Сегодня *

Физические основы механики

Кузнецов Сергей Иванович
доцент кафедры ОФ ЕНМФ ТПУ

Тема 4. СИЛЫ В МЕХАНИКЕ

4.1. Виды и категории сил в природе

Одно из простейших определений силы: *влияние одного тела (или поля) на другое, вызывающее ускорение – это* ***сила.***

Однако, спор вокруг определения силы не закончен до сих пор – это обусловлено трудностью объединения *в одном определении* сил, различных по своей природе и характеру проявления.

В настоящее время, различают ***четыре типа сил*** *или* ***взаимодействий***:

- **гравитационные;**
- **электромагнитные;**
- **сильные (ответственное за связь частиц в ядрах) и**
- **слабые** (ответственное за распад частиц)

Виды фундаментальных взаимодействий:

1. Гравитационное

- Присуще всем материальным объектам.
- Определяется наличием у тел массы
- Подчиняется закону всемирного тяготения Ньютона
- Имеет неограниченный радиус действия. В области микромира роль гравитационного взаимодействия ничтожно мала.

2. Слабое

- Приводит к определенному виду нестабильности элементарных частиц.
- Имеет ограниченный радиус действия
- Существенно только в области микромира.

3. Электромагнитное

- Возникает между телами, имеющими электрический заряд.
- Две составляющие: электрическая и магнитная.
- Неограниченный радиус действия.
- Образование атомов, молекул, макроскопических тел.

4. Ядерное или сильное взаимодействие

- Имеет конечный (~ 10^{-15} м) радиус действия
- Существенно только в микромире.

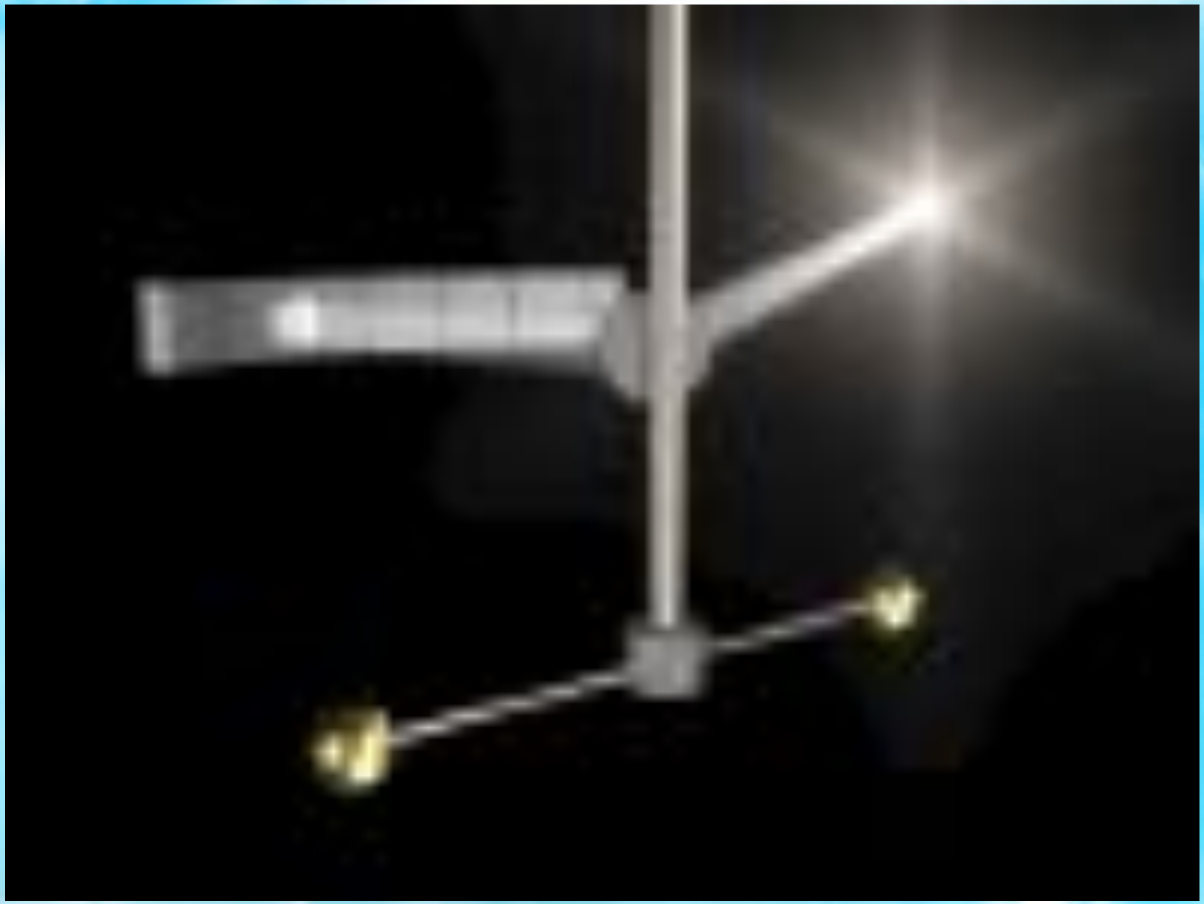
Если условно принять интенсивность сильного взаимодействия за 1, то интенсивность электромагнитного взаимодействия будет 10^{-2}, слабого взаимодействия 10^{-13}, а гравитационного 10^{-40}.

Гравитационные и электромагнитные силы нельзя свести к другим, более простым силам, поэтому их называют **фундаментальными**.

Законы фундаментальных сил просты и выражаются точными формулами. Для примера можно привести формулу гравитационной силы взаимодействия двух материальных точек, имеющих массы m_1 и m_2:

$$\boxed{F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2},} \qquad (4.1.1)$$

где *r* – расстояние между точками, $\boxed{\gamma}$ – гравитационная постоянная.



В качестве второго примера можно привести формулу для определения силы электростатического взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2

$$\boxed{F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2},} \qquad (4.1.2)$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц.

Как видно, формулы для фундаментальных сил являются простыми и точными.

Для других сил, например, для упругих сил и сил трения можно получить лишь приближенные, эмпирические формулы.

I. Силы

$$\boxed{\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(m\vec{v}\right) = m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}}$$

- Силы трения
- Силы тяготения (гравитационные силы)
- Силы тяжести (вес тела)
- Силы упругости

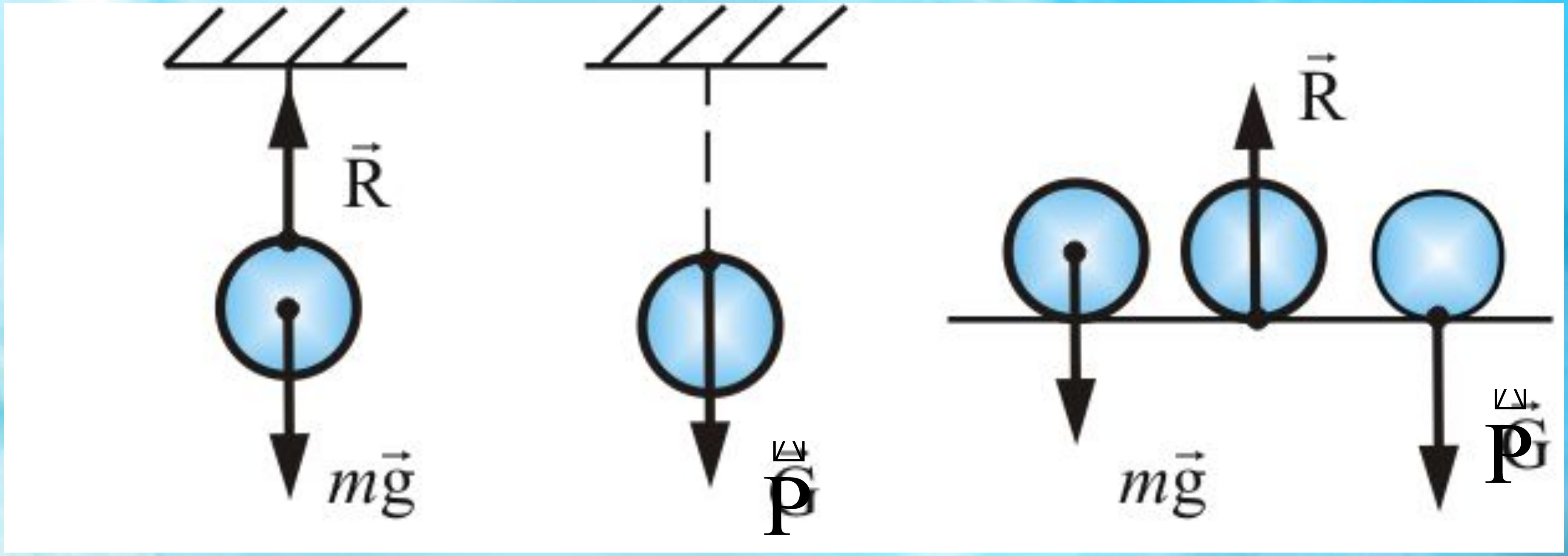
4.2. Сила тяжести и вес тела

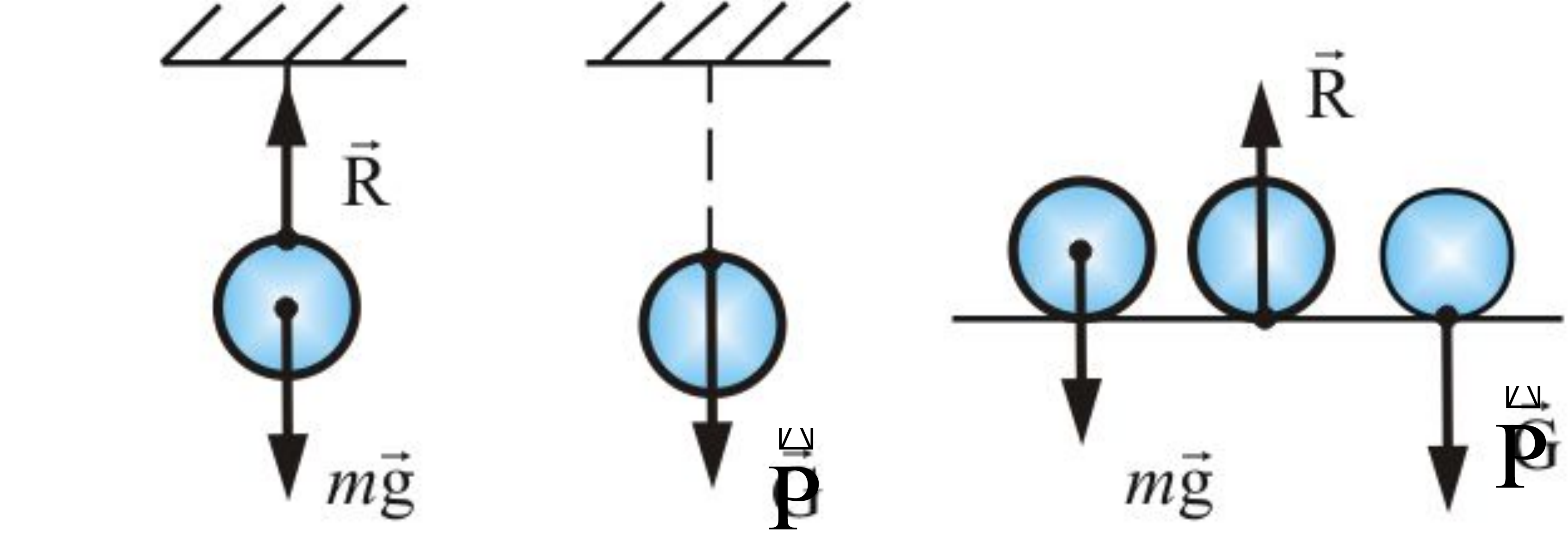
Одна из фундаментальных сил – сила гравитации проявляется на Земле в виде ***силы тяготения*** *– сила, с которой все тела притягиваются к Земле.*

Вблизи поверхности Земли все тела падают с одинаковым ускорением – *ускорением свободного падения g*, (вспомним школьный опыт – «трубка Ньютона»). Отсюда вытекает, что в системе отсчета, связанной с Землей, на всякое тело действует сила тяжести $\boxed{m\vec{g}}$

Она приблизительно равна силе гравитационного притяжения к Земле (различие между силой тяжести и гравитационной силой обусловлено тем, что система отсчета, связанная с Землей, не вполне инерциальная).

Если подвесить тело или положить его на опору, то **сила тяжести** $m\vec{g}$ уравновесится силой, которую называют ***реакцией опоры или подвеса*** $\vec{R}$ или $\vec{N}$



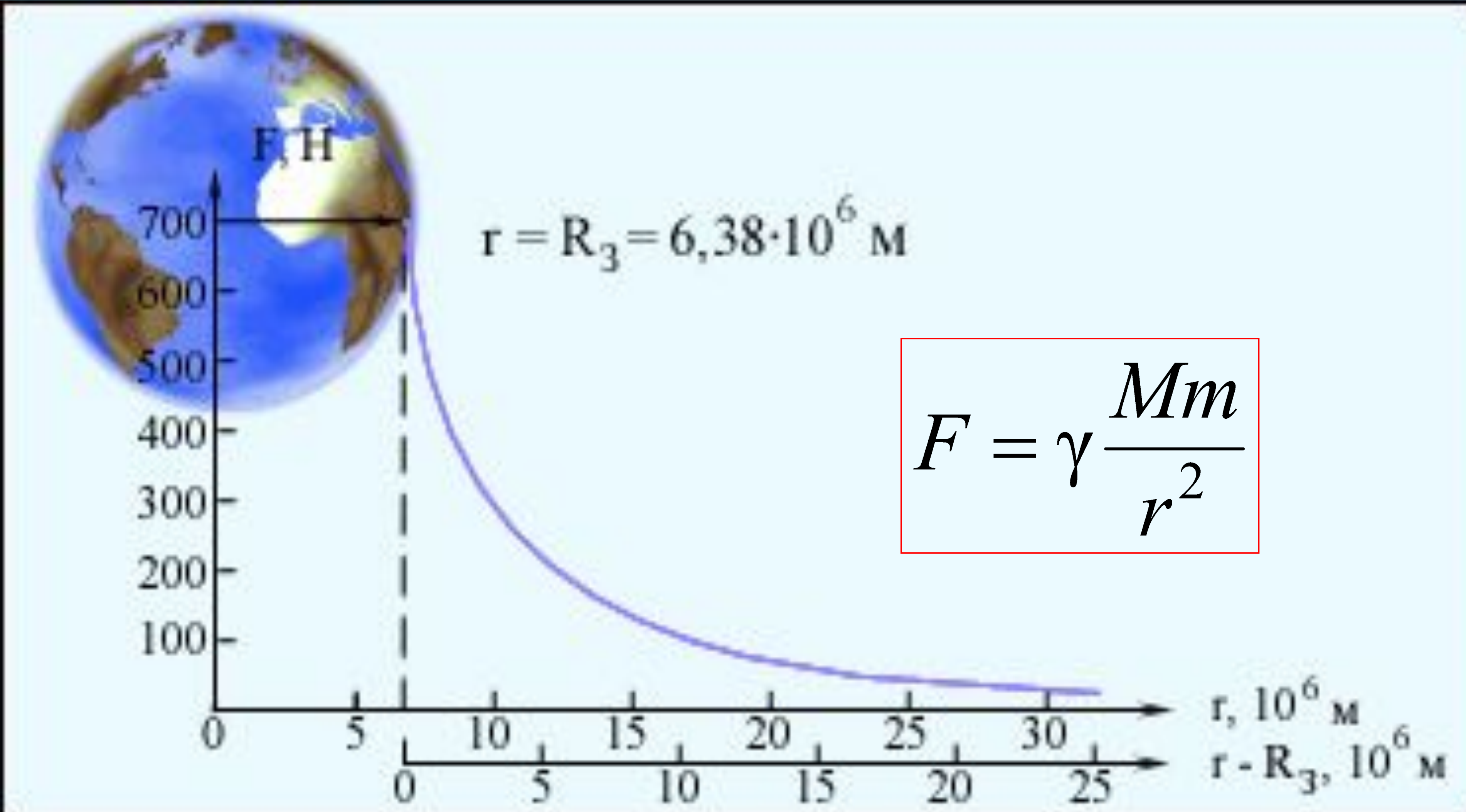


По третьему закону Ньютона тело действует на подвес или опору с *силой* $\vec{P}$ *которая называется* ***весом тела***. Поскольку силы $m\vec{g}$ и $\vec{R}$ уравновешивают друг друга, то выполняется соотношение

$$\boxed{m\vec{g} = -\vec{R}.}$$

Согласно третьему закону Ньютона: $\boxed{\vec{P} = -\vec{R}.}$

Значит $\boxed{\vec{P} = m\vec{g},}$



$$F = \gamma \frac{Mm}{r^2}$$

Âåñ òåëà.avi

то есть *вес и сила тяжести равны друг другу, но приложены к разным точкам: вес к подвесу или опоре, сила тяжести – к самому телу*. Это равенство справедливо, если подвес (опора) и тело покоятся относительно Земли (или двигаются равномерно, прямолинейно). Если имеет место движение с ускорением, то справедливо соотношение:

$$P = mg \pm ma = m(g \pm a). \qquad (4.2.2)$$

$$P = mg \pm ma = m(g \pm a).$$

Вес тела может быть больше или меньше силы тяжести: если g и a направлены в одну сторону (тело движется вниз или падает), то

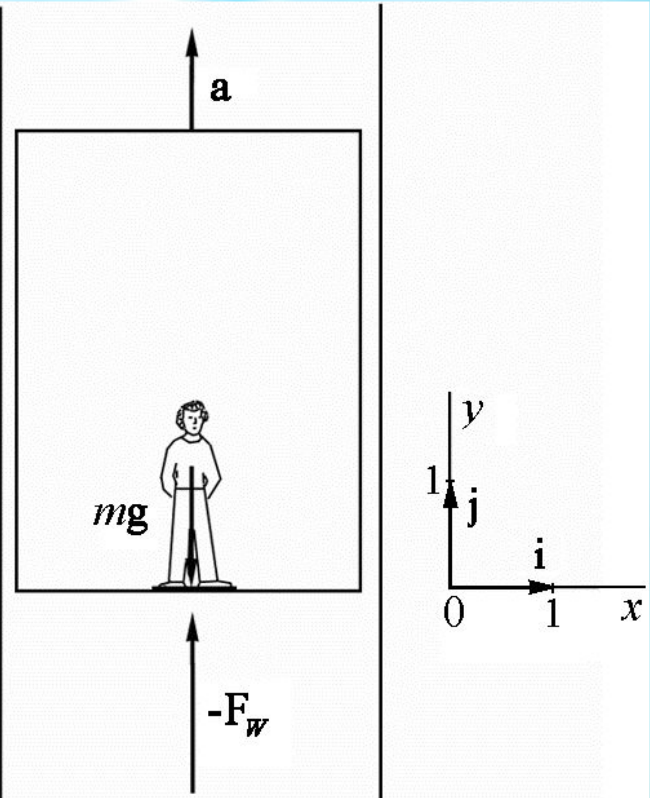
$$\boxed{P < mg}$$

и если наоборот, то $\boxed{P > mg}$

Если же тело движется с ускорением $\boxed{a = g}$ то $\boxed{P = 0}$ – т.е. наступает *состояние невесомости*.

Пример: космический корабль на орбите.

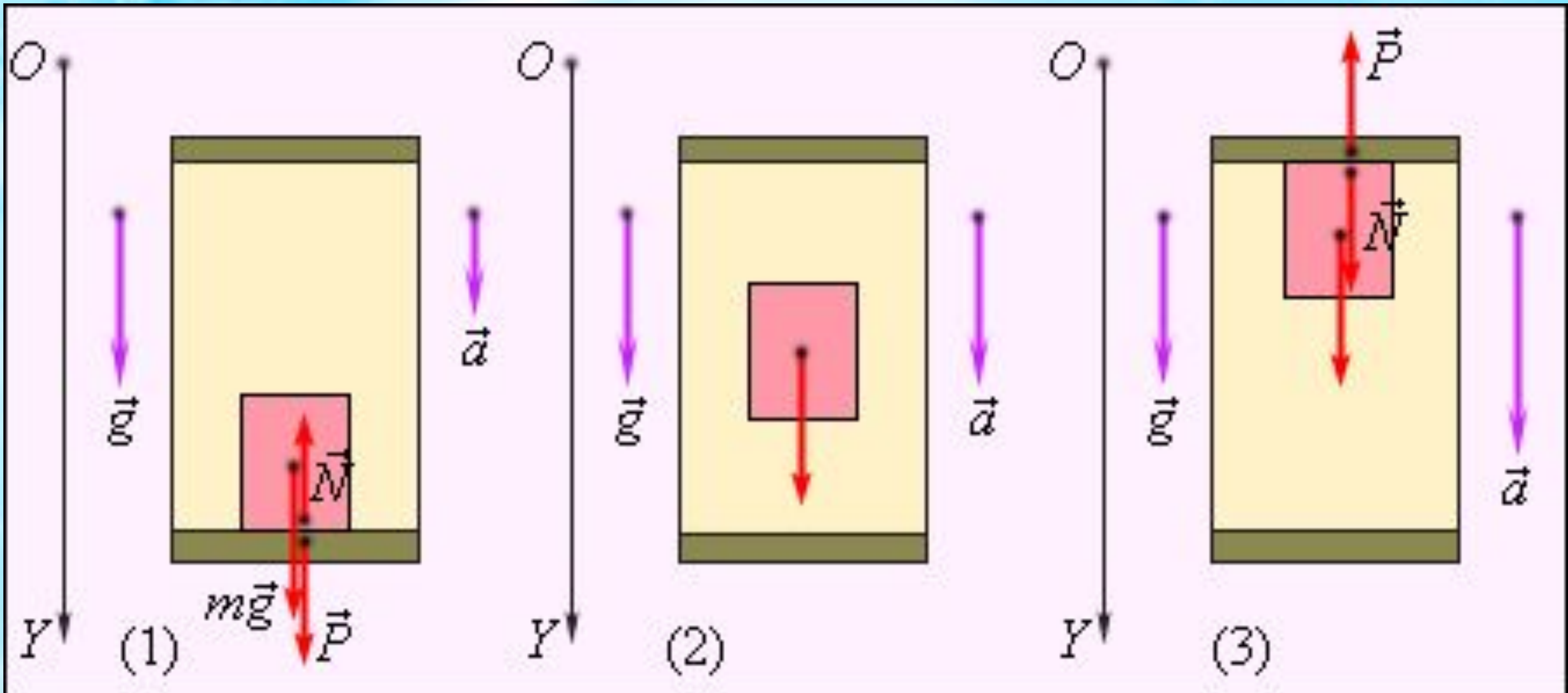
Следствием этого факта является то, что, *находясь внутри закрытой кабины невозможно определить, чем вызвана сила* *mg*, тем, что кабина движется с ускорением $a = g$ или действием притяжения Земли.



F = m(**g** – **a**).

В случае свободного падения лифта a = g и F = 0; иными словами, человек оказывается «невесомым».

$$ma = mg - N, \quad N = P, \quad m(g - a) = P$$



Вес тела в ускоренно движущемся лифте.

1) a < g, P < mg;

2) a = g, P = 0 (невесомость);

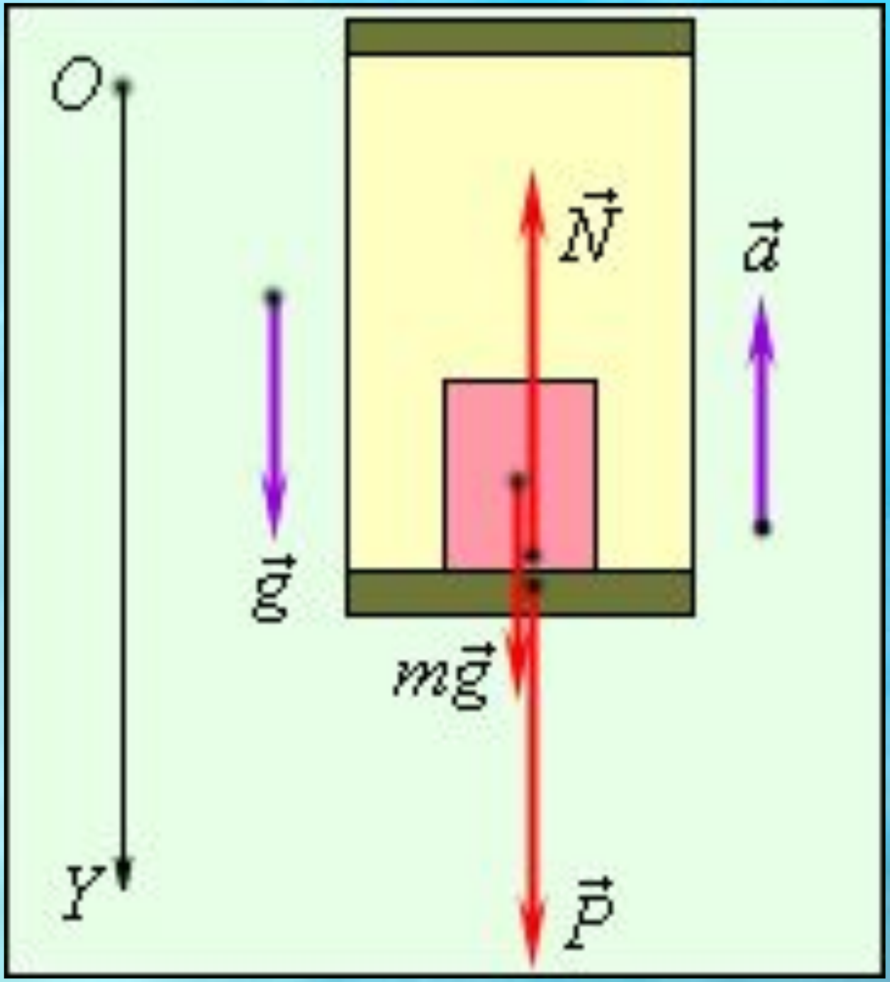
3) a > g, P < 0.

Вес тела в ускоренно движущемся лифте.

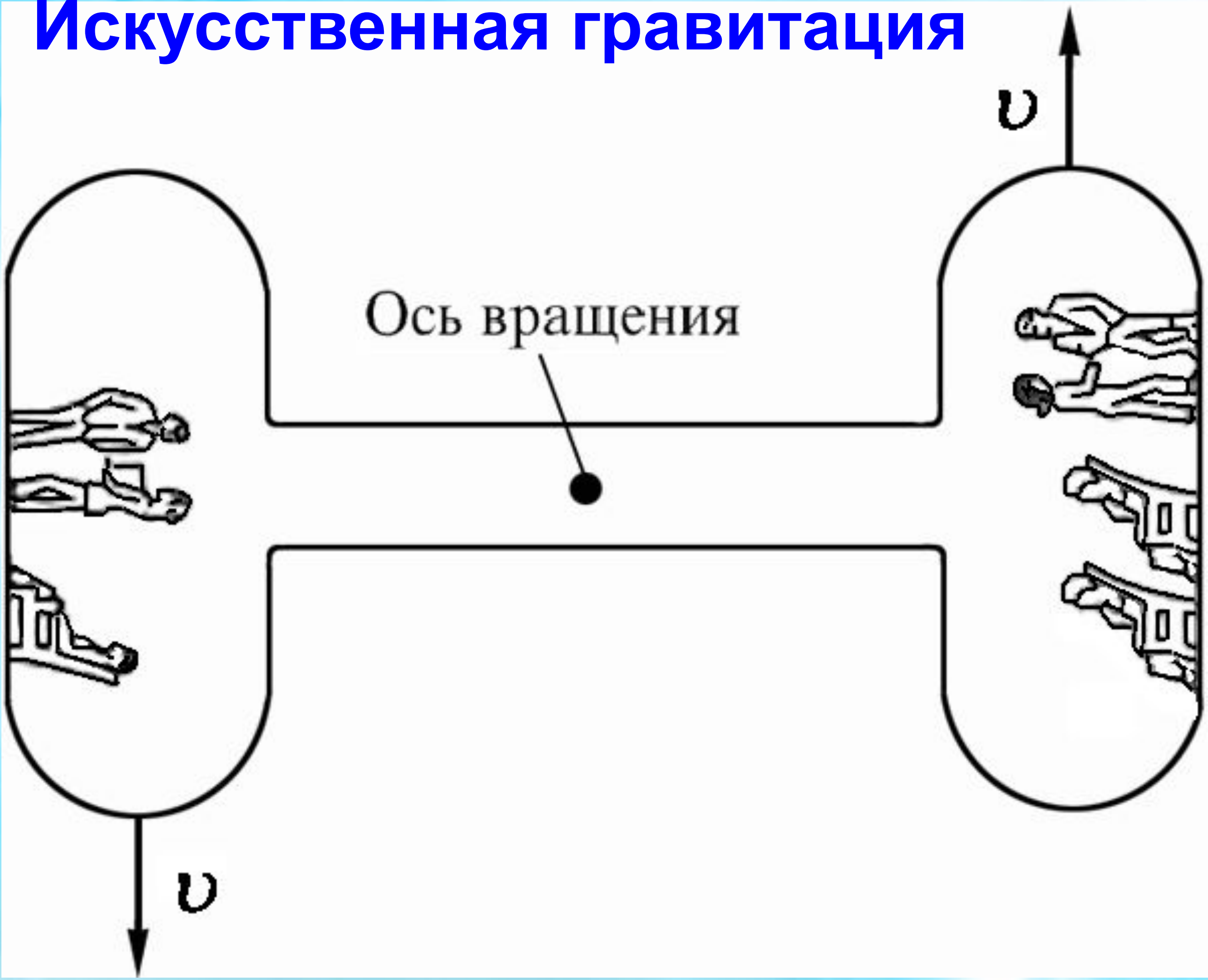
Вес тела в два раза превышает по модулю силу тяжести (двукратная перегрузка).

$$ma = -mg + N,$$

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



Искусственная гравитация



Пассажиры космического корабля, вращающегося с частотой всего 9,5 об/мин, находясь на расстоянии 10 м от оси вращения, будут чувствовать себя, как на Земле.

4.3. Упругие силы

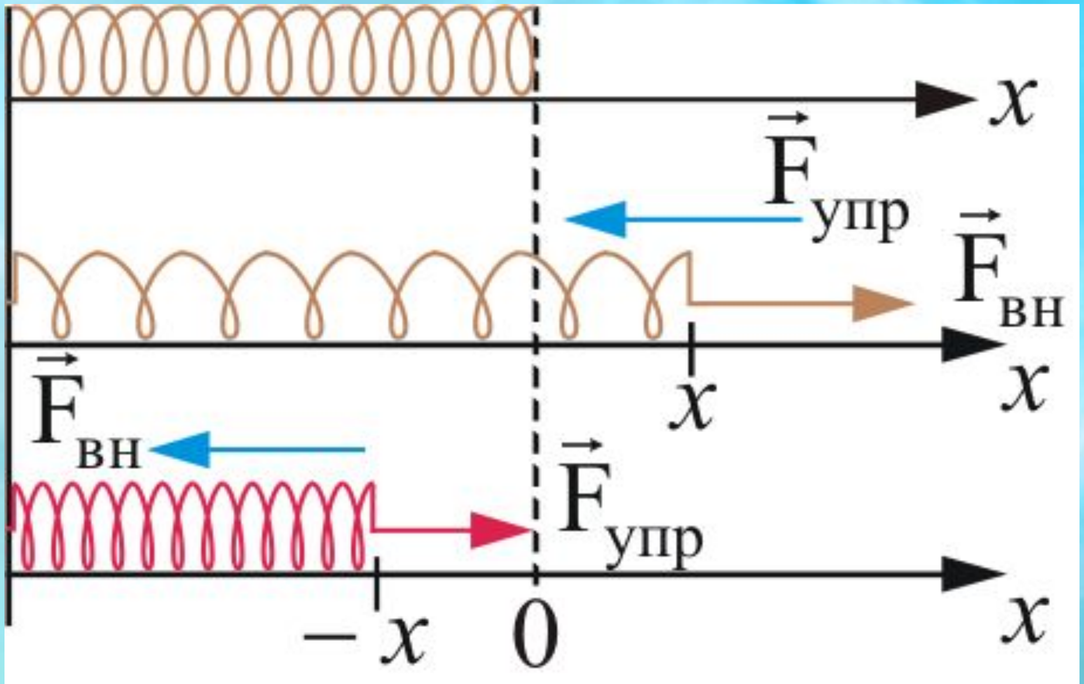
Электромагнитные силы проявляют себя как ***упругие силы и силы трения.***

Под действием внешних сил возникают ***деформации*** (т.е. изменение размеров и формы) тел. 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, которая называется ***пределом упругости.***

При превышении этого предела деформация становится **пластичной** **или** **неупругой**, т.е. первоначальные размеры и форма тела полностью не восстанавливается.

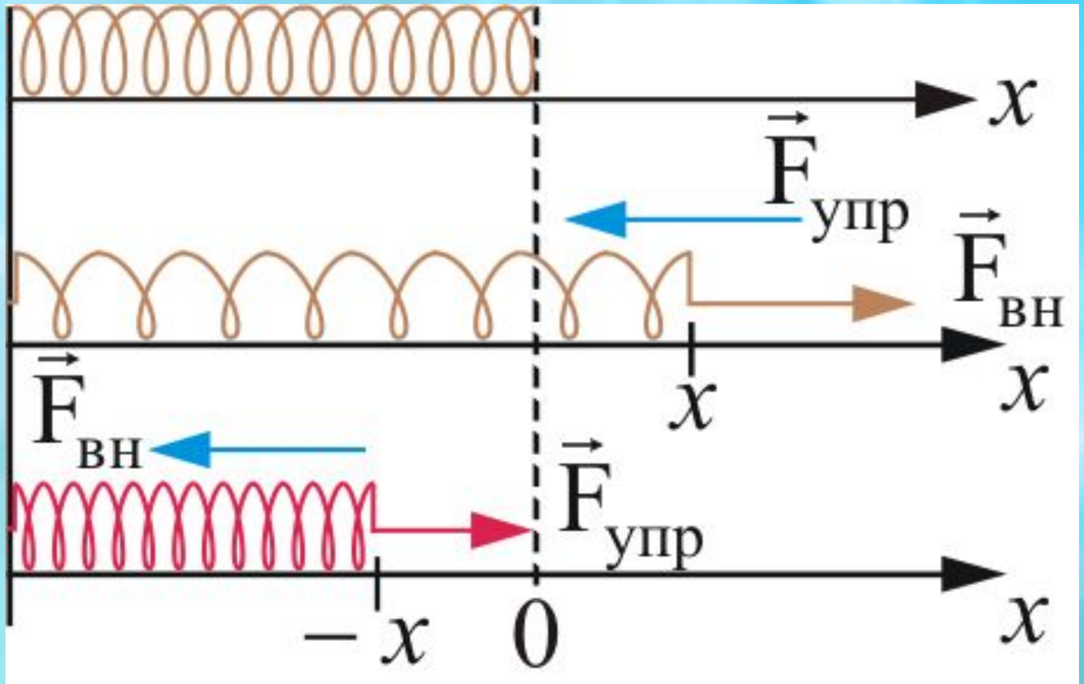
Рассмотрим упругие деформации.

В деформированном теле (рис) возникают упругие силы, уравновешивающие внешние силы.



Под действием *внешней силы* – $F_{вн}$. пружина получает *удлинение x*, в результате в ней возникает *упругая сила* – $F_{упр}$, *уравновешивающая* $F_{вн}$.

Упругие силы возникают во всей деформированной пружине. Любая часть пружины действует на другую часть с силой упругости $F_{упр}$.

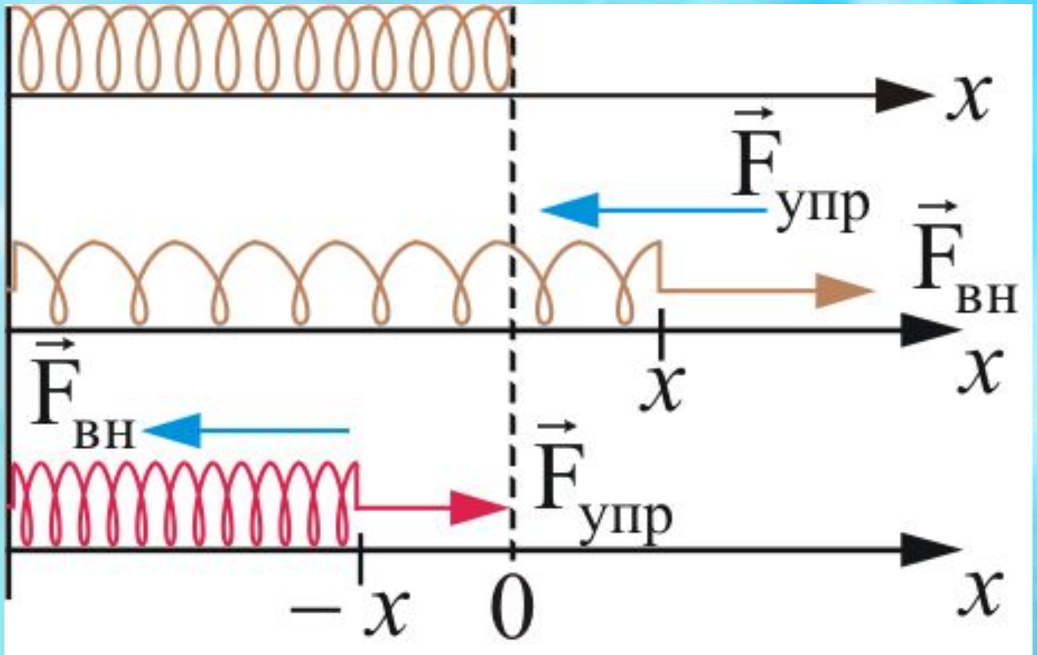


Удлинение пружины пропорционально внешней силе и определяется **законом Гука**:

$$\boxed{x = \frac{1}{k} F_{\text{вн.}},} \qquad (4.3.1)$$

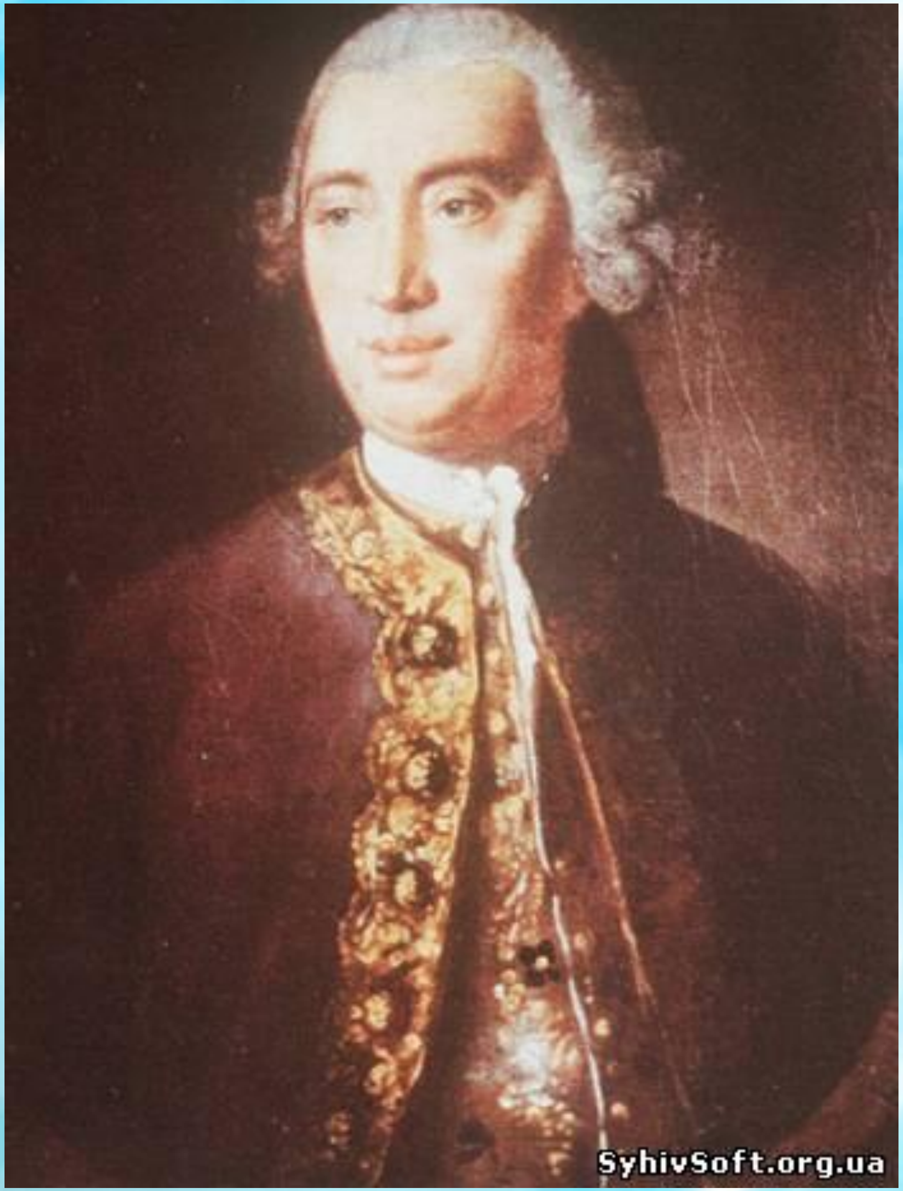
k – жесткость пружины.

Видно, что чем больше *k*, тем меньшее удлинение получит пружина под действием данной силы.



Гук Роберт (1635 – 1703) знаменитый английский физик, сделавший множество изобретений и открытий в области механики, термодинамики, оптики

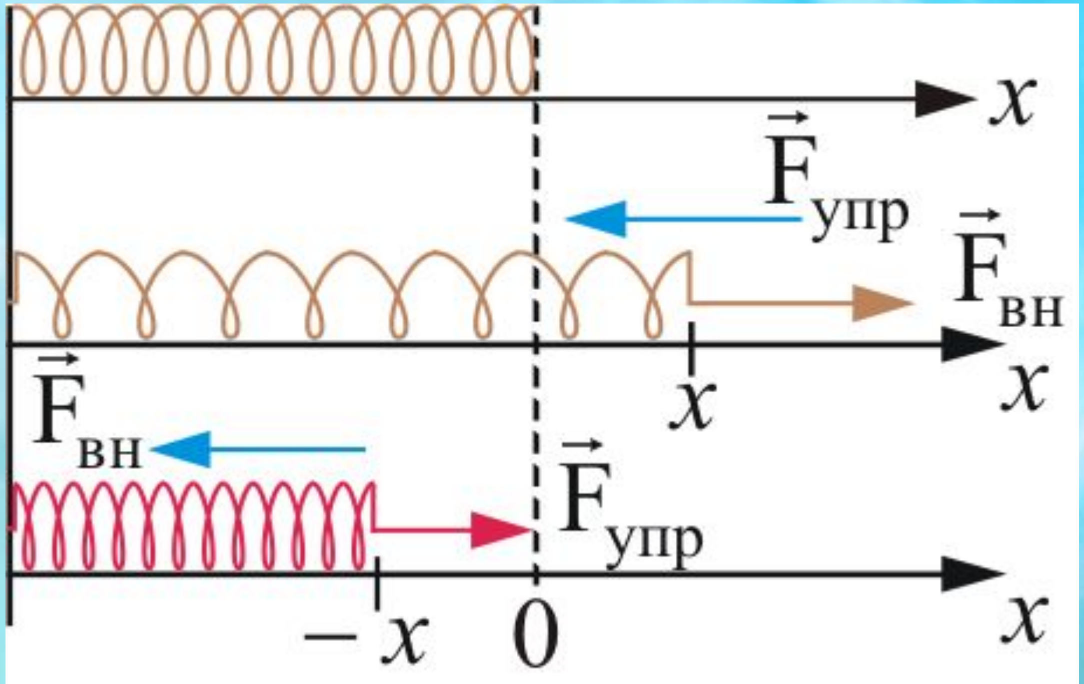
Его работы относятся к теплоте, упругости, оптике, небесной механике. Установил постоянные точки термометра – точку таяния льда, точку кипения воды. Усовершенствовал микроскоп, что позволило ему осуществить ряд микроскопических исследований, в частности наблюдать тонкие слои в световых пучках, изучать строение растений. Положил начало физической оптике.


SyhivSoft.org.ua

Так как упругая сила отличается от внешней только знаком, т.е. $F_{упр.} = -F_{вн.}$

то закон Гука можно записать в виде:

$$\boxed{F_{упр.} = -kx.}$$



Потенциальная энергия упругой пружины U равна работе, совершенной над пружиной.

Так как сила не постоянна, то элементарная работа равна $$\mathrm{d}A = F\mathrm{d}x$$

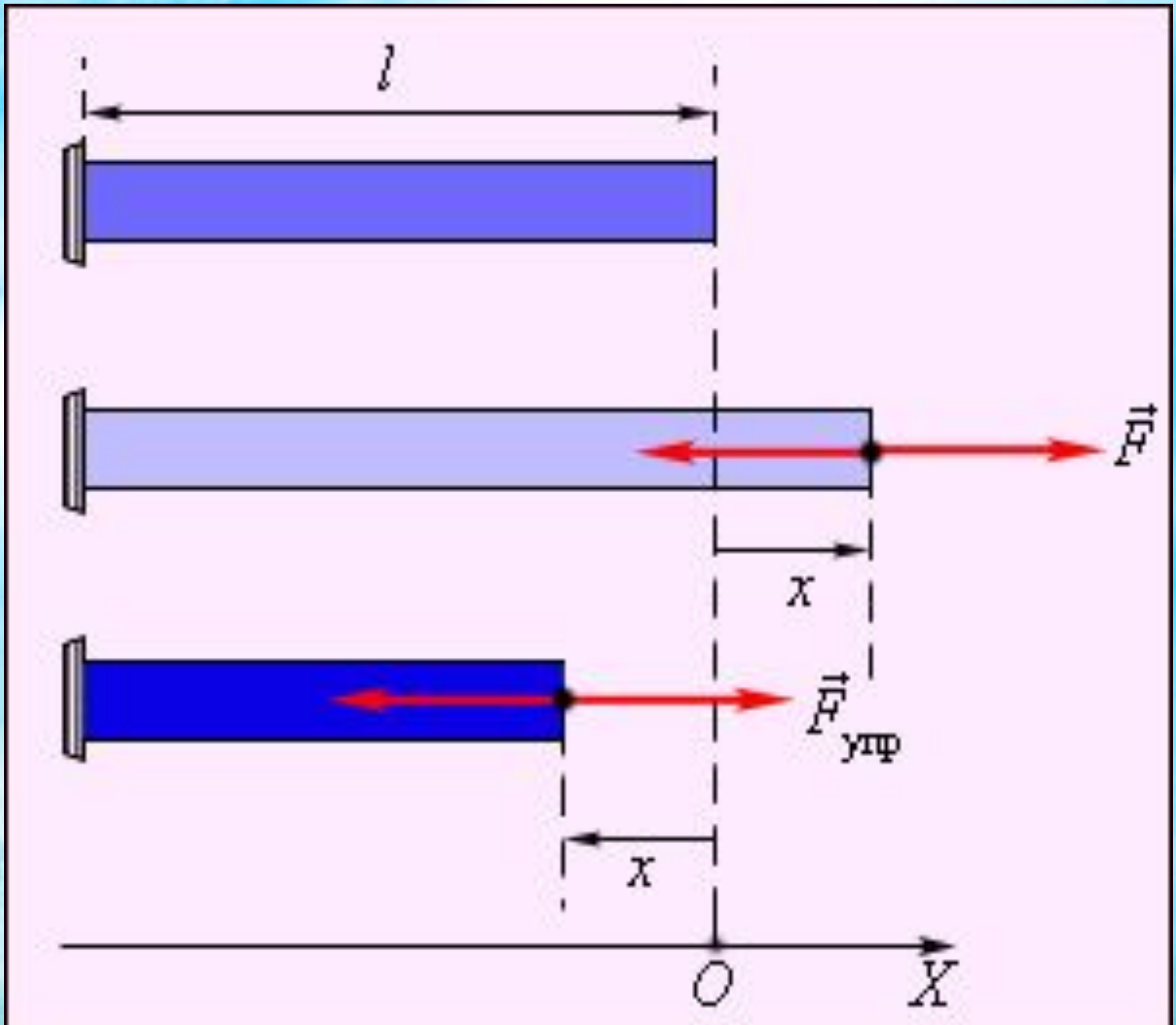
$$\mathrm{d}A = -kx\mathrm{d}x,$$

Тогда ***полная работа, которая совершена пружиной, равна***:

$$A = \int \mathrm{d}A = -\int_0^x kx\mathrm{d}x = -\frac{kx^2}{2}$$

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

Деформация растяжения и сжатия стержня



Закон Гука для стержня

Одностороннее (или продольное) растяжение (сжатие) стержня состоит в **увеличении (уменьшении) длины стержня под действием внешней силы** $\vec{F}$

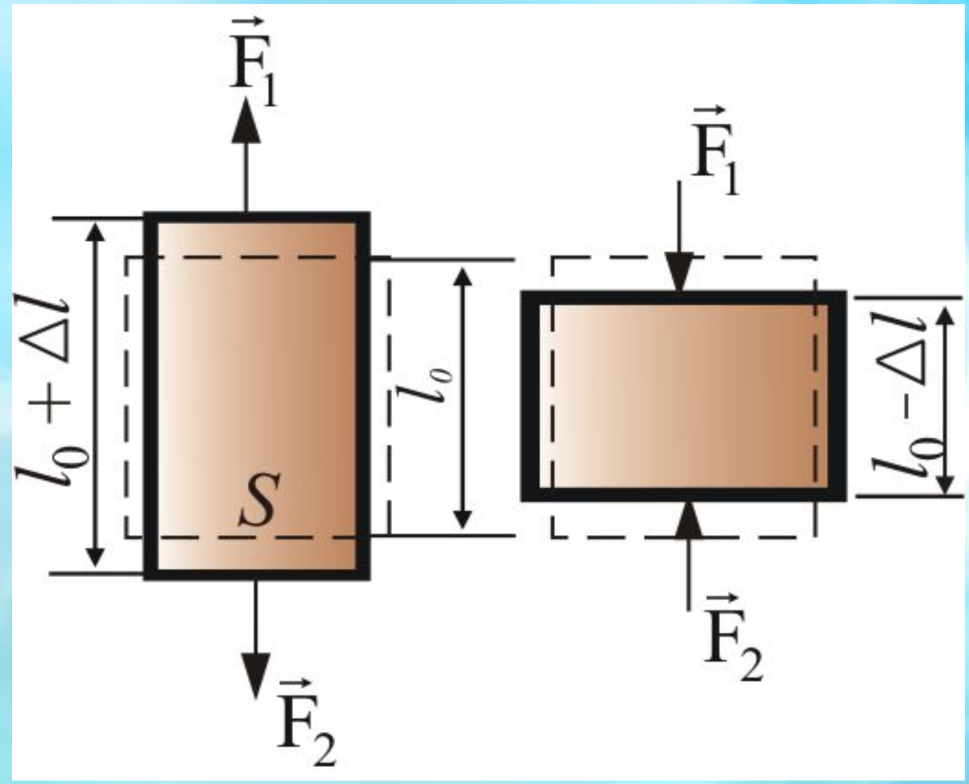


Рисунок 4.3

Такая деформация приводит к возникновению в стержне упругих сил, которые принято характеризовать **напряжением σ**:

$$\boxed{\sigma = \frac{F_{\text{упр.}}}{S},}$$

Здесь $S = \dfrac{\pi d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения стержня, *d* – его диаметр.

В случае растяжения σ считается положительной, а в случае сжатия – отрицательной. Опыт показывает, что приращение длины стержня Δ*l* пропорционально напряжению σ:

Приращение длины стержня Δ*l* пропорционально напряжению σ:

$$\boxed{\Delta l = \frac{1}{k}\sigma.}$$

Коэффициент пропорциональности *k*, как и в случае пружины, зависит от свойств материала и длины стержня.

Доказано, что

$$\boxed{k = \frac{E}{l_0}}$$

где *E* – *величина, характеризующая упругие свойства материала стержня –* ***модуль Юнга.***

E - измеряется в Н/м^2 или в Па.

Томас Юнг,
1773-1829, ан. физик

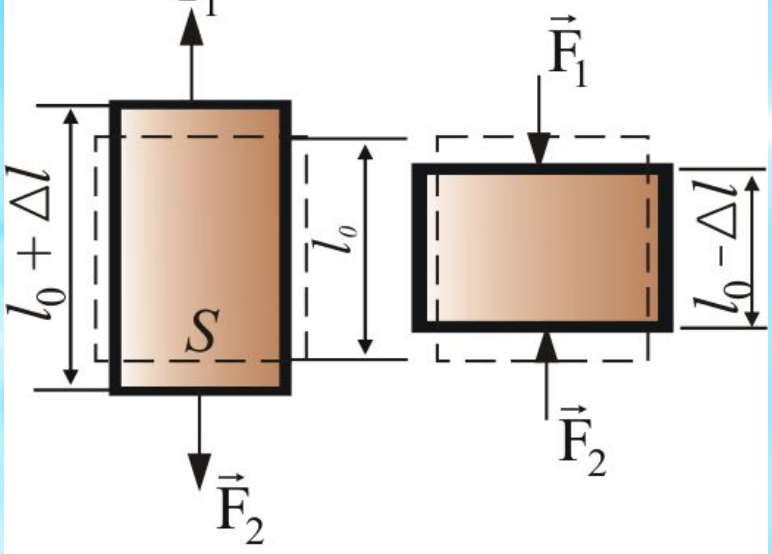
приращение длины:

$$\boxed{\Delta l = \frac{l_0 \sigma}{E},}$$

$$\boxed{\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon}$$ *относительное приращение длины*,

$$\boxed{\varepsilon = \frac{1}{E}\sigma} \qquad (4.3.2)$$

З***акон Гука для стержня***: *относительное приращение длины стержня прямо пропорционально напряжению и обратно пропорционально модулю Юнга.*



Растяжение или сжатие стержней сопровождается соответствующим изменением их поперечных размеров

Отношение относительного поперечного сужения (расширения) $\dfrac{\Delta d}{d}$ *стержня к относительному удлинению (сжатию)* $\dfrac{\Delta l}{l}$ называют **коэффициентом Пуассона**

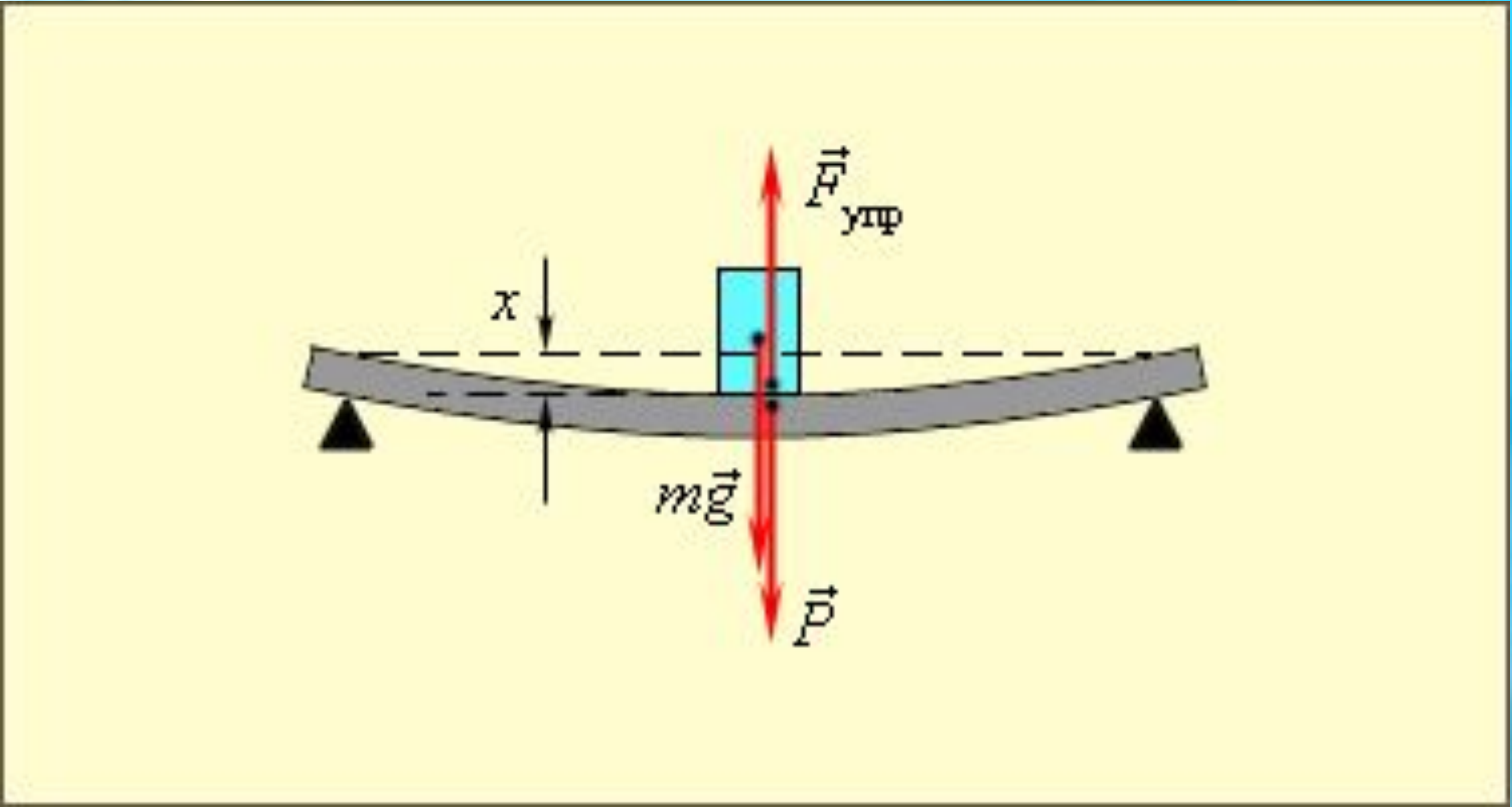
$$\boxed{M=\frac{\Delta d}{d}:\frac{\Delta l}{l}.} \qquad (4.3.3)$$

Объемная плотность потенциальной энергии тела ω_σ при растяжении (сжатии) определяется удельной работой по преодолению упругих сил $A_{упр}$ рассчитанной на единицу объема тела:

$$\boxed{\omega_\sigma = A_{упр.} = \frac{\sigma^2}{2E}.} \qquad (4.3.4)$$

Деформация сдвига

Изгиб



Деформация сдвига

Под действием силы $\vec{F}$ приложенной касательно к верхней грани, брусок получает **деформацию сдвига**

Пусть *AB* – плоскость сдвига

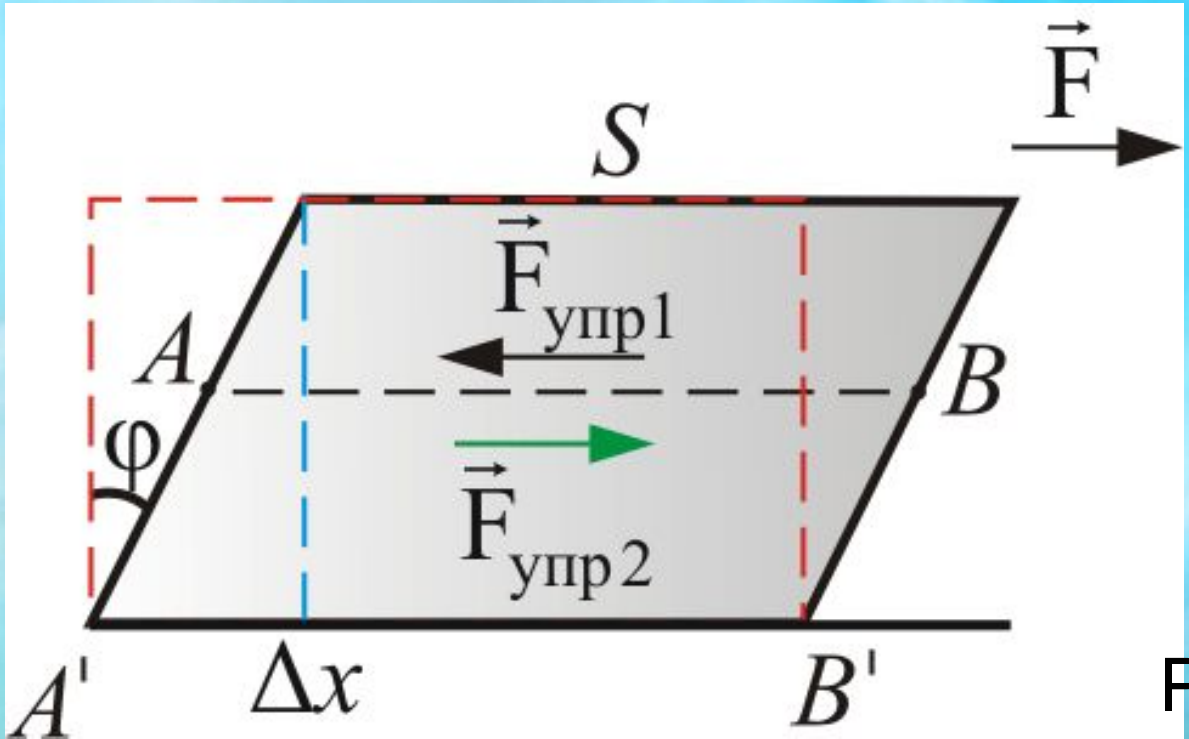
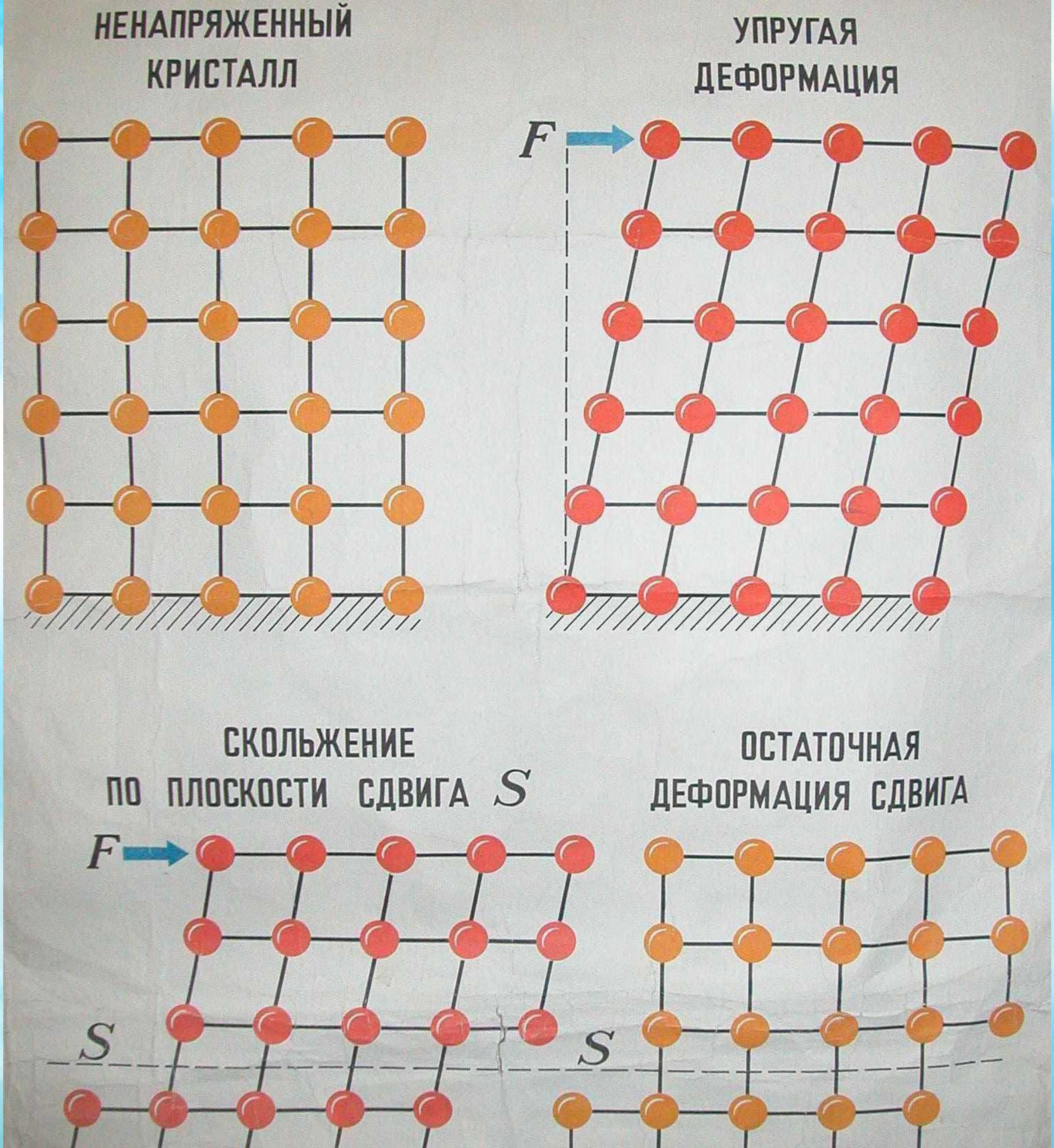


Рисунок 4.4


НЕНАПРЯЖЕННЫЙ КРИСТАЛЛ
УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
F
СКОЛЬЖЕНИЕ ПО ПЛОСКОСТИ СДВИГА S
ОСТАТОЧНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СДВИГА
F
S
S

Назовем величину γ, равную тангенсу угла сдвига φ, ***относительным сдвигом***:

$$\boxed{\gamma = \frac{\Delta x}{x},}$$

здесь Δx – абсолютный сдвиг.

При упругих деформациях угол φ бывает очень маленьким, поэтому

$$\mathrm{tg}\varphi \approx \varphi$$

Таким образом, ***относительный сдвиг***

$$\boxed{\gamma = \mathrm{tg}\varphi \approx \varphi}$$

Деформация сдвига приводит к возникновению в каждой точке бруска ***тангенциального упругого напряжения*** τ, которое определяется как отношение модуля силы упругости к единице площади:

$$\boxed{\tau = \frac{F_{\text{упр.}}}{S},} \qquad (4.3.5)$$

где *S* – площадь плоскости *AB.*

Опытным путем доказано, что *относительный сдвиг пропорционален тангенциальному напряжению*:

$$\gamma = \frac{1}{G}\tau, \qquad (4.3.6)$$

***G – модуль сдвига**, зависящий от свойств материала и равный такому тангенциальному напряжению, при котором* $\gamma = \mathrm{tg}\varphi = 1$ а $\varphi = 45°$ *(если бы столь огромные упругие деформации были возможны).*

Модуль сдвига измеряется также как и модуль Юнга, в паскалях (Па).

Удельная потенциальная энергия деформируемого тела при сдвиге равна

$$\boxed{\omega_s = \frac{\tau^2}{2G}.} \quad (4.3.7)$$

4.4. Силы трения

Трение подразделяется на ***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.*

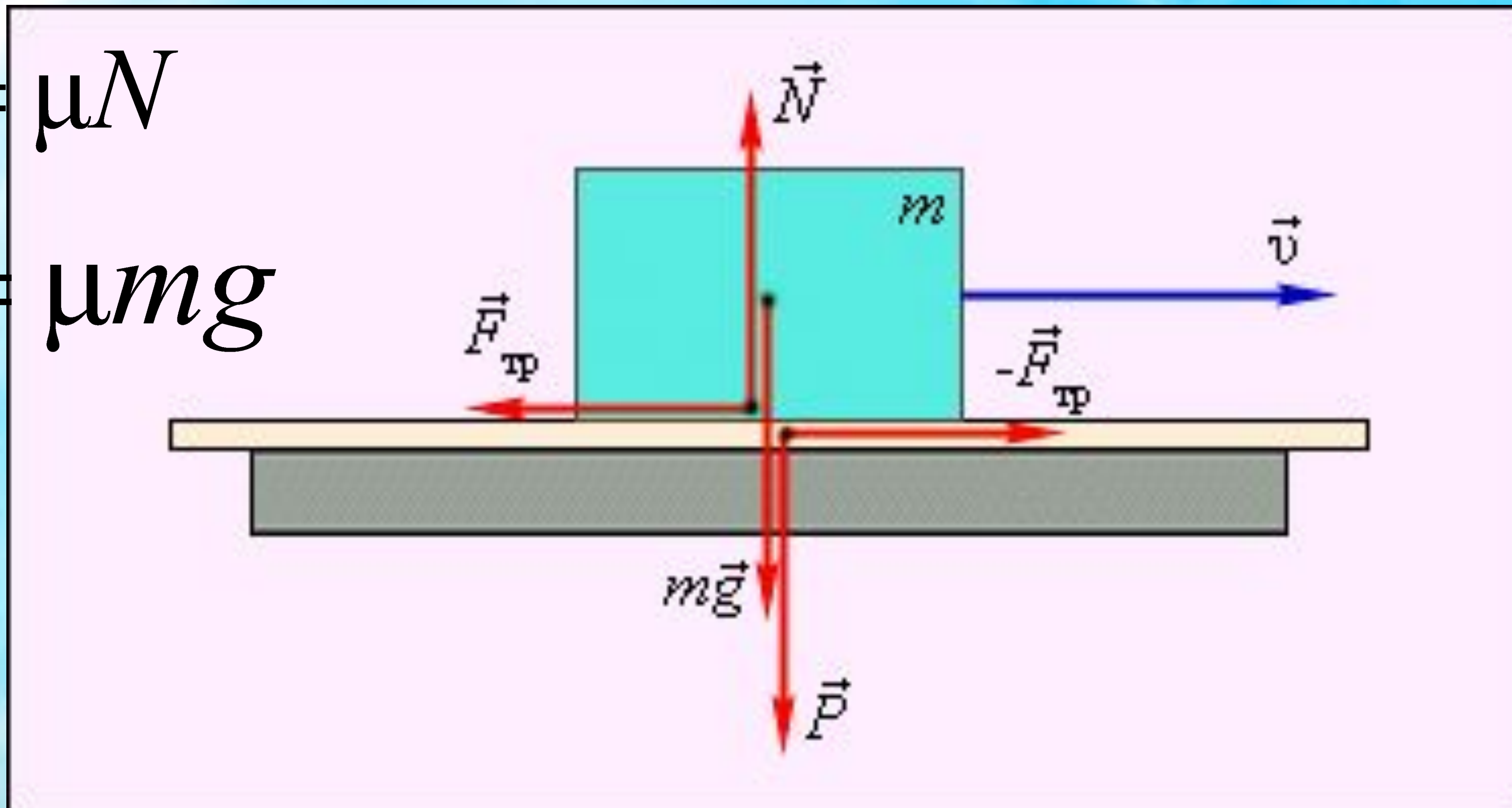
Жидким (**вязким**) *называется трение между твердым телом и жидкой или газообразной средой или ее слоями.*

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

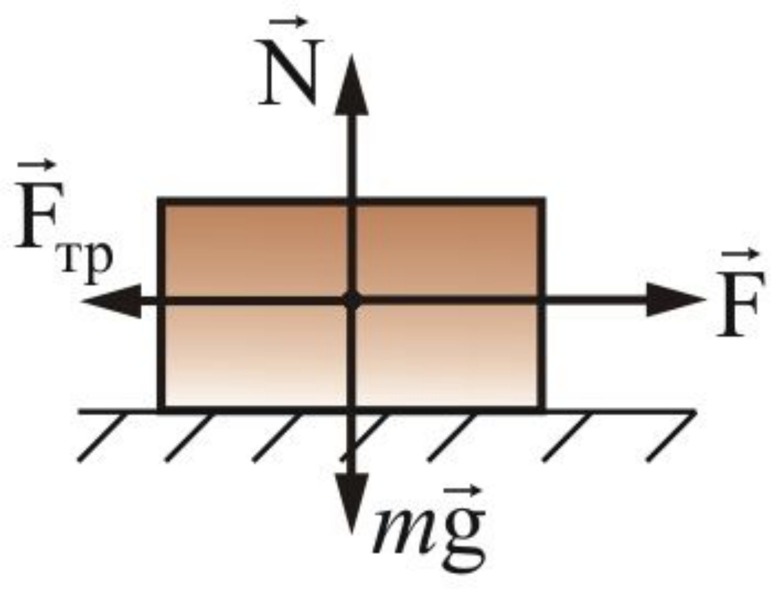
Силы трения - тангенциальные силы, возникающие при соприкосновении поверхностей тел и препятствующие их относительному перемещению.

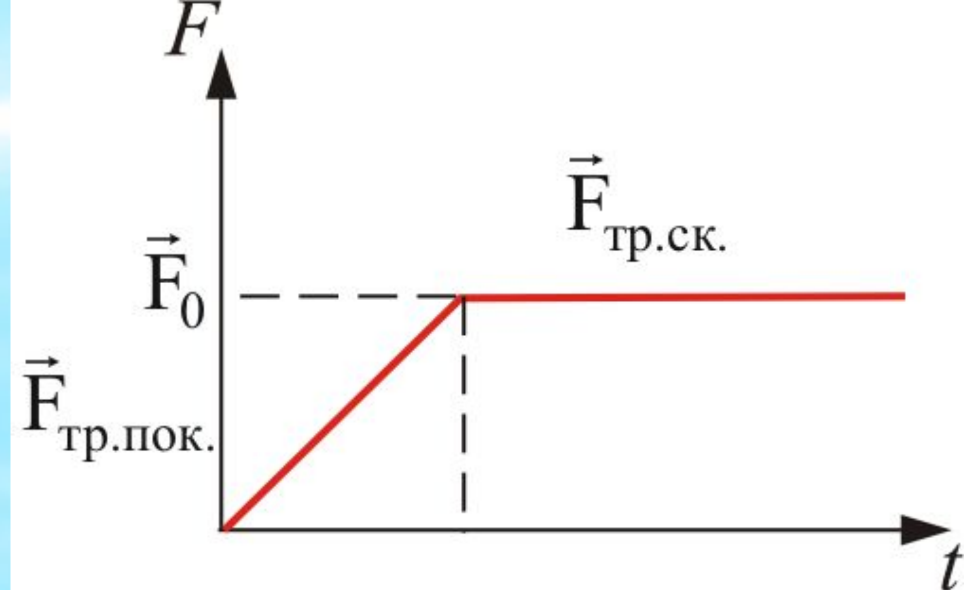
$$F_{тр} = \mu N$$

$$F_{тр} = \mu mg$$



Зависят от относительной скорости тел. Имеют различную природу. В результате действия сил трения механическая энергия превращается во внутреннюю энергию соприкасающихся тел (диссипация энергии).





Подействуем на тело, внешней силой $\vec{F}$ постепенно увеличивая ее модуль. Вначале брусок будет оставаться неподвижным, значит внешняя сила уравновешивается некоторой силой $\vec{F}_{тр.}$

В этом случае $\vec{F}_{тр.}$ – и есть ***сила трения покоя***.

Когда модуль внешней силы, а следовательно, и модуль силы трения покоя превысит значение F_0, тело начнет скользить по опоре – трение покоя $F_{тр.пок.}$ сменится трением скольжения $F_{тр.ск}$

Установлено, что ***максимальная сила трения покоя*** не зависит от площади соприкосновения тел и приблизительно ***пропорциональна модулю силы нормального давления N***

$$\boxed{F_0 = \mu_0 N,}$$

μ_0 – коэффициент трения покоя – зависит от природы и состояния трущихся поверхностей.

Аналогично и *для **силы трения скольжения***:

$$\boxed{F_{тр.} = \mu N} \quad (4.4.1)$$

Трение качения возникает между шарообразным телом и поверхностью, по которой оно катится. Сила трения качения подчиняется тем же законам, что и скольжения, но коэффициент трения μ здесь значительно меньше.

Наклонная плоскость

Подробнее рассмотрим силу трения скольжения на наклонной плоскости.

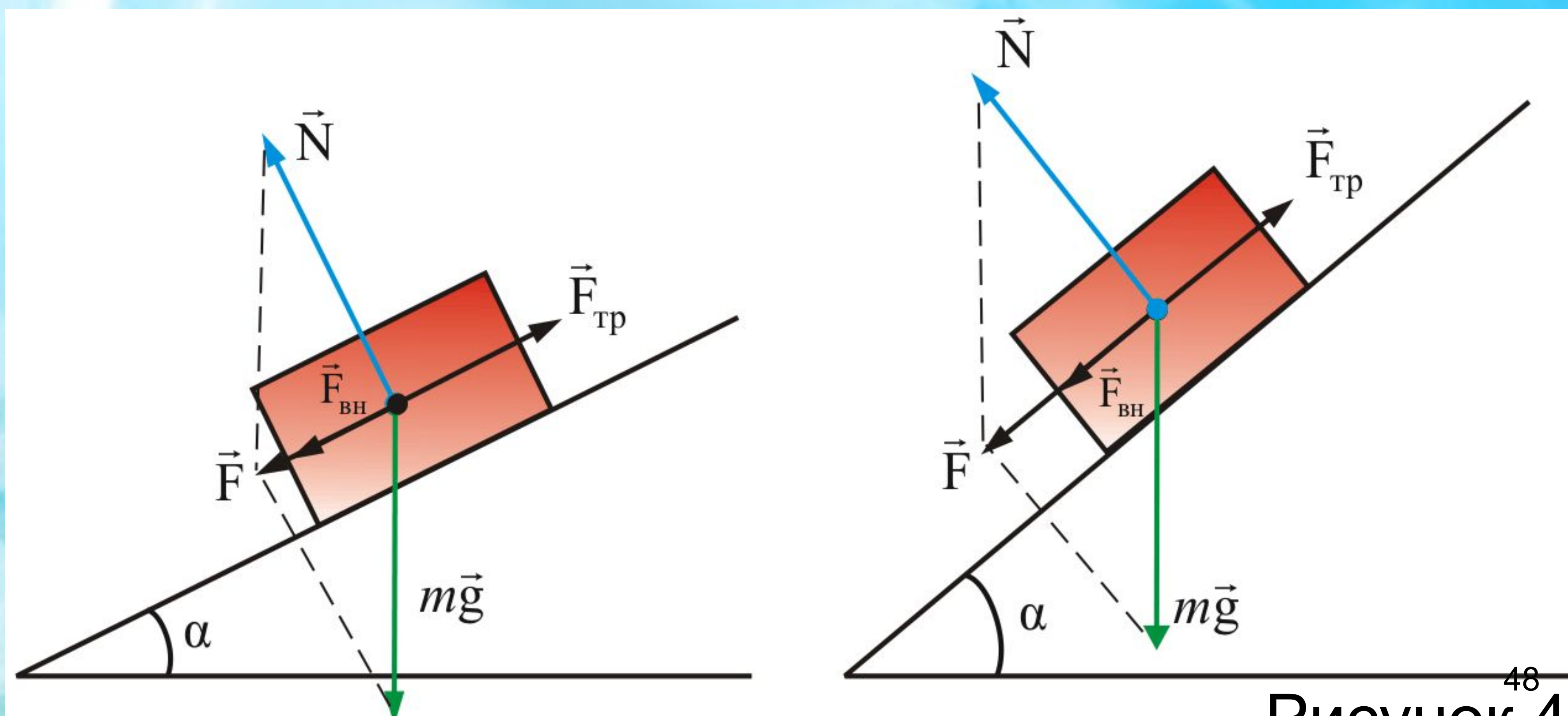
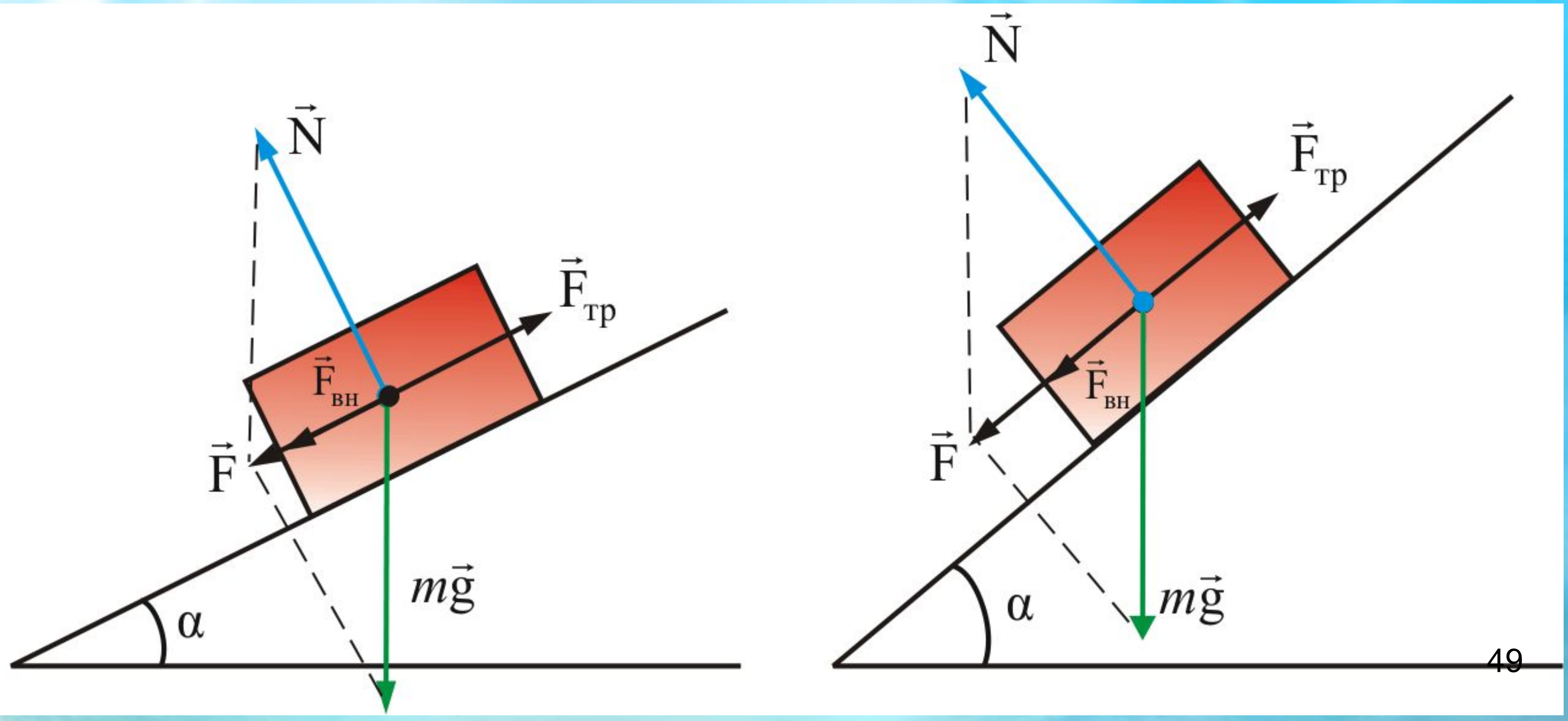


Рисунок 4.7

$$F = mg\sin\alpha, \qquad N = mg\cos\alpha$$

$$F_{тр.} = \mu N = \mu mg\cos\alpha,$$

Если $F < (F_{тр.})_{max} = \mu N$ – тело остается неподвижным на наклонной плоскости.



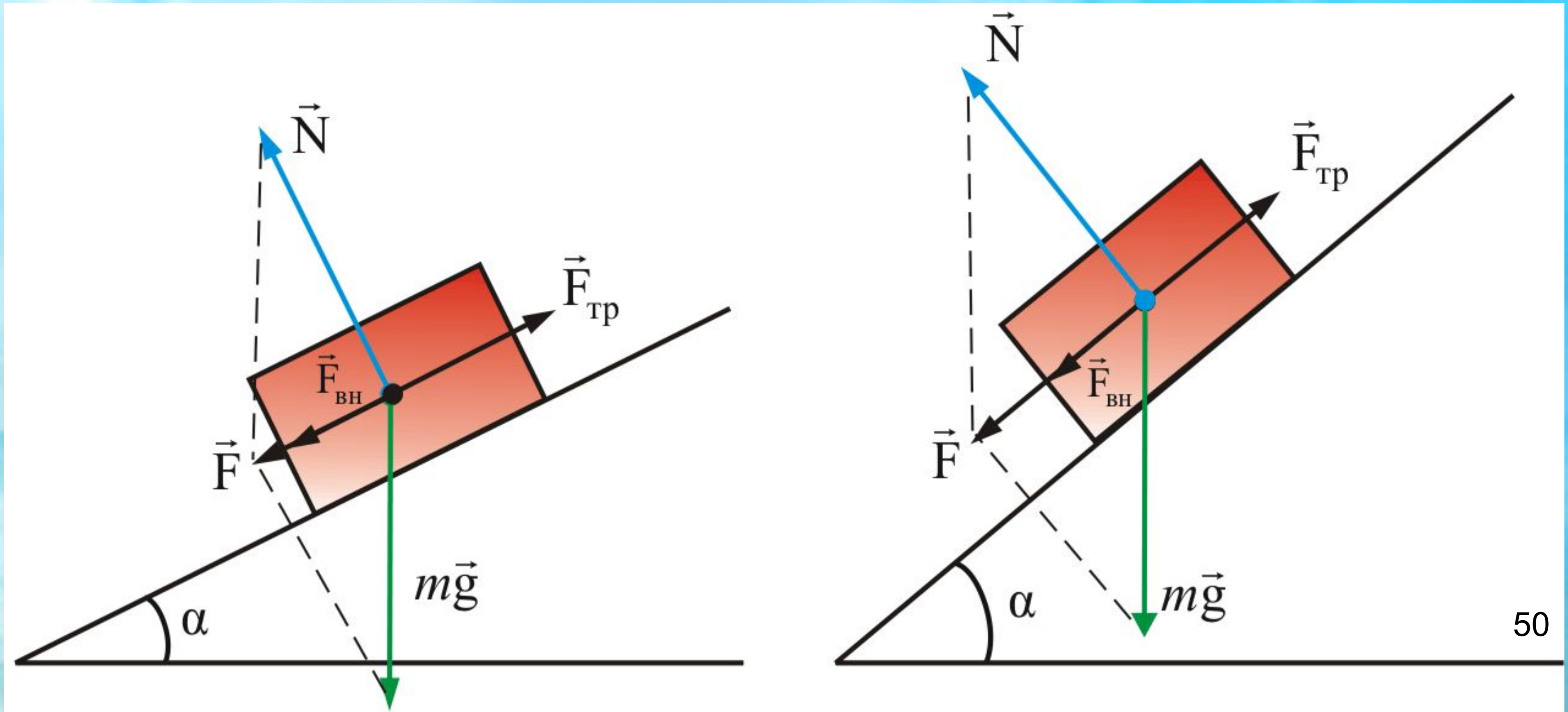
Максимальный угол наклона α определяется из условия:

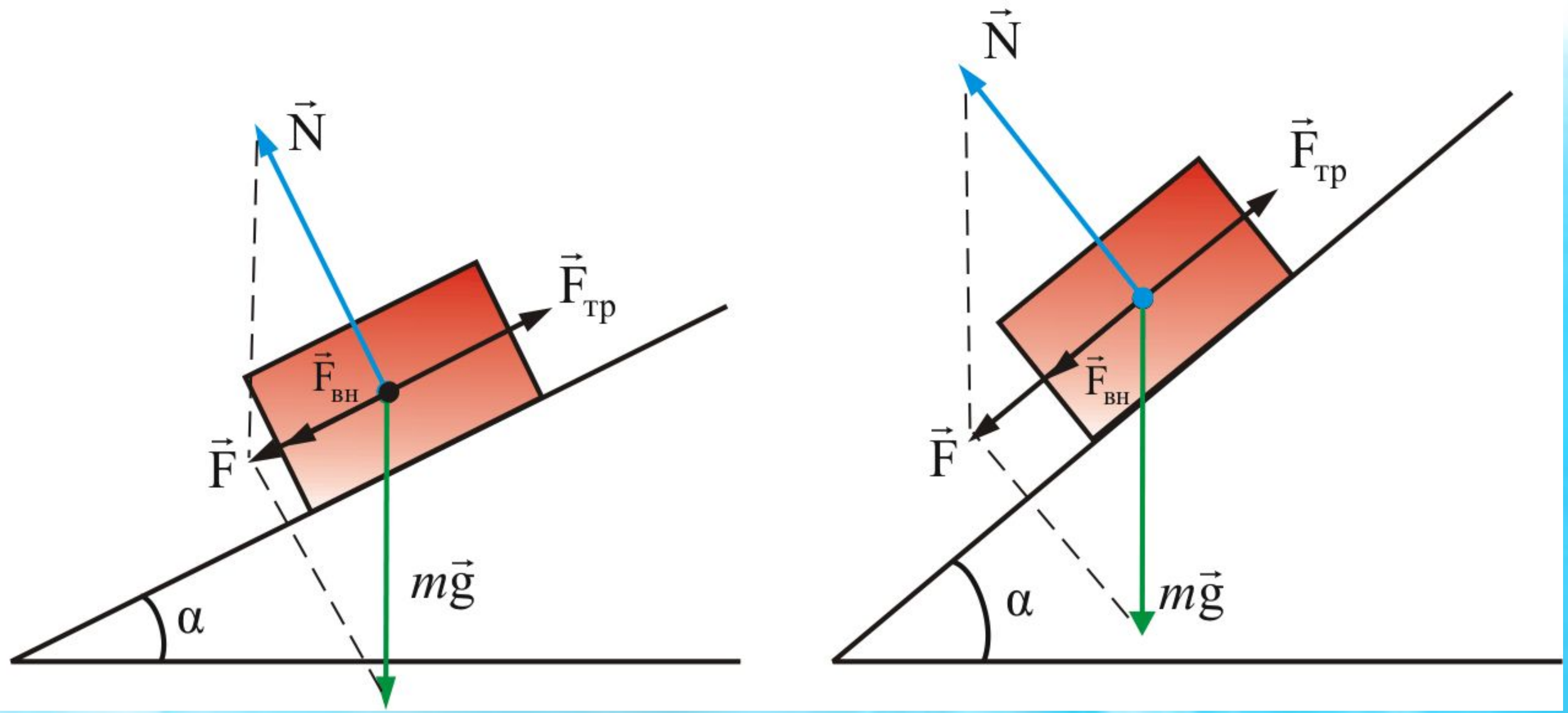
$$(F_{\text{тр.}})_{\max} = F$$

$$\mu mg\cos\alpha = mg\sin\alpha,$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{\max} = \mu$$

где *μ* – коэффициент сухого трения.





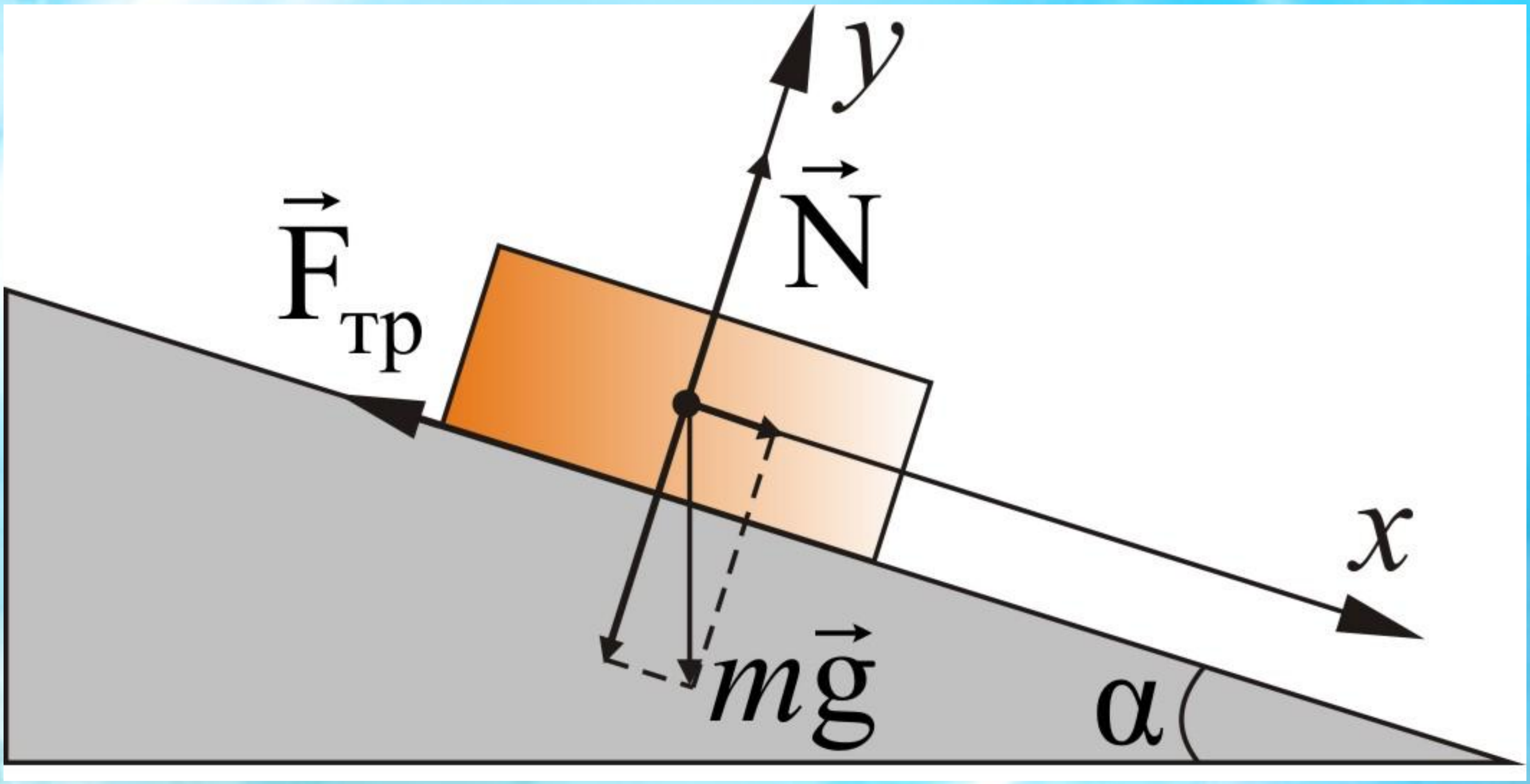
$$F_{тр.} = \mu N = \mu mg\cos\alpha,$$

$$F = mg\sin\alpha.$$

При $\alpha > \alpha_{max}$ тело будет скатываться с ускорением

$$a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha),$$

$$F_{ск.} = ma = F - F_{тр.}.$$


y
$\vec{N}$
$\vec{F}_{тр}$
x
$m\vec{g}$
α

4.5. Силы инерции

4.5.1. Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета

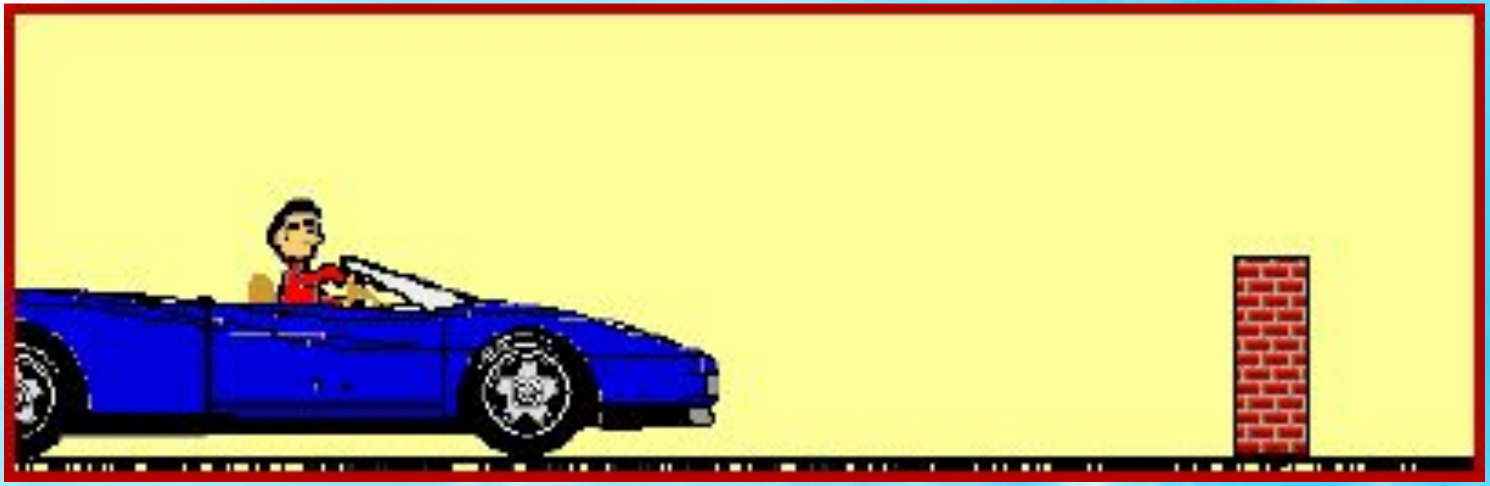
Законы инерции выполняются в инерциальной системе отсчета. А как описать движение тела в неинерциальной системе?

Рассмотрим пример: вы стоите в троллейбусе спокойно. Вдруг троллейбус резко трогается, и вы невольно отклонитесь назад. Что произошло? Кто вас толкнул?

С точки зрения наблюдателя на Земле (в инерциальной системе отсчета), в тот момент, когда троллейбус тронулся, вы остались стоять на месте – в соответствии с первым законом Ньютона.

С точки зрения сидящего в троллейбусе – вы начали двигаться назад, как если бы кто-нибудь вас толкнул. На самом деле, никто не толкнул, просто ваши ноги, связанные силами трения с троллейбусом «поехали» вперед из-под вас и вам пришлось падать назад.

Можно описать ваше движение в инерционной системе отсчета. Но это не всегда просто, так как обязательно нужно вводить силы, действующие со стороны *связей*.



Силы, действующие со стороны *связей*. могут быть самыми разными и ведут себя по разному – нет единого подхода к их описанию. ***Силы инерции обусловлены не взаимодействием тел, а свойствами самих неинерциальных систем отсчета.***

На силы инерции законы Ньютона не распространяются. ***Можно и в неинерциальной системе воспользоваться законами Ньютона, если ввести силы инерции***. Они *фиктивны*. Нет тела или поля под действием которого вы начали двигаться в троллейбусе. Силы инерции вводят специально, чтобы воспользоваться уравнениями Ньютона в неинерциальной системе.

Силы инерции при *поступательном движении* неинерциальной системы отсчета.

Введем обозначения:

$\vec{a}'$ – **ускорение тела относительно неинерциальной системы**;

$\vec{a}^{*}$ – **ускорение неинерциальной системы относительно инерциальной** (относительно Земли).

Тогда **ускорение тела относительно инерциальной системы**: $\vec{a} = \vec{a}^{*} + \vec{a}'.$

$\frac{\vec{F}}{m} = \vec{a}$ второй закон Ньютона,

где *m* – масса движущегося тела.

Ускорение в инерциальной системе можно выразить через второй закон Ньютона

$$\frac{\vec{F}}{m} = \vec{a}^* + \vec{a}',$$

или

$$\vec{a}' = \frac{\vec{F}}{m} - \vec{a}^*.$$

Мы можем и $\vec{a}^*$ представить в соответствии с законом Ньютона (формально)

$$\vec{a}' = \frac{\vec{F}}{m} + \frac{\vec{F}_{ин}}{m},$$

где $\vec{F}_{ин}$ – сила, направленная в сторону, противоположную ускорению неинерциальной системы.

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}^{*}$$

тогда получим

$$\boxed{m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{ин}}$$

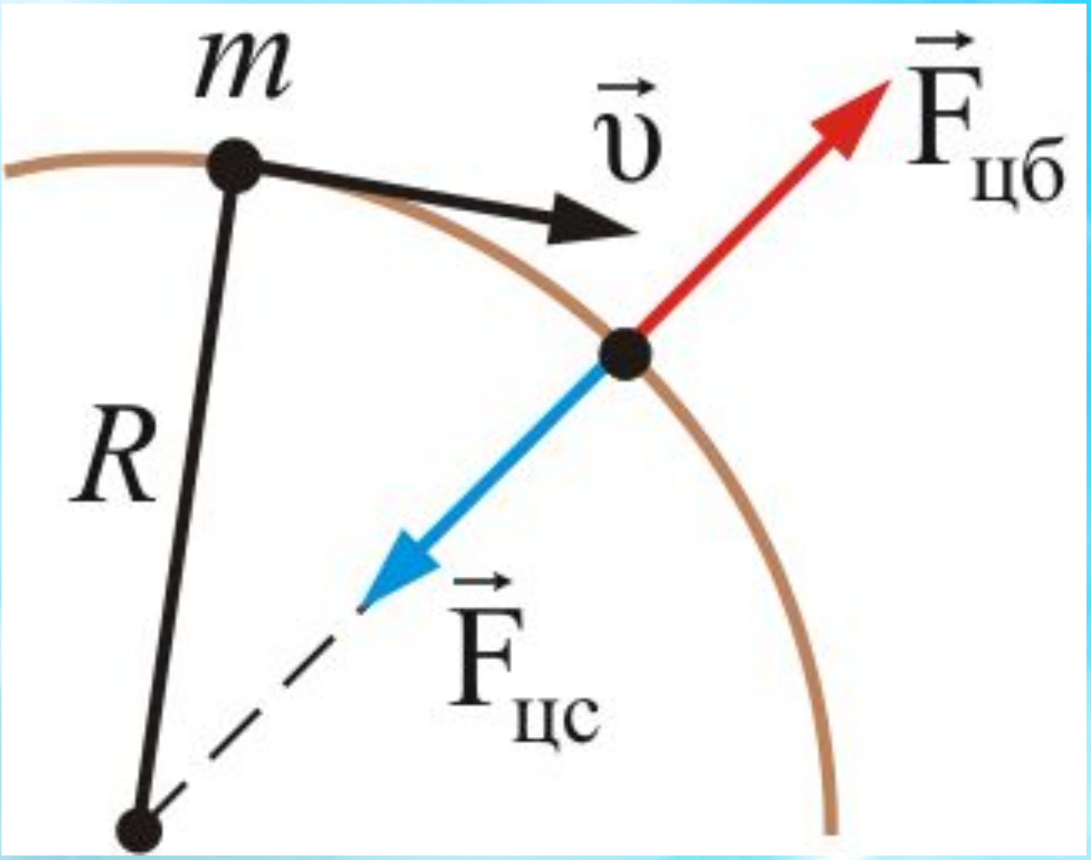
– ***уравнение Ньютона для неинерциальной системы отсчета.***

Здесь $\vec{F}_{ин}$ **– фиктивная сила**, обусловленная свойствами системы отсчета, необходимая нам для того, чтобы иметь возможность описывать движения тел в неинерциальных системах отсчета с помощью уравнений Ньютона.

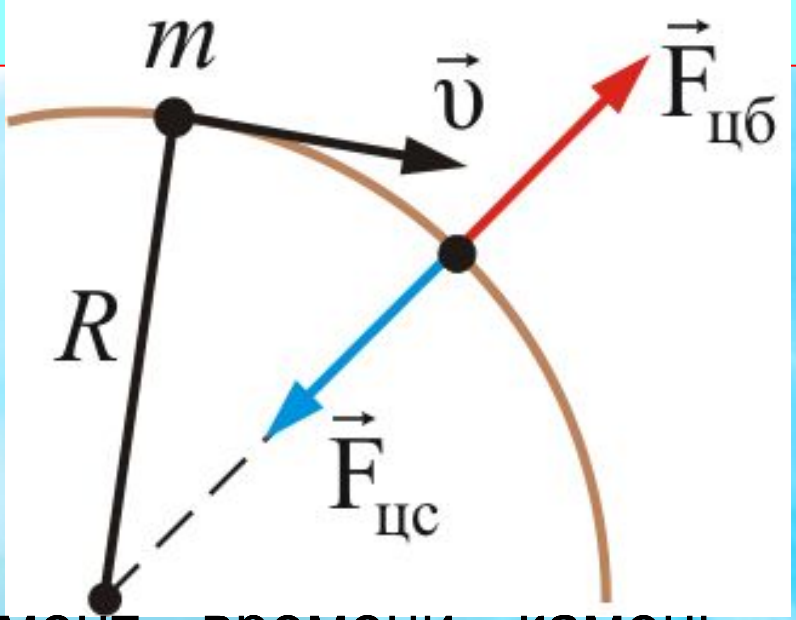
Силы инерции неинвариантны относительно перехода из одной системы отсчета в другую. Они **не подчиняются третьему закону Ньютона** - **закону действия и противодействия**. Движения тела под действием сил инерции аналогично движению во внешнем силовом поле.

Силы инерции всегда **являются внешним** по отношению к любому движению системы материальных тел.

Силы инерции при *вращательном движении* неинерциальной системы отсчета.

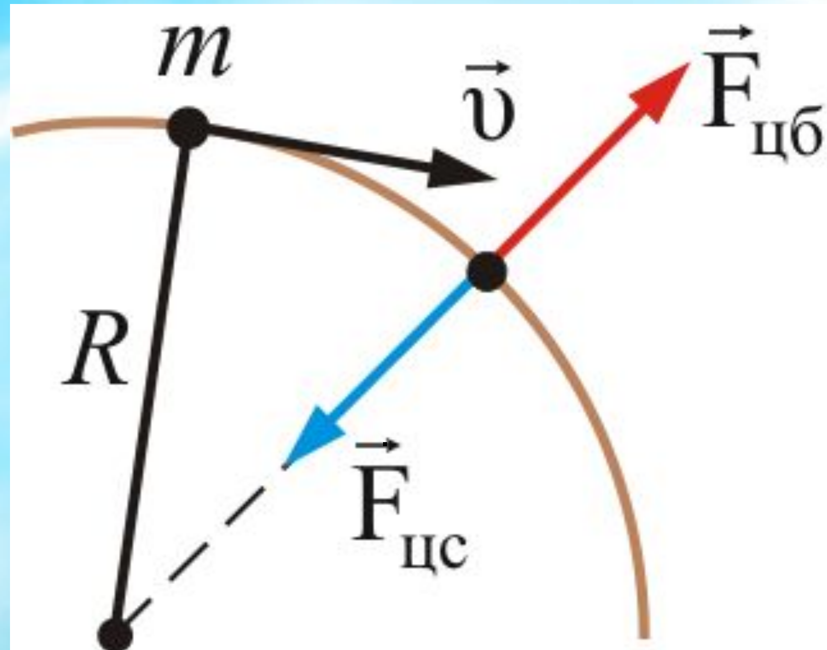


4.5.2. Центростремительная и центробежная силы



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, действующая на камень, направленная вдоль веревки к центру вращения.

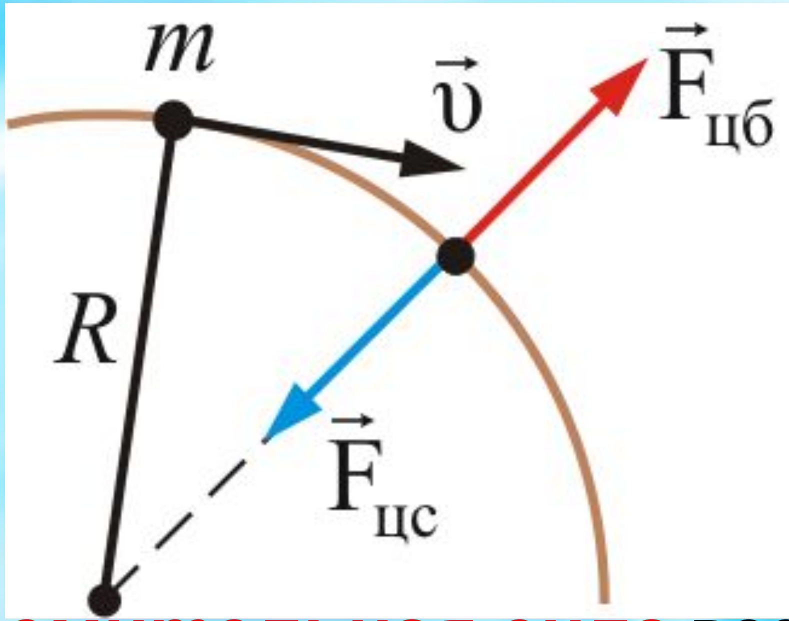
Это и есть ***центростремительная сила*** (при вращении Земли вокруг оси в качестве центростремительной силы выступает сила гравитации).



$$\vec{F}_{цс} = m\vec{a}_{цс}, \qquad \vec{a}_{цс} = \vec{a}_n,$$

$$\vec{F}_{цс} = m\vec{a}_n, \tag{4.5.2}$$

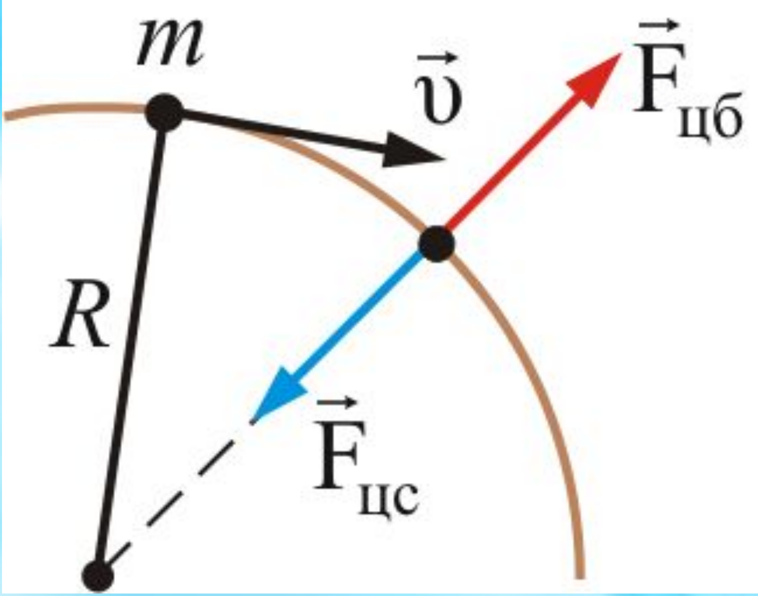
$$F_{цс} = m\frac{\upsilon^2}{R}. \tag{4.5.3}$$



Центростремительная сила возникла в результате действия камня на веревку, т.е. **это *сила, приложенная к телу*** (*сила инерции второго рода*).

Сила, приложенная к связи *и направленная по радиусу от центра, называется* ***центробежной*** (*сила инерции первого рода*)

Т.о. центростремительная сила приложена к вращающему телу, а центробежная сила – к связи.



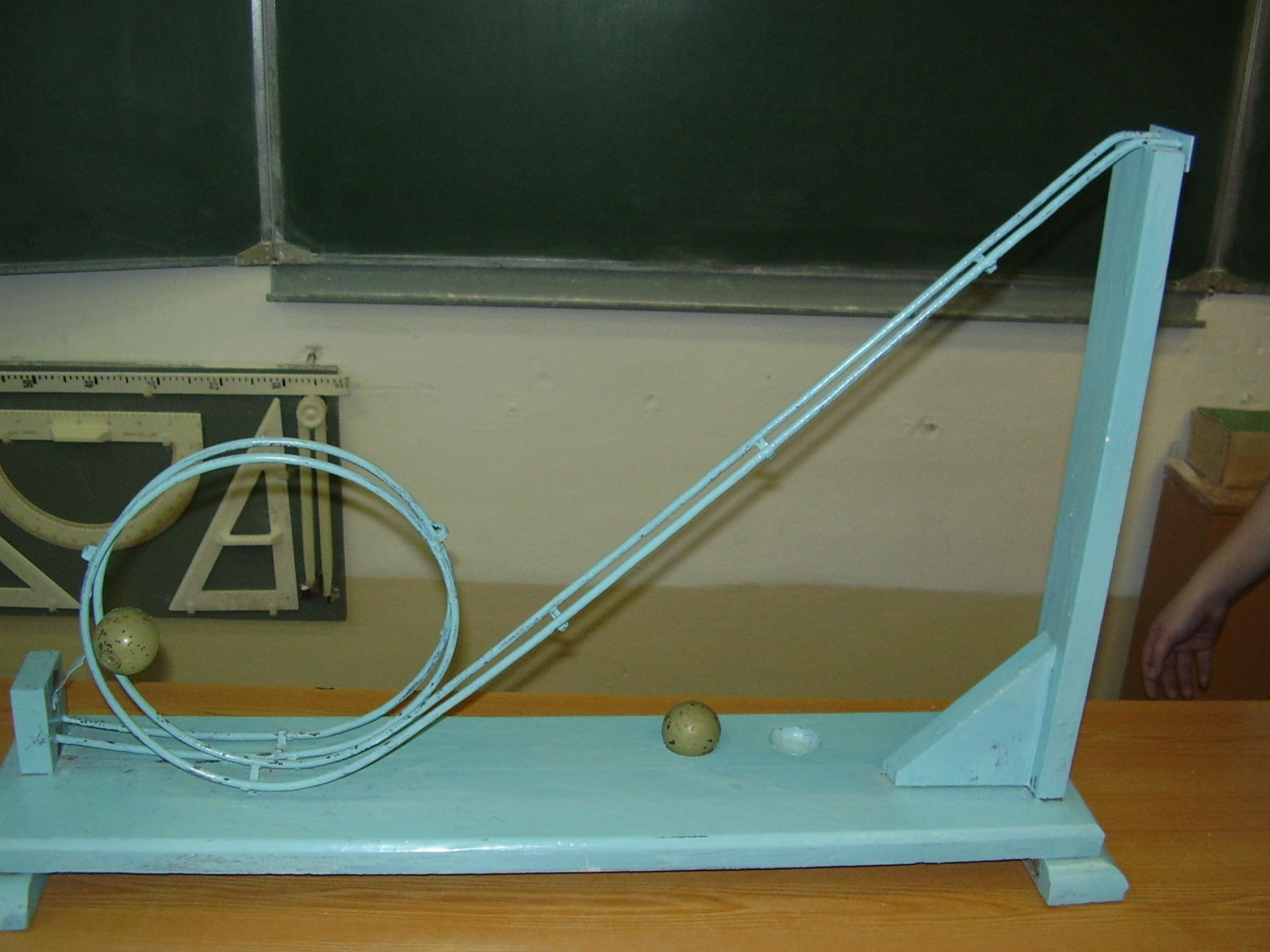
$$\vec{F}_{цб} = -m\vec{a}_n,$$

$$F_{цб} = -m\frac{\upsilon^2}{R},$$

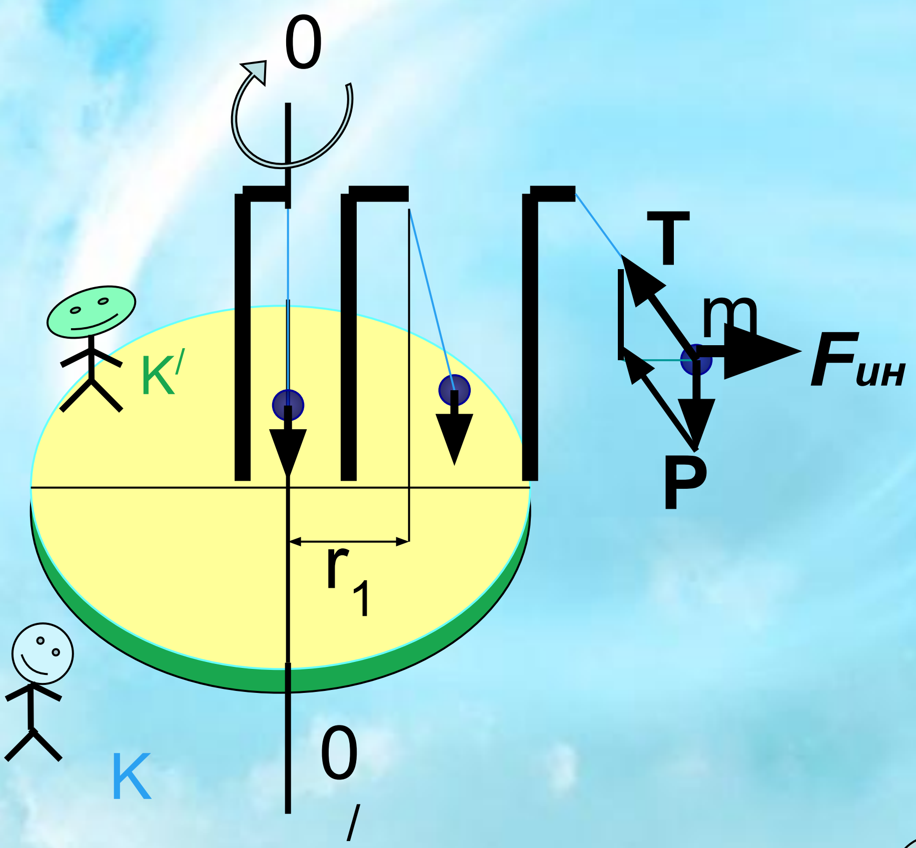
т.к. $$a_n = \omega^2 R$$

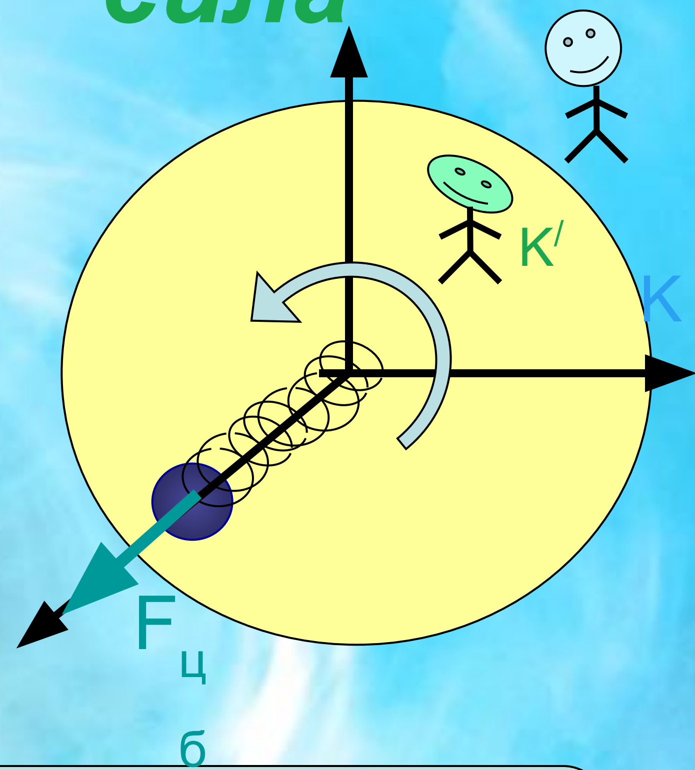
(здесь ω – угловая скорость вращения камня, а υ – линейная), то

$$F_{цб} = m\omega^2 R. \quad (4.5.4)$$



Центробежная сила





Для К’:∑ сил = 0

$$F_ц = m[[\omega r]\omega]$$

Поэтому наблюдатель в К’ говорит: «я нахожусь в покое, но нить отклонена. Следовательно должна действовать сила, которую я назову «сила инерции».

Наблюдатель в системе К говорит: «действует результирующая двух сил, сила натяжения нити и сила тяжести, результирующая этих сил направлена к центру вращения и создает нормальное ускорение, поэтому шарик вращается по окружности».

Сила тяжести и вес тела

Вес Р тела* массой *m $$\boxed{\vec{P} = -\vec{N}}$$

Тогда, учитывая, что $$\vec{F}_{ци} = -m\vec{a}_{ц} = m\vec{\rho}\omega^2$$

где ρ – радиус окружности, по которой движется частица вместе с Землей, получим

$$\vec{P} = m\vec{g} + m\vec{\rho}\omega^2$$

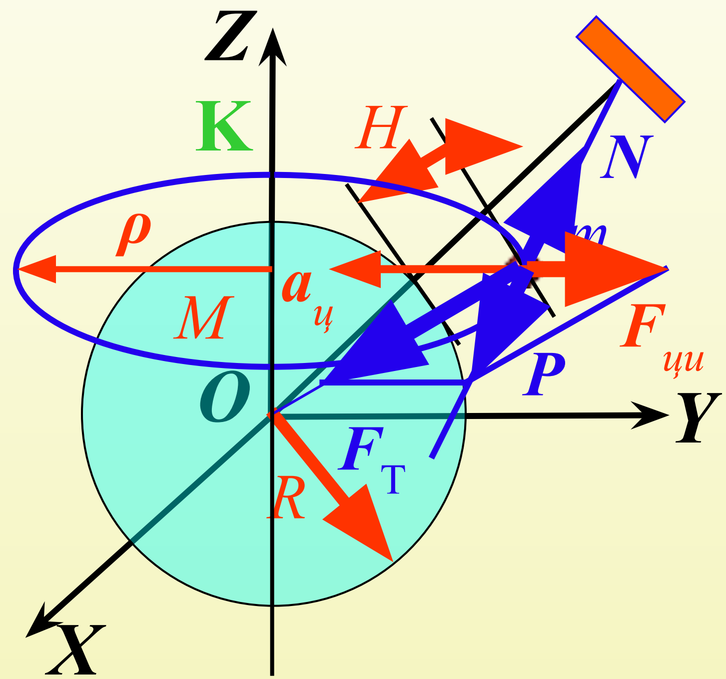
***Введем* обозначение**

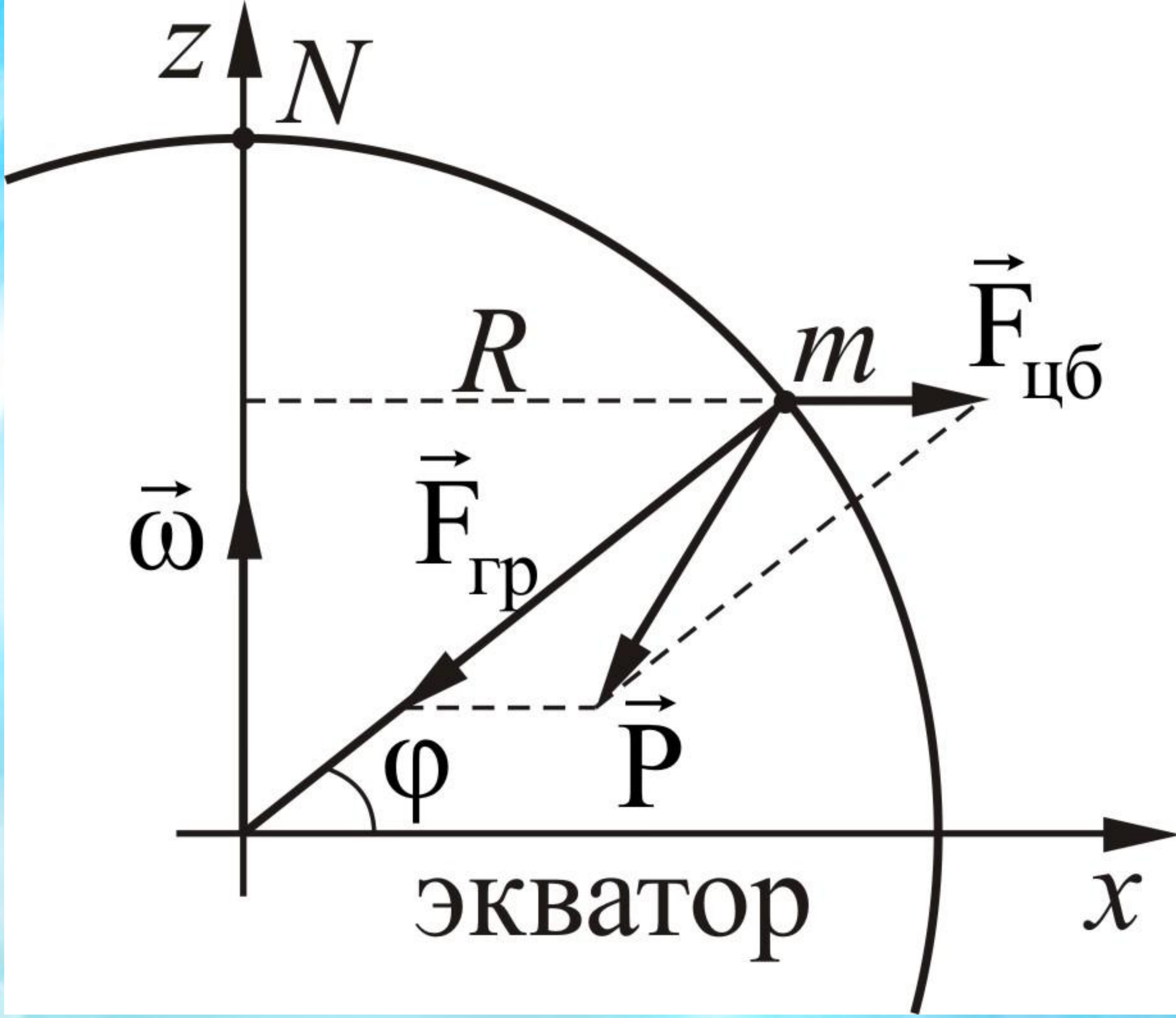
$$\boxed{\vec{g}_R = \vec{g} + \vec{\rho}\omega^2}$$

Таким образом* вес тела *массой m

$$\boxed{\vec{P} = m\vec{g}_R}$$

где g_R **– ускорение свободного падения** ***на*** **широте,** ***на которой расположена частица***

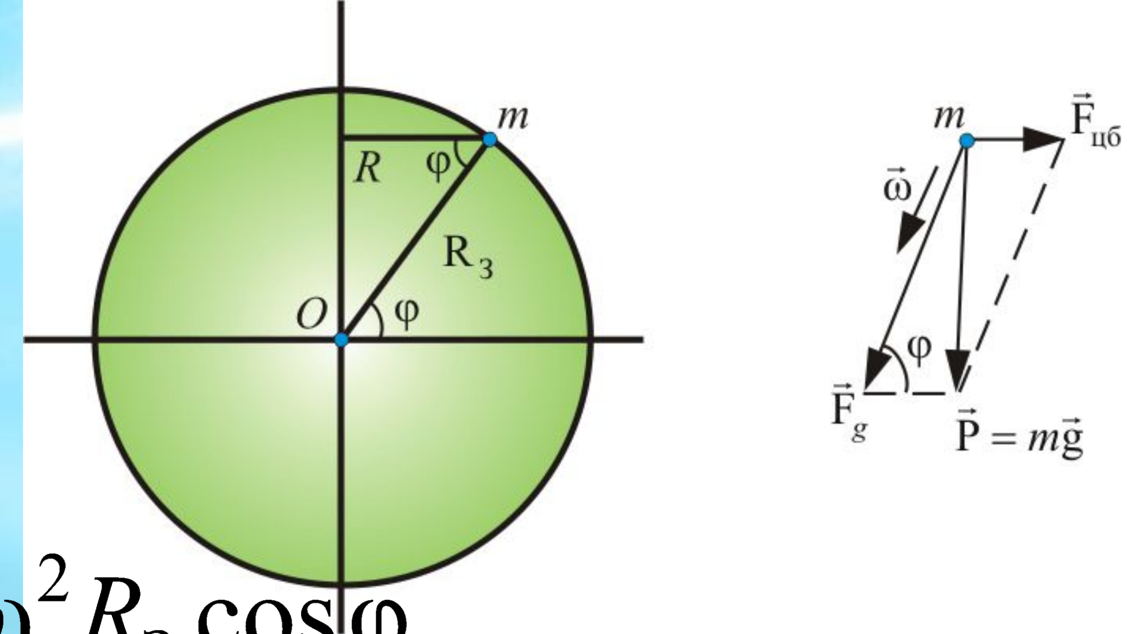




z
N
R
m
$\vec{F}_{цб}$
$\vec{\omega}$
$\vec{F}_{гр}$
$\vec{P}$
φ
экватор
x

$$R = R_з \cos\varphi$$

(φ – широта местности)



$$F_{цб} = m\omega^2 R = m\omega^2 R_з \cos\varphi,$$

Сила тяжести есть результат сложения $\vec{F}_g$ и $\vec{F}_{цб}$

$$\vec{P} = m\vec{g} = \vec{F}_g + \vec{F}_{цб}$$

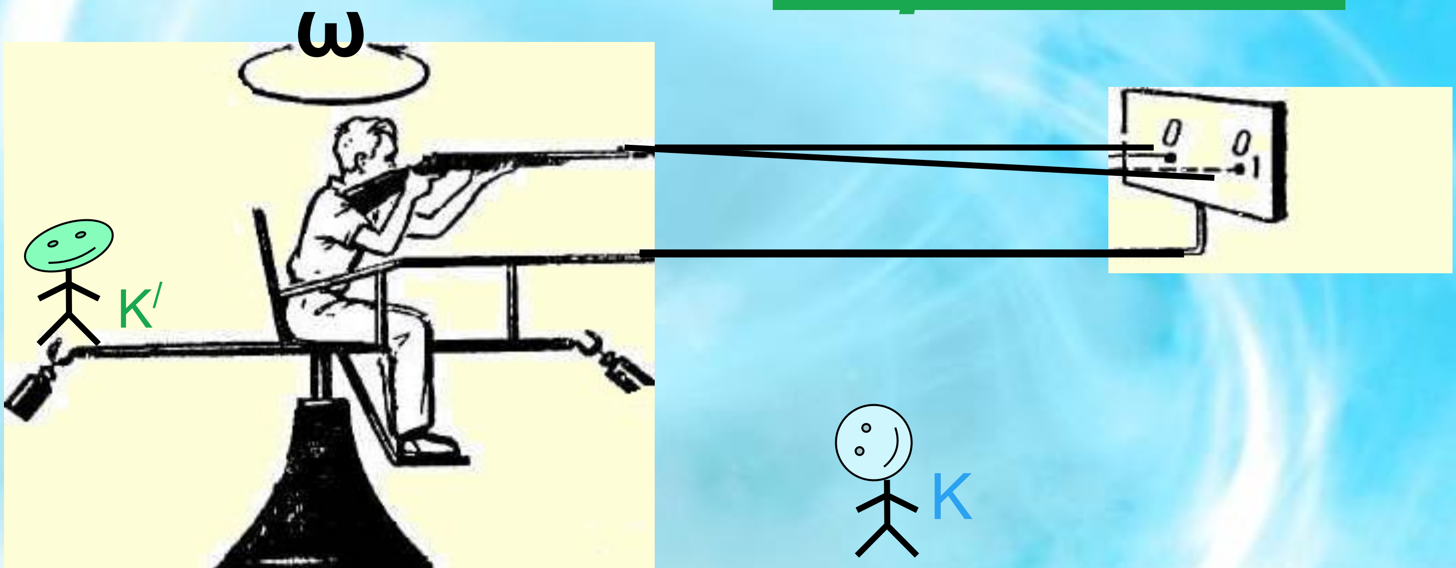
g (а значит и *mg*) *зависят от широты местности*

g = 9,80665 м/с^2 – ускорение свободного падения тела. Направлено *g* к центру только на полюсе и на экваторе.

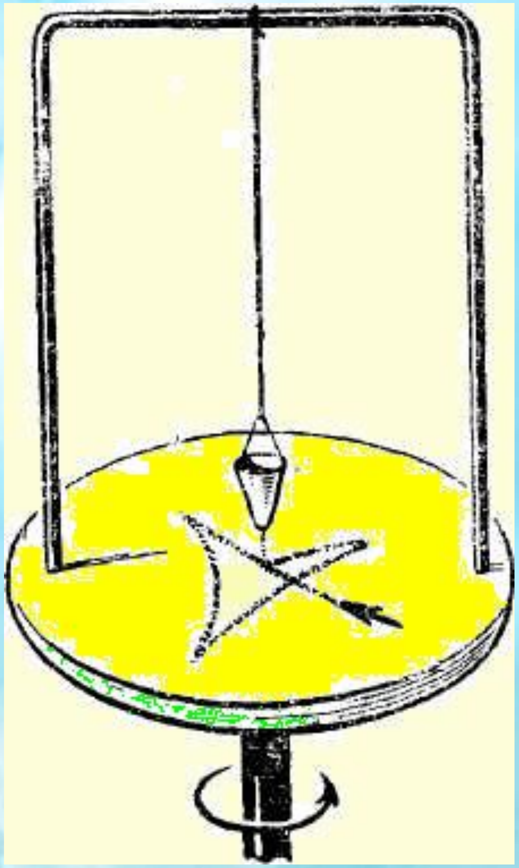
Широта в градусах	g, см/с^2	45	980,6159
0	978,0300	50	981,0663
5	978,0692	55	981,5034
10	978,1855	60	981,9141
15	978,3756	65	982,9141
20	978,6337	70	982,6061
25	978,9521	75	982,8665
30	979,3213	80	983,0257
35	979,7729	85	983,1759
40	980,1659	90	983,2360

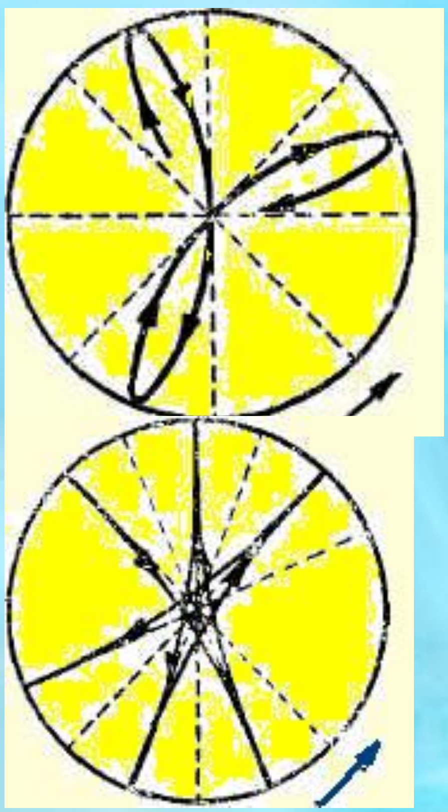
Вращается ли Земля?

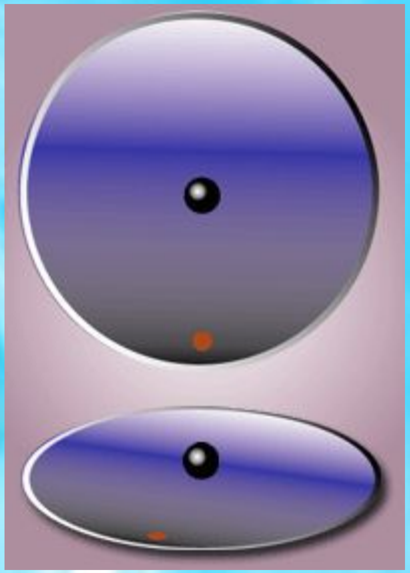
Сила Кориолиса.



Опыт Фуко с маятником.







Отклонение падающих тел к востоку.

1.Пуля из ружья υ = 500 м/с отклонится на пути в 0,5км (т.е. за 1с.) на 3,5 см.

2. Правые рельсы стираются сильнее левых.

3.Размывание правых берегов рек (крутые) в северном полушарии (закон Бэра).

4.Морские течения, пассаты, циклоны и антициклоны и т.д.

4.5.3. Сила Кориолиса

При движении тела относительно вращающейся системы отсчета, кроме центростремительной и центробежной сил, появляется еще одна сила, называемая ***силой Кориолиса*** *или* ***кориолисовой*** *силой инерции* (Г. Кориолис (1792 – 1843) – французский физик).

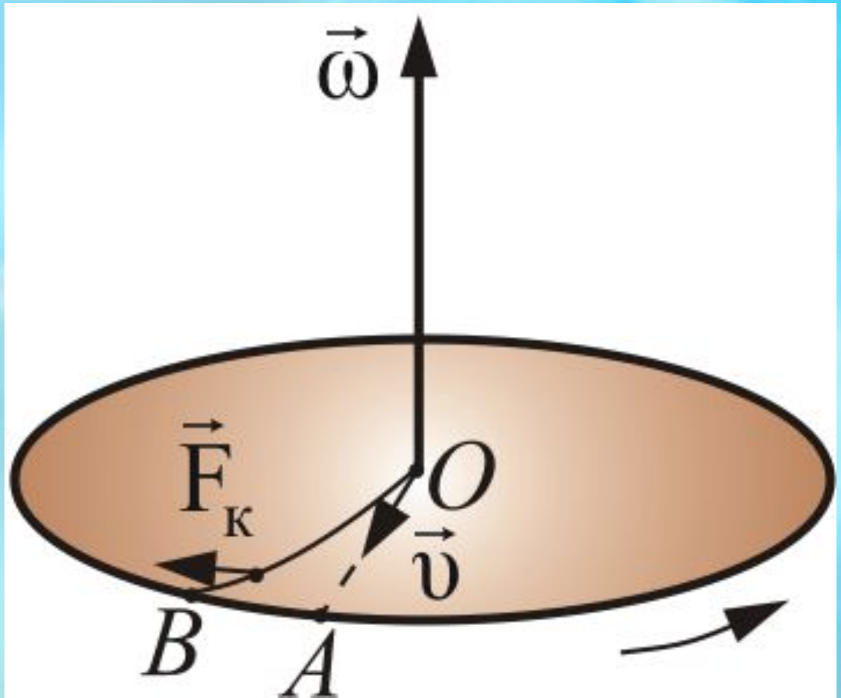
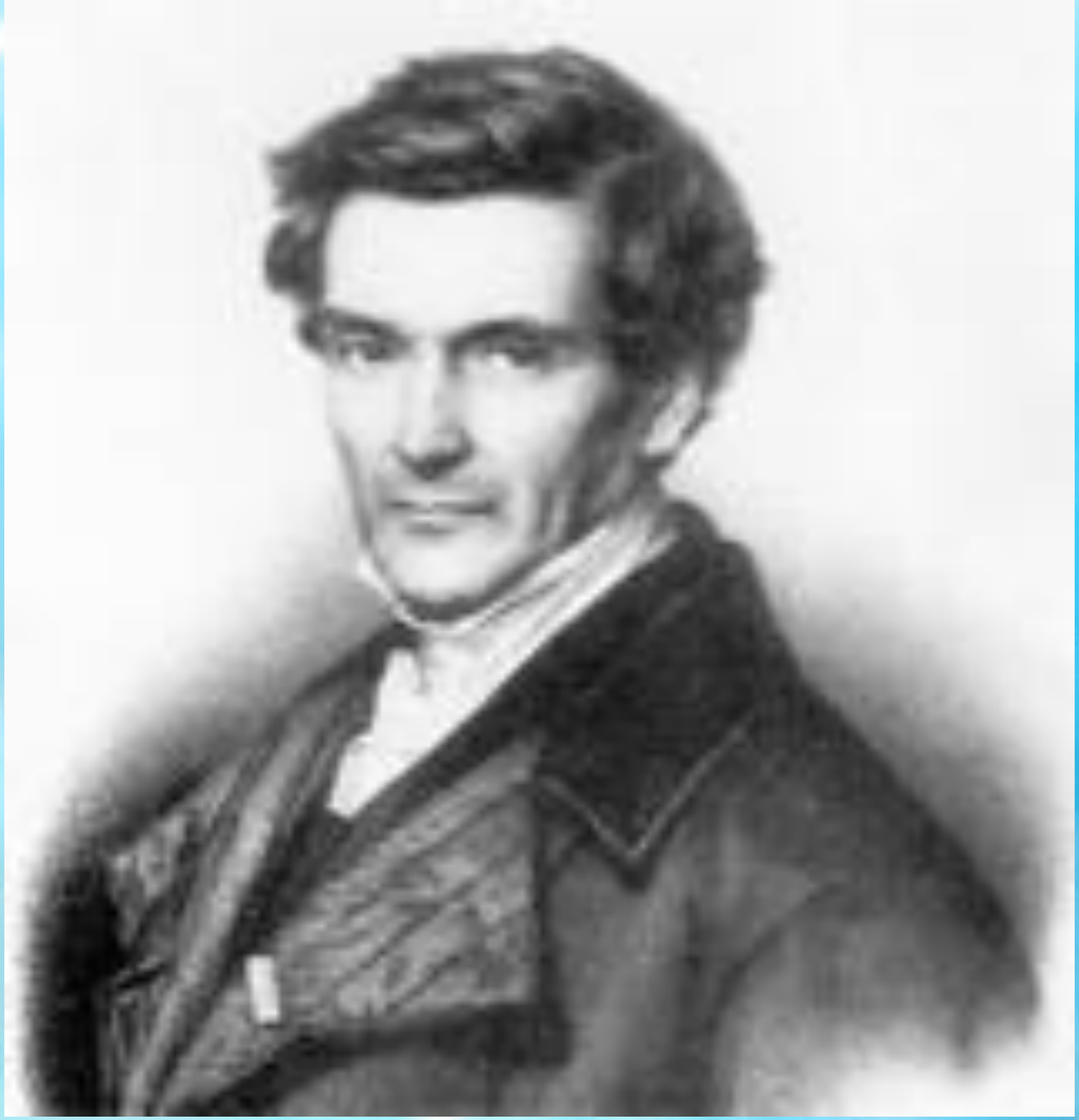
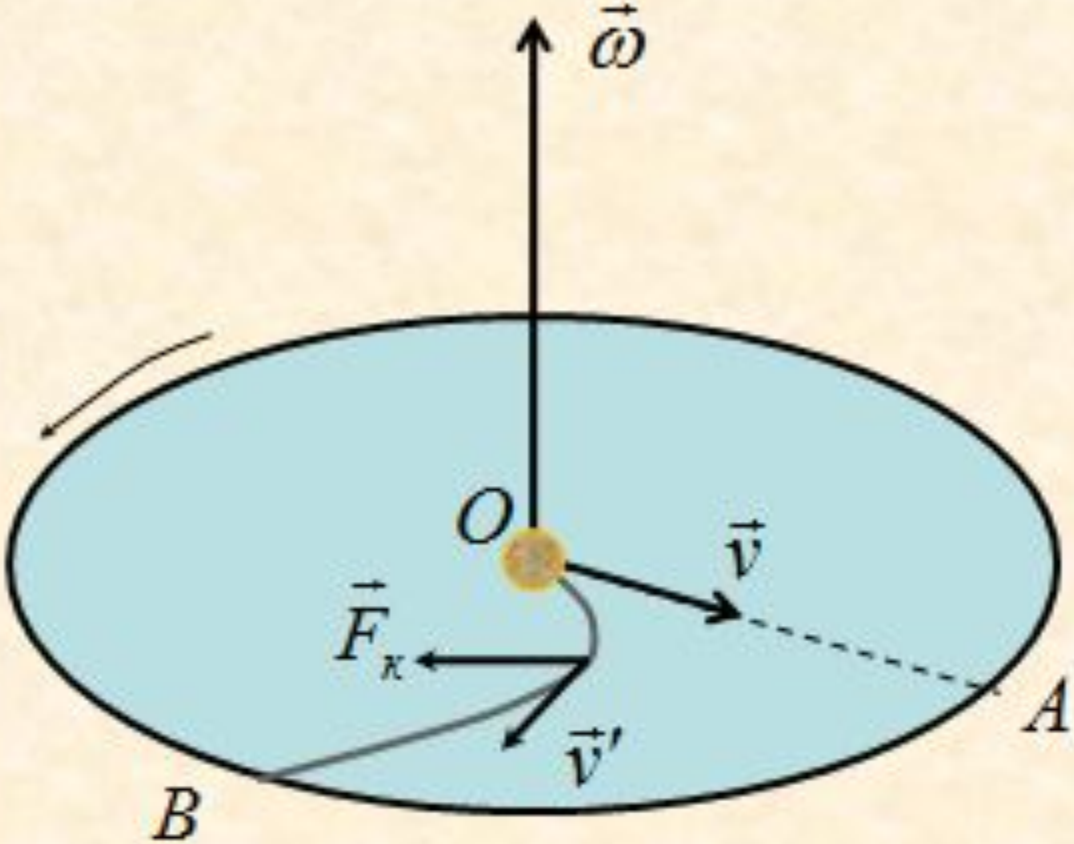


Рисунок 4.10

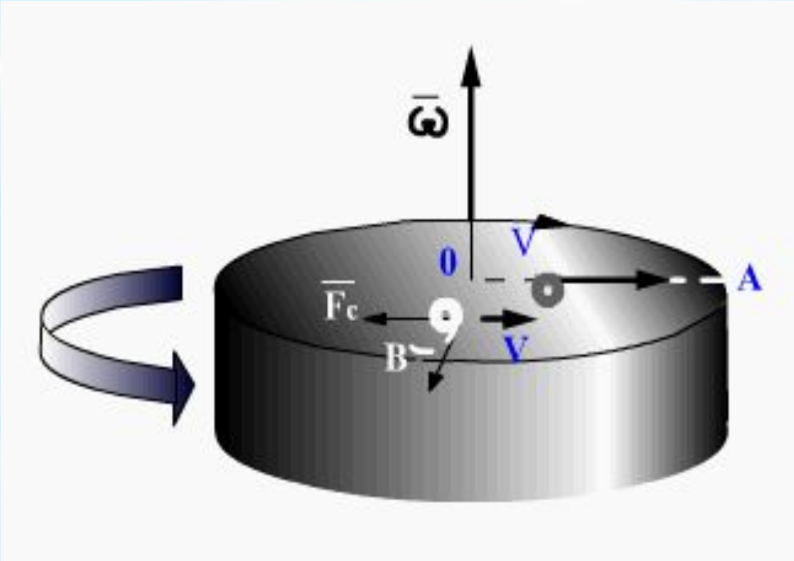
Гюстав Кориолис,
1792-1843, фр. механик

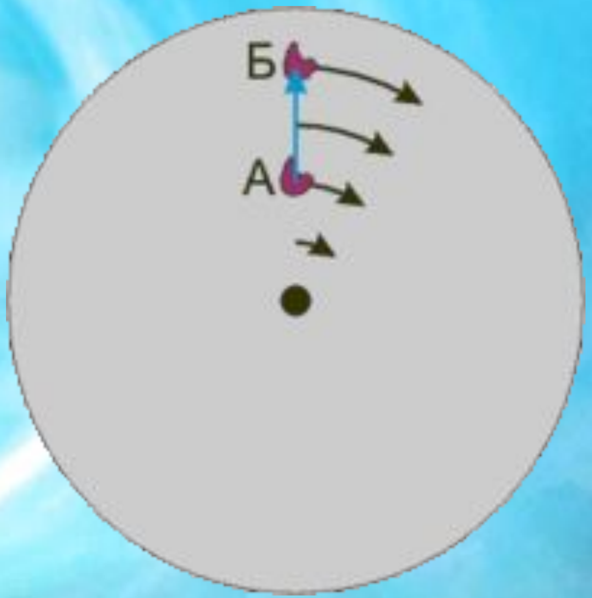




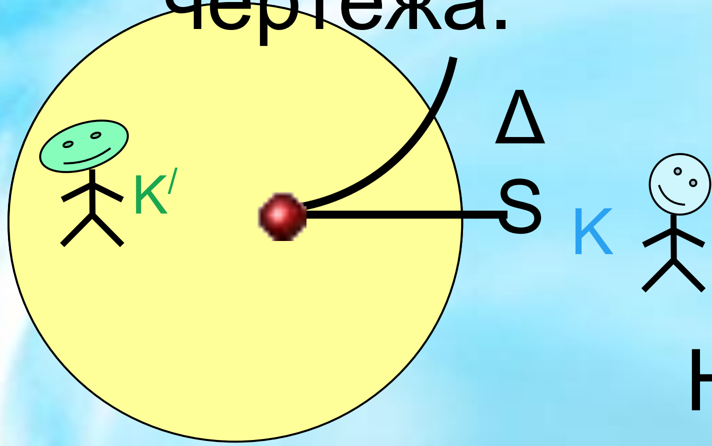
$\vec{\omega}$
O
$\vec{v}$
$\vec{F}_K$
$\vec{v}'$
A
B

При вращении диска, более далёкие от центра точки движутся с большей касательной скоростью, чем менее далёкие. Если мы хотим переместить некоторое тело вдоль радиуса, так, чтобы оно оставалось на радиусе, то нам придётся увеличить скорость тела, то есть, придать ему ускорение. Если наша система отсчёта вращается вместе с диском, то мы ощутим, что тело «не хочет» оставаться на радиусе, а «норовит» уйти влево — это и есть сила Кориолиса.





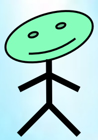
Ось вращения $\perp$ плоскости чертежа.



Путь $\Delta S = \omega r t$, $r = vt$, где v скорость движения шарика по радиусу

$\Delta S = v\omega t^2$

Но путь через ускорение равен $\Delta S = a_k t^2/2$.



$K^/$ - наблюдатель в $K^/$ *(подвижная)*

K - наблюдатель в системе K *(неподвижная)*

Отсюда $a_k = 2v\omega$

Это и есть сила Кориолиса $F_k = 2mv\omega$

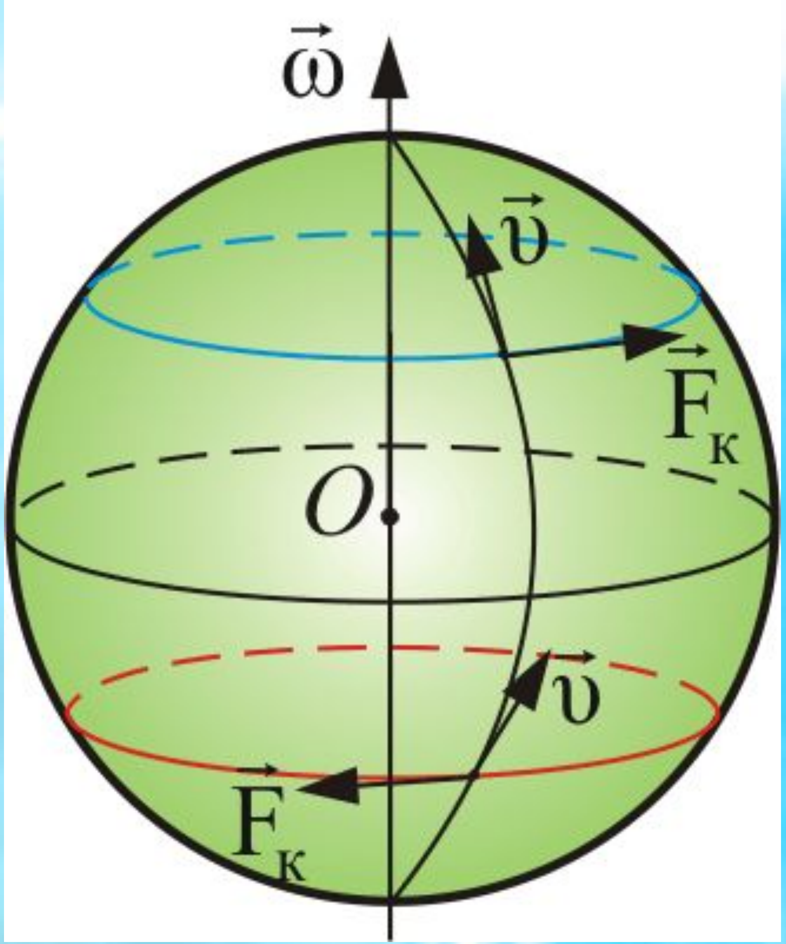
В векторном виде сила Кориолиса имеет вид:

$$\mathbf{F}_k = -2m[\mathbf{v}\boldsymbol{\omega}]$$

Земной шар вращается *против часовой стрелки*, если смотреть на него «сверху», на Северный полюс.

Движущиеся тела в северном полушарии отклоняются вправо.

Сила Кориолиса, действует на тело, *движущееся вдоль меридиана* в северном полушарии вправо и в южном – влево.



Это приводит к тому, что у рек подмывается всегда правый берег в североом полушарии и левый – в южном.

Эти же причины объясняют неодинаковый износ рельсов железнодорожных путей.

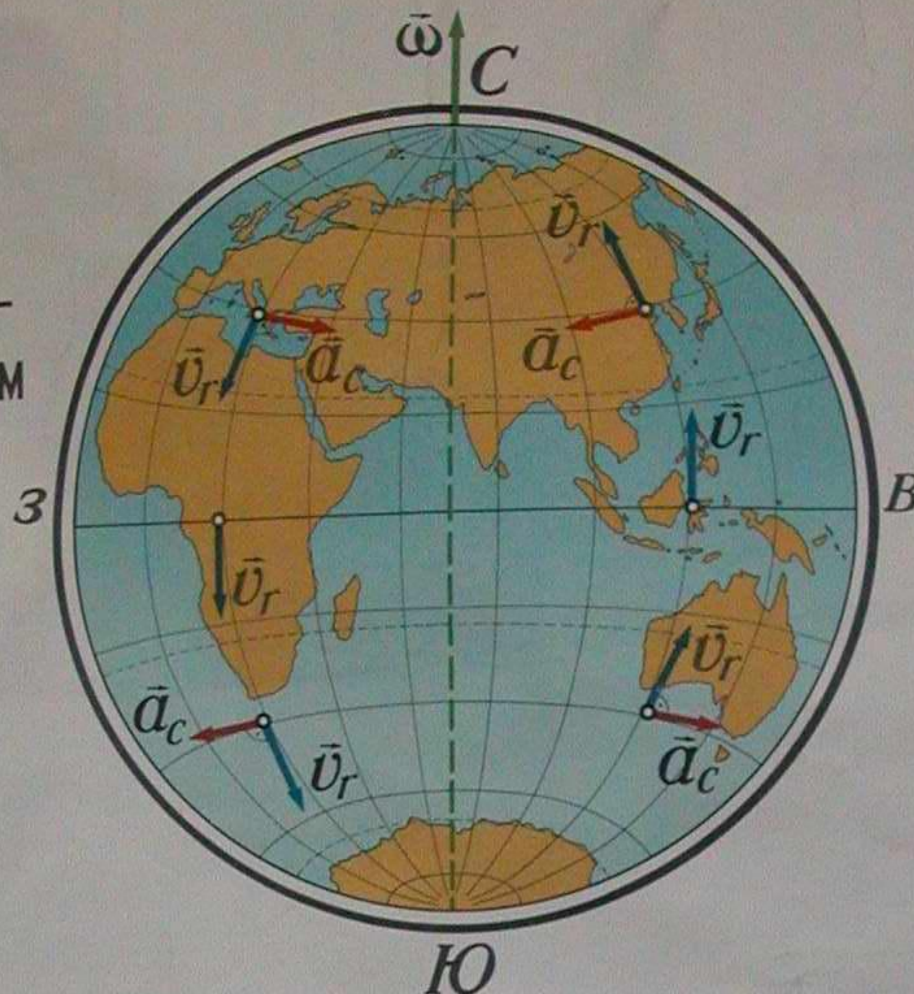
Силы Кориолиса проявляются и при качаниях маятника (маятник Фуко). Для простоты предположим, что маятник расположен на полюсе:

НАПРАВЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА

УСКОРЕНИЕ КОРИОЛИСА ВЫРАЖАЕТСЯ УДВОЕННЫМ ВЕКТОРНЫМ ПРОИЗВЕДЕНИЕМ ВЕКТОРА $\bar{\omega}$ НА ВЕКТОР $\bar{v}_r$:

$$\bar{a}_c = 2(\bar{\omega} \times \bar{v}_r)$$

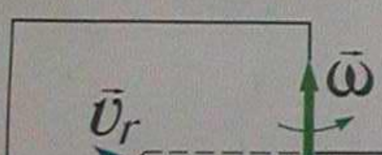
СЛЕДОВАТЕЛЬНО:



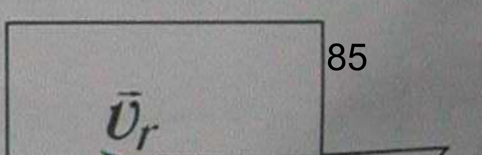
$\bar{a}_c$ НАПРАВЛЕНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ЭТИМ ВЕКТОРАМ В ТАКУЮ СТОРОНУ, ОТКУДА УГОЛ γ, СОСТАВЛЯЕМЫЙ $\bar{\omega}$ С $\bar{v}_r$, ПОЛОЖИТЕЛЕН И МЕНЬШЕ π

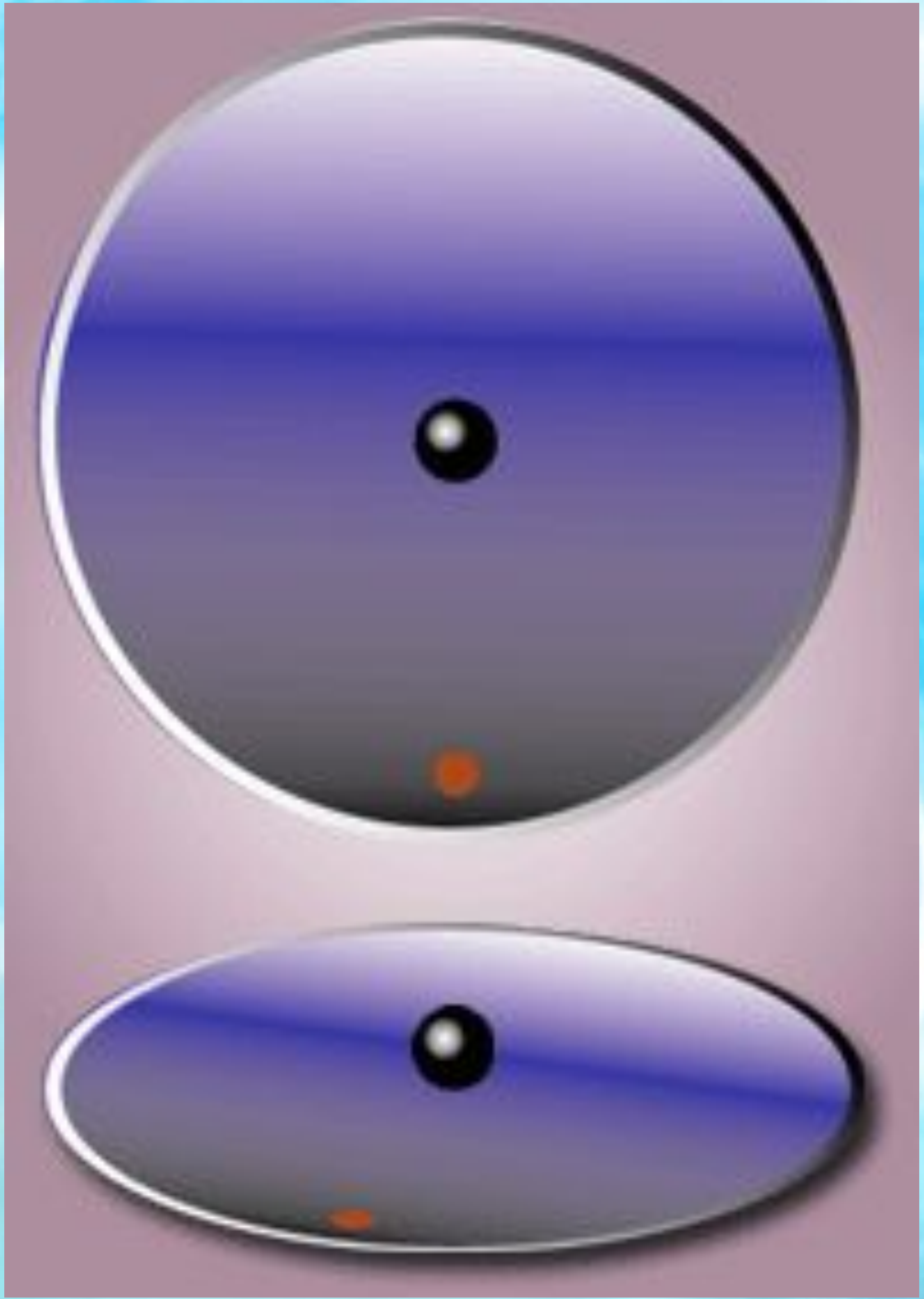
$$0 < \gamma < 180^\circ$$

ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА НАДО:



1. СПРОЕКТИРОВАТЬ $\bar{v}_r$ НА ПЛОСКОСТЬ ПЕРПЕНДИКУ-





Сила Кориолиса

$$F_K = m\omega^2 R$$

$$\vec{F}_K = 2m\left[\vec{v}' \times \vec{\omega}\right]$$

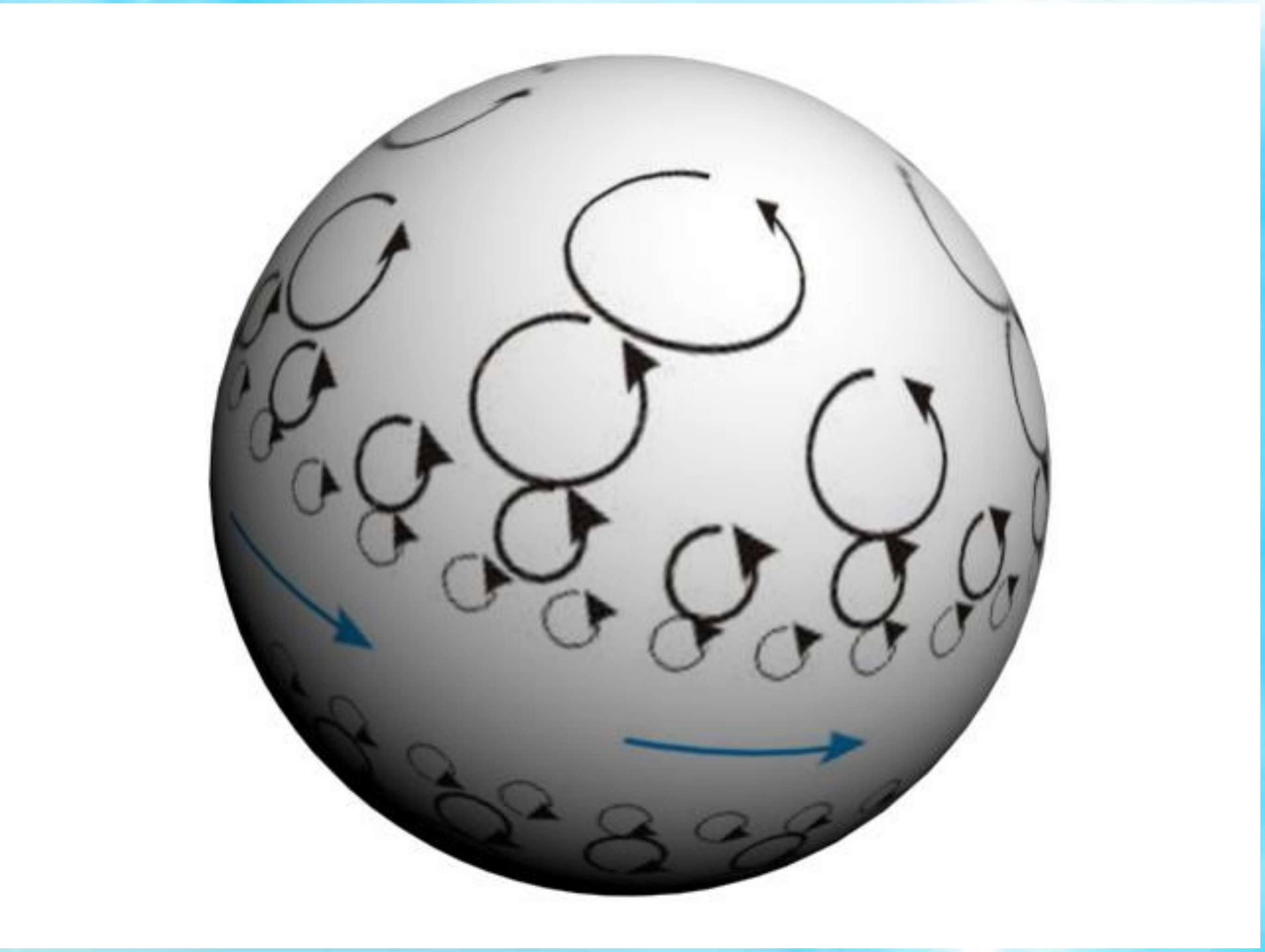
Проявление действия силы Кориолиса:

1.В северном полушарии наблюдается более сильное подмывание правых берегов рек;

2.Правые рельсы железнодорожных путей по движению изнашиваются быстрее, чем левые;

3. Циклоны вращаются по часовой стрелке.

В южном полушарии все происходит наоборот.



Схематическое изображение процесса образования циклонов (чёрные стрелки) из-за вращения Земли (синие стрелки).

4. При выстреле из орудия, направленного на север, снаряд будет отклоняться к востоку в северном полушарии и к западу в южном. При стрельбе вдоль экватора силы Кориолиса будут прижимать снаряд к земле, если выстрел произведен на запад, и поднимать кверху, если выстрел произведен в восточном направлении.

5. Движение маятника Фуко.

Леон Фуко,
1819-1868, фр. физик

Маятник Фуко в Парижском Пантеоне

С учетом всех сил инерции, уравнение Ньютона для неинерциальной системы отсчета примет вид:

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}} + \vec{F}_{\text{цб}} + \vec{F}_{\text{к}}, \quad (4.5.7)$$

$\vec{F}_{\text{ин}}$ – сила инерции, обусловленная поступательным движением неинерциальной системы отсчета;

$\vec{F}_{\text{цб}} + \vec{F}_{\text{к}}$ – две силы инерции, обусловленные вращательным движением системы отсчета;

$\vec{a}'$ – ускорение тела относительно неинерциальной системы.

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a},$$

$$\vec{F}_{\text{к}} = 2m[\vec{\upsilon}, \vec{\omega}],$$

$$\vec{F}_{\text{цб}} = m\vec{a}_n.$$

Вывод:

1.К силам инерции *не применим 3–й закон Ньютона*.

2.Силы инерции действуют на тело только в неинерциальной системе отсчёта.

3.Для неинерциальной системы отсчёта *сила инерции является внешней*. Следовательно здесь *нет замкнутых систем* и поэтому *законы сохранения не выполняются*.

4. В инерциальных системах сил инерции вообще нет.

5.Сила инерции, как и сила тяготения пропорциональна массе тела, поэтому *в поле сил тяготения, как и в поле сил инерции, все тела движутся с одним и тем же ускорением.* Никакими опытами невозможно отличить движется тело в поле сил тяготения или в поле сил инерции. **Это - *«принцип эквивалентности»* Эйнштейна. Этот принцип лежит в основе ОТО (общей теории относительности).**

Лекция окончена!!!