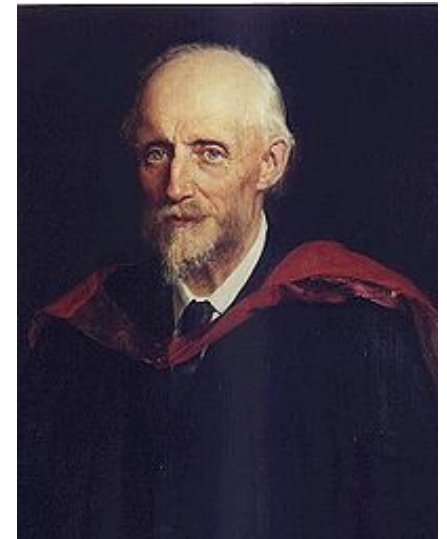
$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}$$

D – характерный размер обтекаемого тела,

v – скорость течения жидкости (газа),

ρ – плотность жидкости

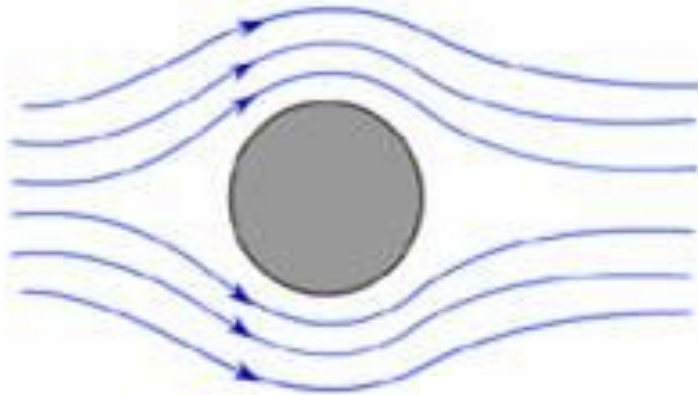
- При **малых** значениях числа Re течение среды – **ламинарное**
- При **больших** – **турбулентное** (для малых шариков $Re_{кр} = 10$)
- **Число Re** служит также критерием подобия обтекания тел



Осборн Рейнольдс
(1842-1912)
Англия

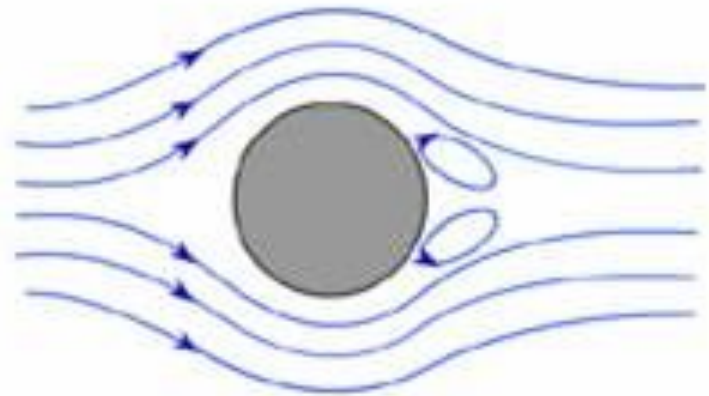
Число Рейнольдса

a



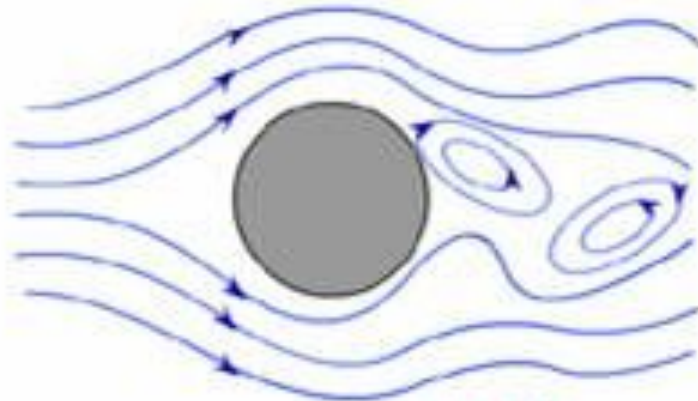
$Re = 10^{-2}$

b



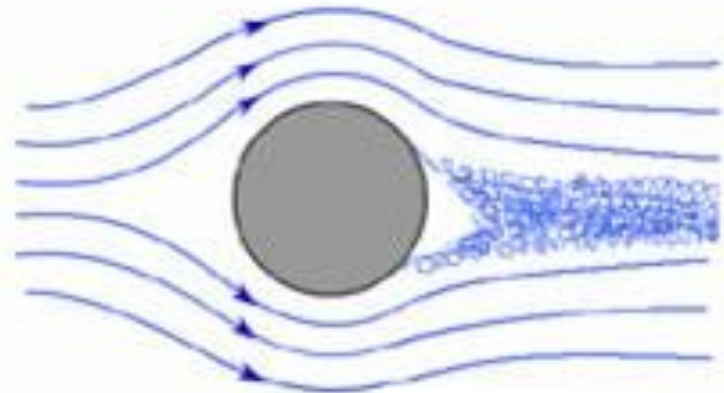
$Re = 20$

c



$Re = 200$

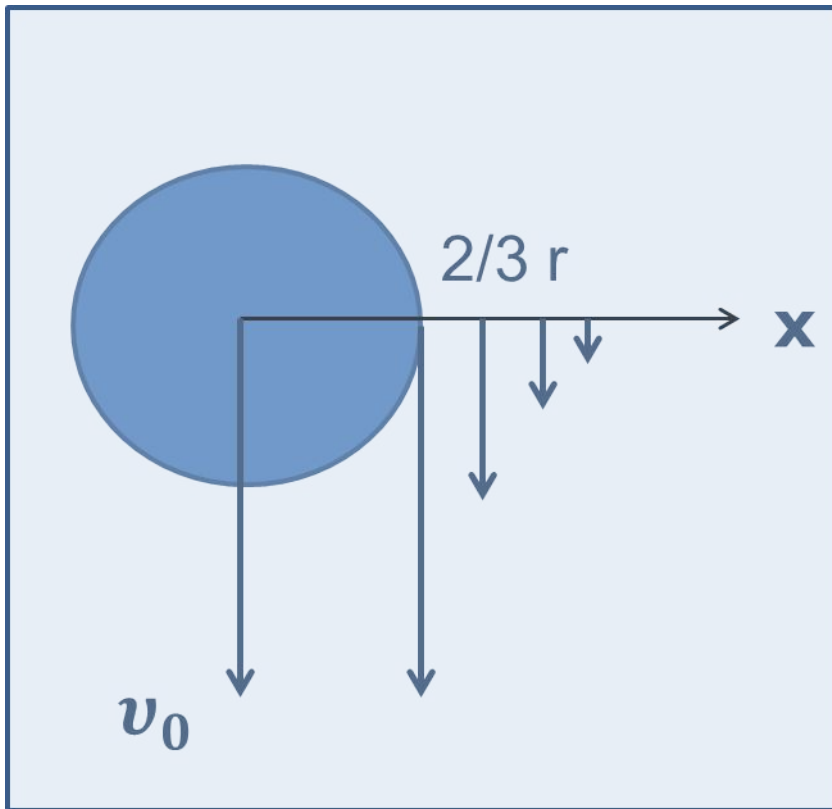
d



$Re = 1000$

Закон Стокса

Движение сферического тела
в безграничной среде
при малых значениях Re



$$\left| \frac{dv}{dx} \right| = \frac{3v_0}{2r}$$

$$S = 4\pi r^2$$

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v_0$$



Контрольные вопросы

1. Тело массой m подвешено на пружине жесткостью k в лифте, движущемся вверх
А) с постоянной скоростью V
Б) с ускорением a
В каком случае удлинение пружины больше и во сколько раз?
2. Чему равна сила трения?
А) Тело массой m покоится на наклонной плоскости с углом наклона β
Б) Тело соскальзывает с наклонной плоскости

Неинерциальные системы отсчета

Движение в неинерциальных СО

Если система отсчета движется с ускорением, т.е. является **неинерциальной**, то законы Ньютона применять нельзя

$$\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \vec{v}t$$

Индексы:

1 – в неподвижной СО

2 – в ускорено движущейся СО

$$\frac{d\vec{r}_2}{dt} = \frac{d\vec{r}_1}{dt} + \vec{v}$$

$$\Rightarrow \vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}$$

$$\frac{d\vec{v}_2}{dt} = \frac{d\vec{v}_1}{dt} + \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\Rightarrow \vec{a}_2 = \vec{a}_1 + \vec{A}$$

Ускорение СО

Для поступательного движения в неинерциальной СО ускорение **A** одинаково для всех точек пространства

Силы инерции

- Воспользоваться **законами Ньютона в неинерциальной СО можно**, если ввести **силы инерции**

$$\vec{F}_{\text{инерции}} = -m\vec{A}$$

Силы инерции:

- **фиктивны** – обусловлены не взаимодействием тел, а свойствами самих неинерциальных систем отсчета (ускоренным движением СИ, ее неинерциальностью)
- **всегда являются внешними по отношению к любому движению системы материальных тел**
- Движения тела под действием сил инерции аналогично движению во внешнем силовом поле
- **На силы инерции законы Ньютона не распространяются** (невыполним закон действия и противодействия)

II з-н Н в неинерциальной СО: $m\vec{a}_2 = m\vec{a}_1 - m\vec{A}$

вектор ускорения - \vec{a}

относительно

инерциальной системы

$$m\vec{a}_2 = \vec{F} + \vec{F}_{\text{инерции}}$$

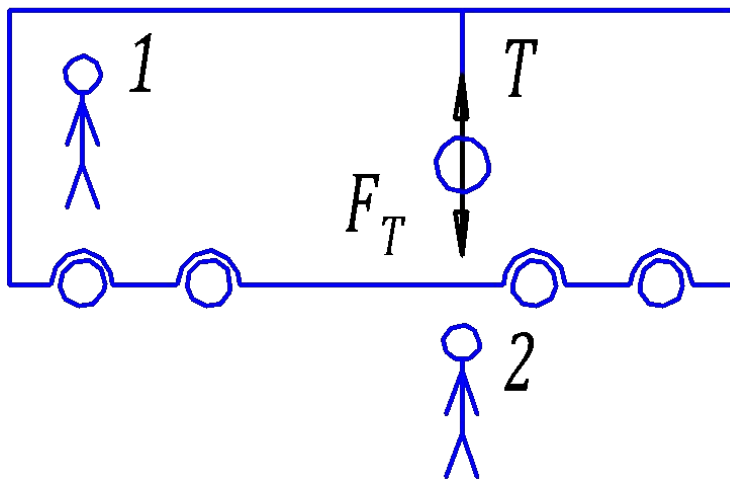
Силы инерции

$$\vec{T} + \vec{F}_T = \mathbf{0}$$

$$ma = 0$$

$$F_T = T$$

$$v=0$$



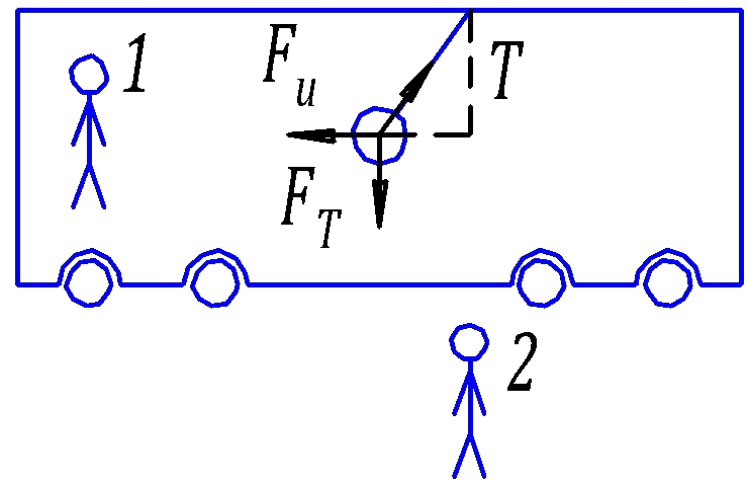
$$\vec{F}_u + \vec{T} + \vec{F}_T = \mathbf{0}$$

$$F_u = T \cos \alpha$$

$$ma = T \cos \alpha$$

$$F_T = T \sin \alpha$$

$$a$$



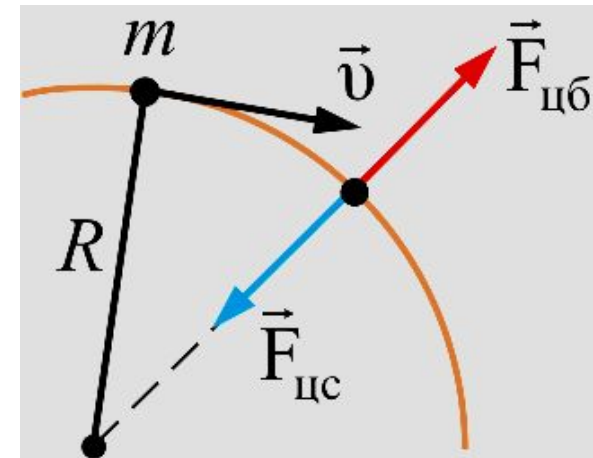
Центростремительная и центробежная силы

Рассмотрим вращение камня массой m на веревке

- В каждый момент времени камень должен был бы двигаться прямолинейно по касательной к окружности
- Однако он связан с осью вращения веревкой
- Веревка растягивается, появляется упругая сила, направленная вдоль веревки к центру вращения – **центростремительная сила**
- Сила, же приложенная к связи и направленная по радиусу от центра называется **центробежной**

$F_{\text{цс}}$, приложенной к вращающемуся телу, НЕ существует

$$\vec{F}_{\text{цс}} = -\vec{F}_{\text{цб}}$$



При вращении Земли вокруг оси в качестве центростремительной силы выступает сила гравитации

$$\vec{F}_{\text{цс}} = m\vec{a}_{\text{цс}}$$

$$F_{\text{цс}} = m \frac{v^2}{R}$$

Центробежная сила

Тело движется по окружности

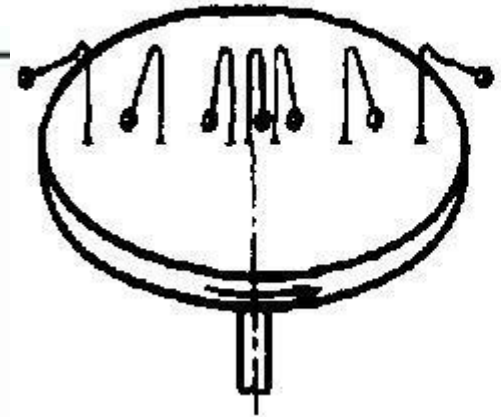
ИСО:

Вращающаяся СО:

центробежная
сила инерции

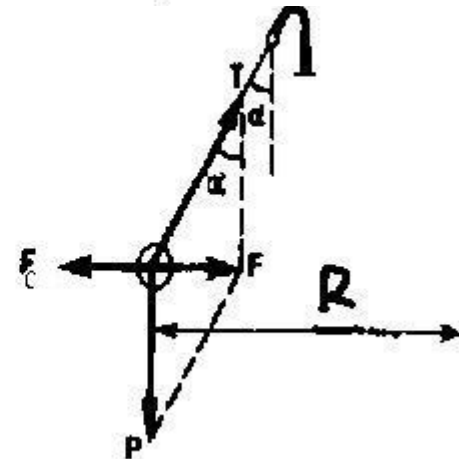
$$a_n = -\omega^2 R \quad F_{\text{цб}} = m\omega^2 R = m \frac{v^2}{R}$$

Проезд поворотов

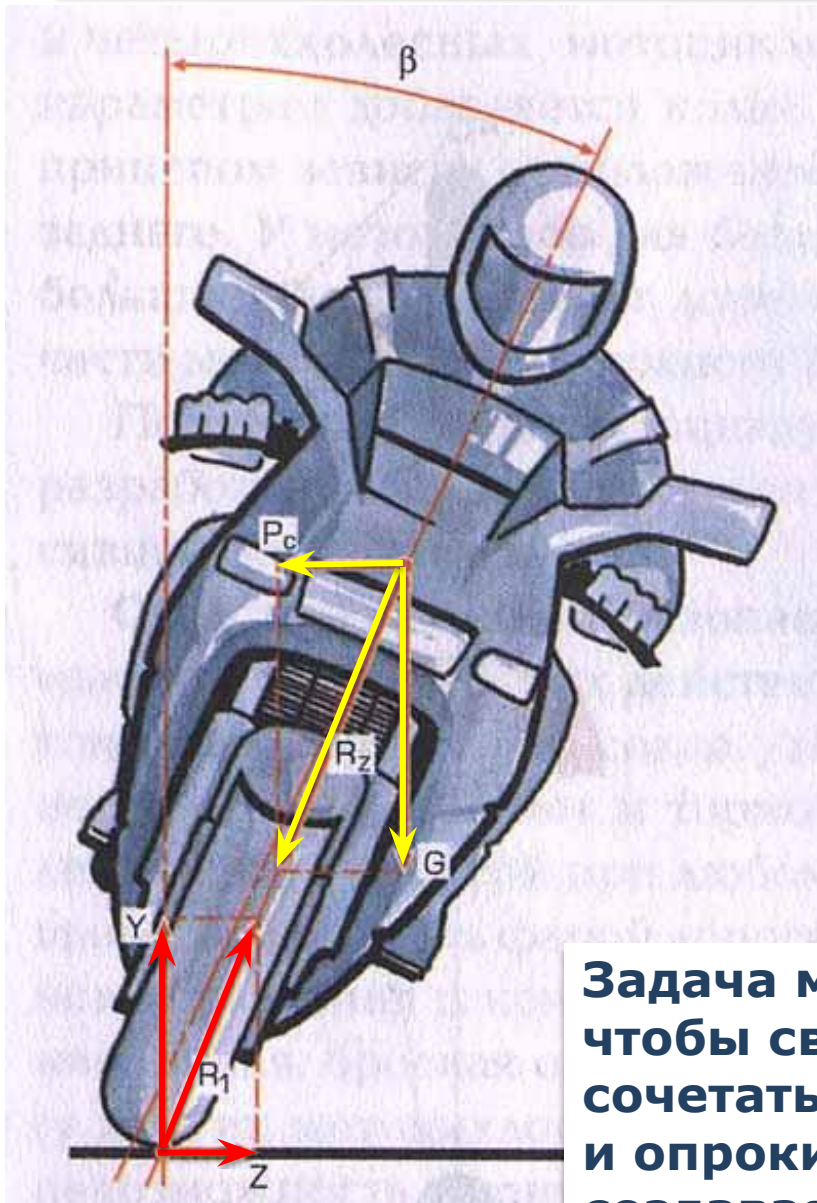


Шины сплющиваются, рессоры сжимаются, подвеска частично кратковременно поглощает $F_{\text{ц}}$, сцепление всех колес с дорогой сохраняется

Эластичность узлов подвески использована, сцепление колес с дорогой нарушается – машину может занести



Пример действия центробежной силы



Силы, действующие на мотоцикл при повороте:

- Y - вертикальная составляющая опорной реакции колеса
- Z - поперечная составляющая опорной реакции колеса
- R_1 - результирующая опорной реакции колеса
- R_z - результирующая центробежной силы и веса мотоцикла
- G - вес мотоцикла с водителем
- P_c - центробежная сила
- β - угол наклона мотоцикла

Задача мотоциклиста сводится к тому, чтобы своими действиями вовремя сочетать влияние удерживающего и опрокидывающего моментов, создавая желаемую траекторию и скорость

Пример решения задачи

Рассчитать, какую максимальную скорость может развить машина в повороте с радиусом R метров при коэффициенте трения μ , чтобы «вписаться» в этот поворот

Сила трения должна уравновесить центробежную силу:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{цб}}$$

$$F_{\text{тр}} = \mu mg$$

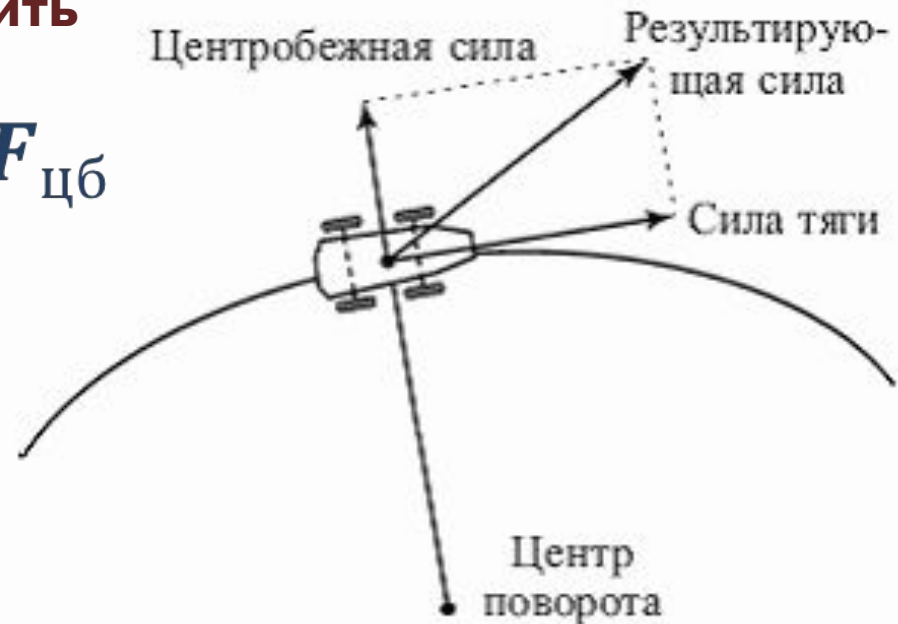
$$F_{\text{цб}} = m \frac{v^2}{R}$$



$$\mu mg = m \frac{v^2}{R}$$



$$v = \sqrt{\mu g R}$$



Скорость
НЕ зависит!
от массы!

Пример учета центробежной силы

Повороты на шоссе с наклоном внутрь поворота проходить «легче», т.е. можно проходить с большей скоростью

Силы действующие на автомобиль

(без учета сил трения):

центробежное ускорение компенсируется только горизонтальной составляющей $F_{\text{тяж}}$:

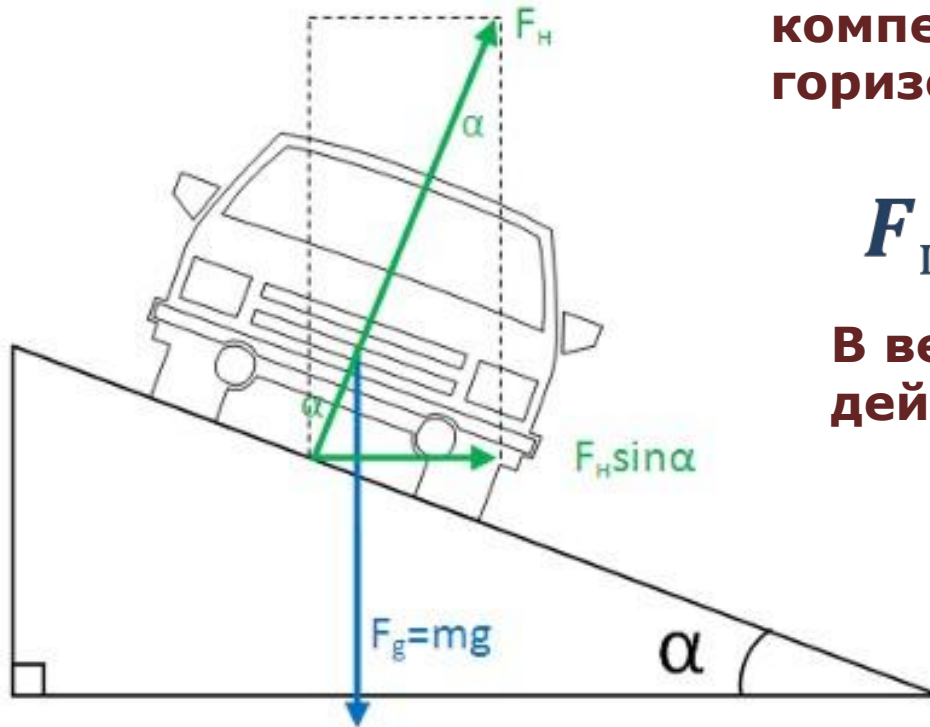
$$F_{\text{цб}} = m \frac{v^2}{R} = N \sin \alpha$$

В вертикальном направлении действует

$$F_{\text{тяж}} = mg$$

она уравнивается вертикальной составляющей нормальной силы:

$$mg = N \cos \alpha$$

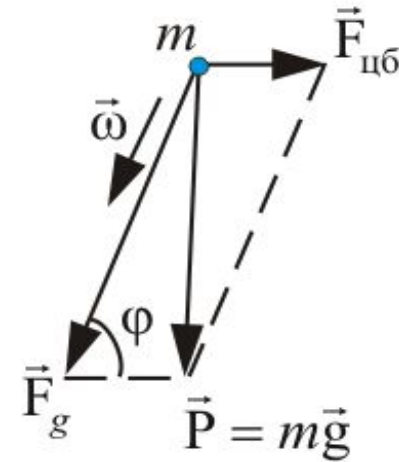
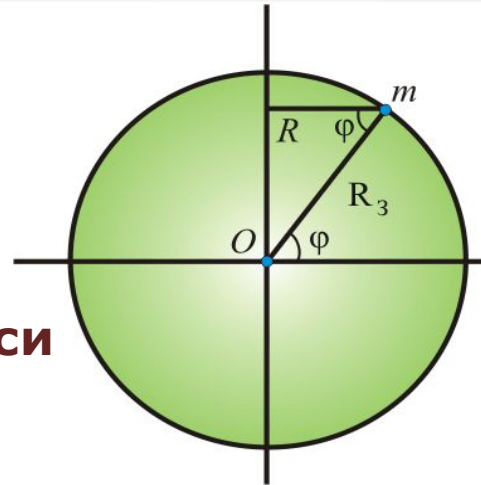


$$\Rightarrow F_{\text{цб}} = mg \cdot \operatorname{tg} \alpha \Rightarrow \alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{v^2}{gR} \right)$$

Учет центробежной силы

необходимо учитывать
различия в силе тяжести
на поверхности Земли

Земля вращается вокруг своей оси



с Землей можно связать
неинерциальную СО



ускорение свободного падения g
различно на экваторе, полюсах и
на различных широтах

Земля за 1 сутки = 86400 с
поворачивается на угол 2π

$$R_3 = 6,38 \cdot 10^6 \text{ м}$$



$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{86400} = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$$

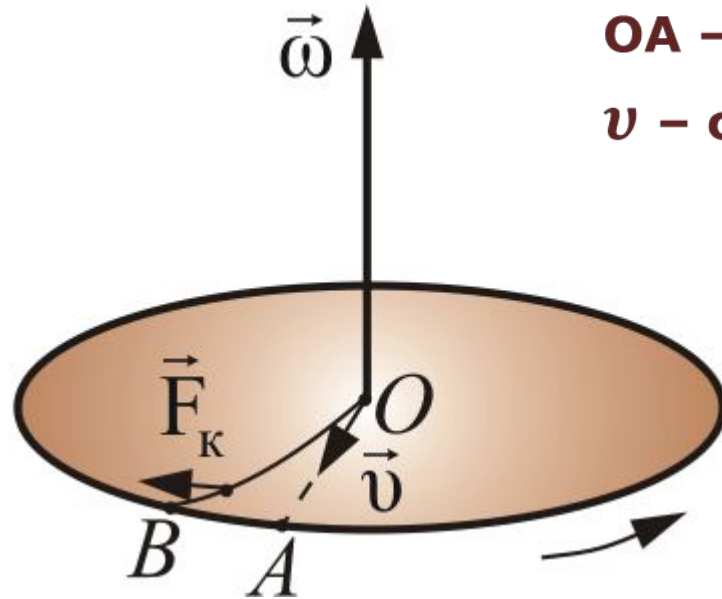


на экваторе для тела массой m :

$$F_{\text{цб}} = \frac{1}{291} mg$$

Сила Кориолиса

- При движении тел относительно вращающейся СО, кроме центробежной силы инерции, появляется еще одна сила – **сила Кориолиса**



OA – радиальная прямая

v – скорость шарика от O к A

Диск не вращается:

шарик катится **вдоль OA**

Диск вращается по стрелке:

шарик катится **по кривой OB**

➡ по отношению к вращающейся СИ шарик ведет себя так, как если бы на него действовала сила, перпендикулярная направлению движения шарика – **сила Кориолиса**

$$\vec{F}_K = 2m[\vec{v}, \vec{\omega}]$$

- возникает когда тело изменяет свое положение по отношению к вращающейся СО
- максимальна, когда угол между ... 90°

Гаспар-Гюстав Кориолис

- Французский математик, механик и инженер
- Также известен теоремой об ускорениях в абсолютном и относительном движениях, называемой теорема Кориолиса
- Окончив Политехническую школу (1808), а затем (1812) Школу мостов и дорог (фр.), некоторое время работал на стройках
- 1835 год считается годом появления теоремы Кориолиса в ее общем виде

Gaspard-Gustave
de Coriolis



1792-1843
Франция

Примеры проявления силы Кориолиса

При свободном падении тел

- действие силы Кориолиса приводит к отклонению тел к востоку
- максимальна на экваторе и равна нулю на полюсах

При движении на север

- в северном полушарии – тело отклоняется к востоку
- в южном полушарии – к западу

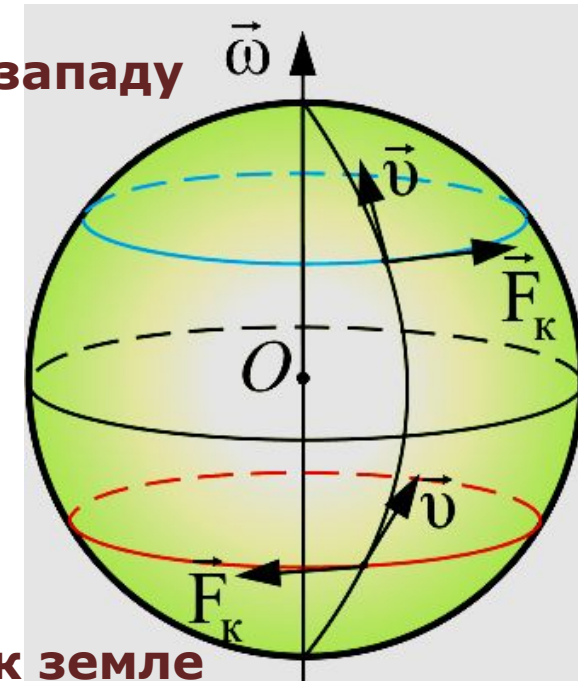
При движении на юг

- в северном полушарии – тело отклоняется к западу
- в южном полушарии – к востоку

- ⇒
- у рек подмывается всегда правый берег в северном полушарии и левый – в южном
 - неодинаковый износ рельсов при двухколейном движении

При движении вдоль экватора

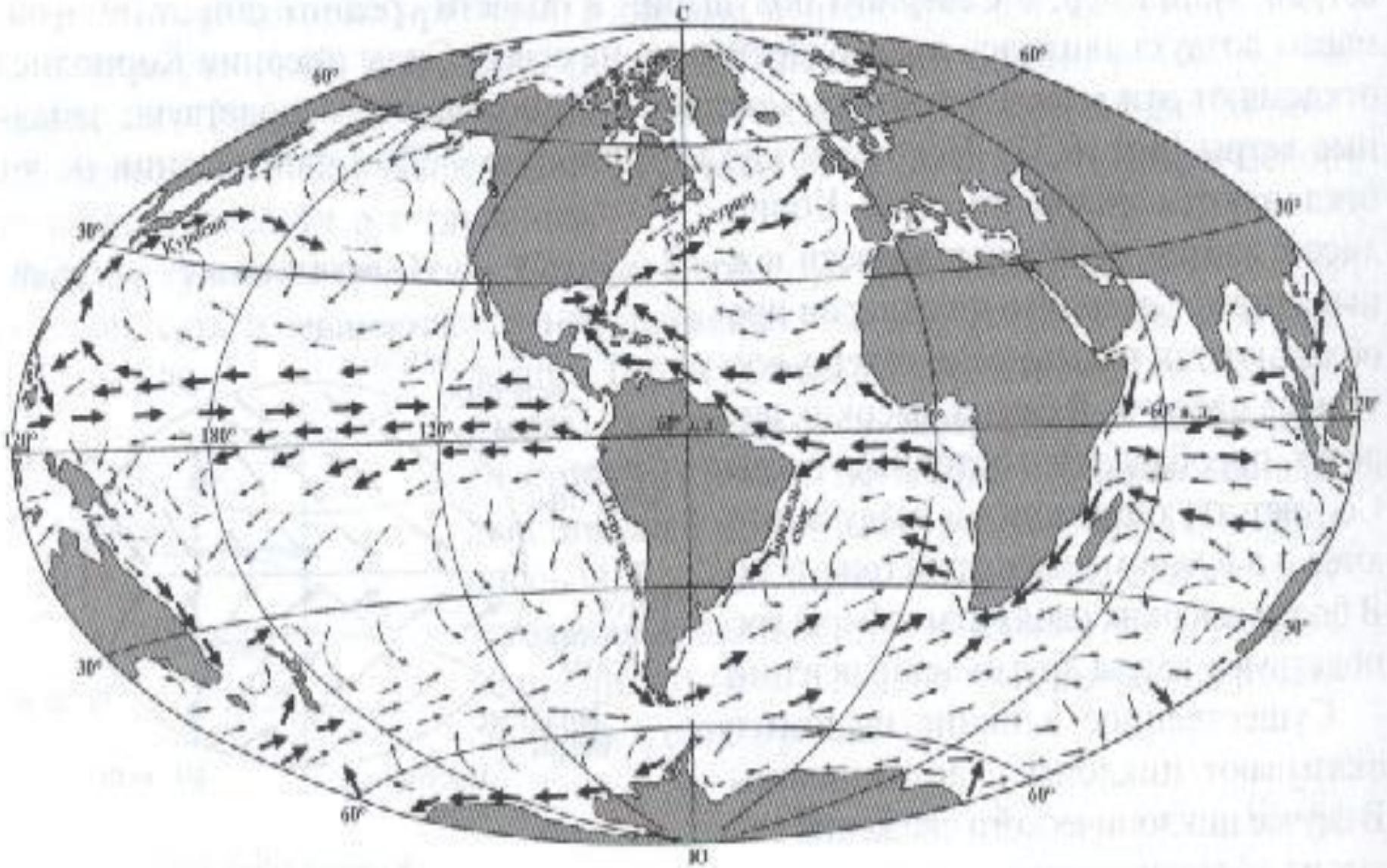
- при движении на запад – прижимают тело к земле
- при движении на восток – поднимают его вверх



Влияние силы Кориолиса на движение воздушных масс

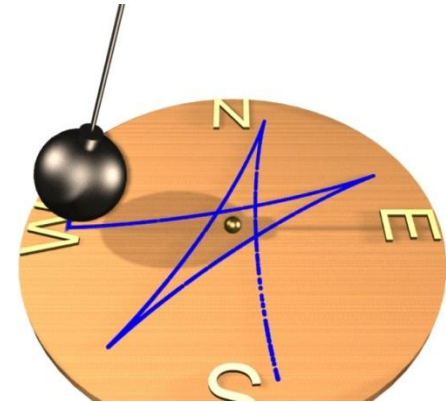


Влияние силы Кориолиса на океанские течения



Примеры проявления силы Кориолиса

- На северном полюсе сила Кориолиса все время направлена вправо по ходу маятника, на южном – влево
- В итоге траектория имеет вид розетки
- Плоскость качания маятника поворачивается относительно Земли в направлении часовой стрелки
- На полюсе за сутки она совершает один полный оборот, на широте ϕ плоскость качания поворачивается на $2\pi\sin\phi$



Сила Архимеда

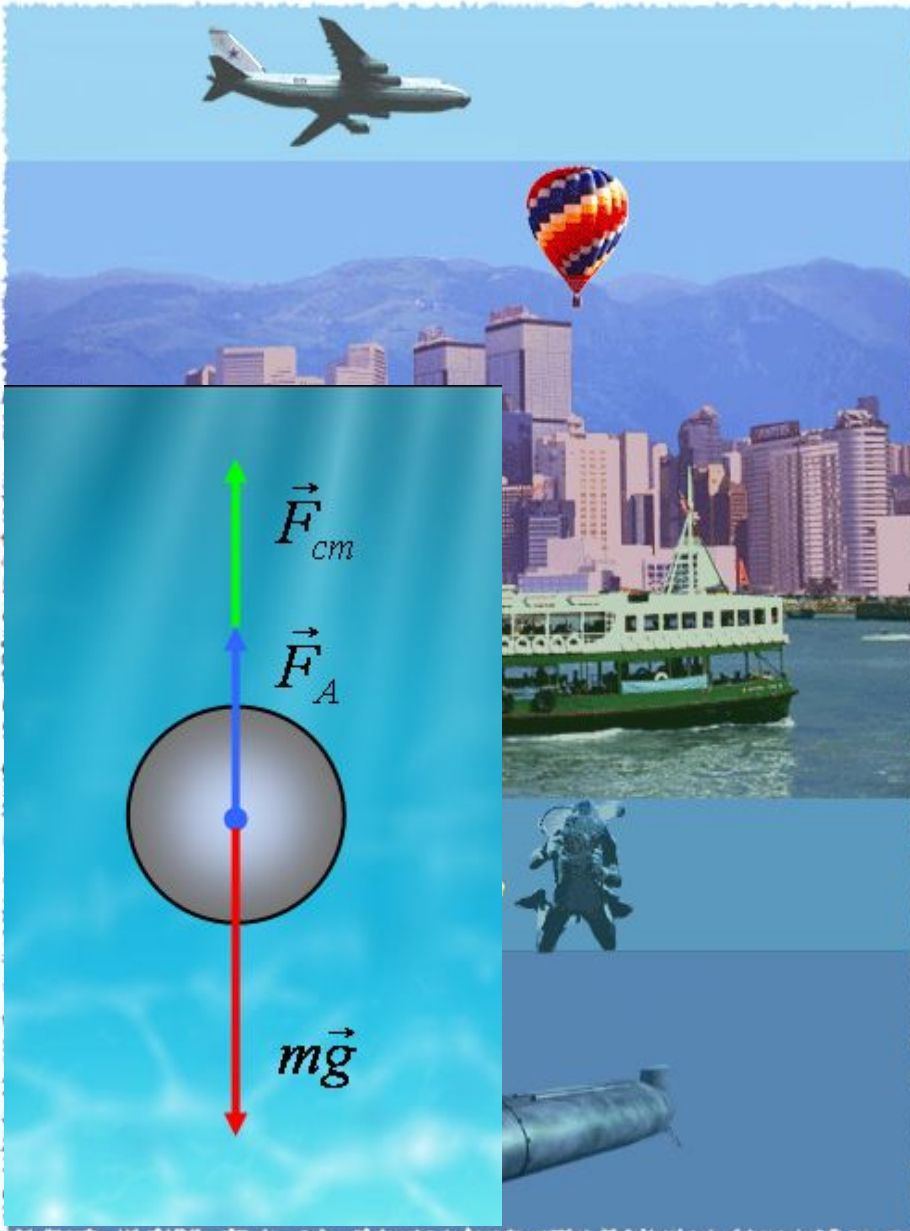
Выталкивающая
(архимедова) сила

равнодействующая
сил давления,
действующих со всех сторон
на погруженное в жидкость
(или газ) тело

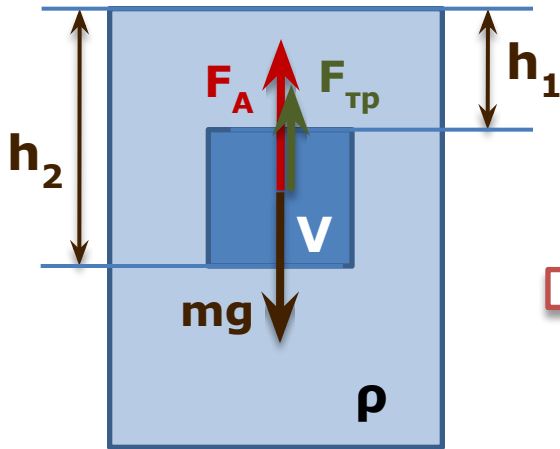
Закон Архимеда

На погруженное в жидкость
(или газ) тело действует сила,
равная весу вытесненной воды

$$F_{\text{Ас}} = \rho_{\text{погр}} g V$$



Сила Архимеда



$$P = \rho gh$$



$F_{\text{давл}}$
на нижние
слои

>

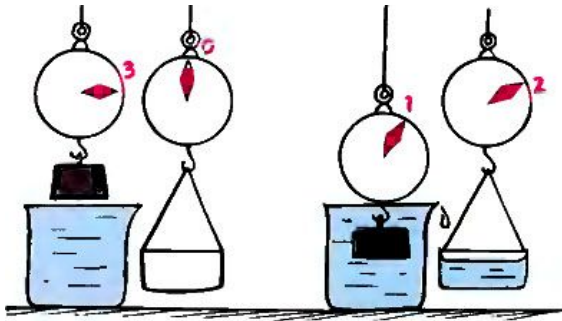
$F_{\text{давл}}$
на верхние
слои

закон Архимеда



на тело, погруженное в жидкость (или газ), со стороны жидкости (газа) действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости (газа)

$$F_A = \rho g V$$



$$P_1 = \rho gh_1$$



$$\Delta P = \rho g (h_2 - h_1)$$

$$P_2 = \rho gh_2$$

$$\Delta F = \Delta P S = \rho g V$$

В состоянии невесомости F_A НЕ существует !

1. $P_{\text{тела}} = F_A$

тело плавает
внутри жидкости

2. $P_{\text{тела}} > F_A$

тело тонет

3. $P_{\text{тела}} < F_A$

тело
всплывает

плоты, суда,
воздушные
шары и др.

$$F_A - P_{\text{тела}} = F_{\text{подъемная}}$$