Лекция 11. СИЛЫ ИНЕРЦИИ

1.Уравнения Ньютона для неинерциальной системы отсчета

22.2. Центростремительная и центробежная силы

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 спокойно стоите в троллейбусе. Вдруг троллейбус резко трогается, и вы невольно отклоняетесь 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 инерциальной системе отсчета. Но это не всегда просто, так как обязательно нужно вводить силы, действующие со стороны ***связей***.

Они могут быть самыми разными и ведут себя по разному – нет единого подхода к их описанию.

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 обусловлены не взаимодействием тел, а свойствами самих неинерциальных систем отсчета. На силы инерции законы Ньютона не распространяются**.**

Найдем количественное выражение для 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:

$$\boxed{\vec{a} = \vec{a}^{\,*} + \vec{a}\,'.} \qquad (11.1)$$

Ускорение в инерциальной системе можно выразить через второй закон Ньютона

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

где m – масса движущегося тела, или

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

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

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

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

$$\vec{\mathbf{F}}_{ин} = -m\vec{\mathbf{a}}^{*}$$

тогда получим

$$\boxed{m\vec{\mathbf{a}}' = \vec{\mathbf{F}} + \vec{\mathbf{F}}_{ин}} \qquad (13.1)$$

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

Здесь $\vec{\mathbf{F}}_{ин}$ – 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 закону действия и противодействия. Движение 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 обусловлены ускоренным движением системы отсчета относительно измеряемой системы, поэтому в общем случае нужно учитывать следующие случаи проявления этих сил: 1) силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета; 2) силы инерции, действующие на тело, покоящееся во вращающейся системе отсчета; 3) силы инерции, действующие на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета.

Рассмотрим эти случаи.

1. **Силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета.** Пусть на тележке к штативу на нити подвешен шарик массой m (рис. 13.1). Пока тележка покоится или движется равномерно и прямолинейно, нить, удерживающая шарик, занимает вертикальное положение и сила тяжести **P** уравновешивается реакцией нити **T**. Если тележку привести в поступательное движение

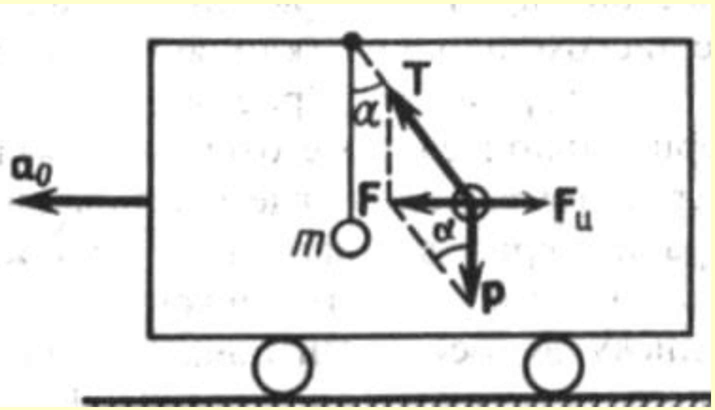


Рис. 13.1

с ускорением $\mathbf{a}_0$, то нить начнет отклоняться от вертикали назад до такого угла α, пока результирующая сила $\mathbf{F} = \mathbf{P} + \mathbf{T}$ не обеспечит ускорение шарика, равное $\mathbf{a}_0$. Таким образом, результирующая сила **F** направлена в сторону ускорения тележки $\mathbf{a}_0$ и для установившегося движения шарика (шарик теперь движется вместе с тележкой с ускорением $\mathbf{a}_0$) равна

$$F = mg\,\mathrm{tg}\alpha = ma_0,$$

откуда угол отклонения нити от вертикали

$$\mathrm{tg}\alpha = a_0/g,$$

т. е. тем больше, чем больше ускорение тележки.

Относительно системы отсчета, связанной с ускоренно движущейся тележкой, шарик покоится, что возможно, если сила F уравновешивается равной и противоположно направленной ей силой $F_и$ которая является ни чем иным, как силой инерции, так как на шарик никакие другие силы не действуют. Таким образом,

$$\mathbf{F}_и = -m\mathbf{a}_0. \qquad (13.1.1)$$

Проявление сил инерции при поступательном движении имеет место в повседневных явлениях. Например, когда поезд набирает скорость, то пассажир, сидящий по ходу поезда, под действием силы инерции прижимается к спинке сиденья. Наоборот, при торможении поезда сила инерции направлена в противоположную сторону и пассажир отделяется от спинки сиденья. Особенно эти силы заметны при внезапном торможении поезда. Силы инерции проявляются в перегрузках, которые возникают при запуске и торможении космических кораблей.

2. **Силы инерции, действующие на тело, покоящееся во вращающейся системе отсчета.** Пусть диск равномерно вращается с угловой скоростью ω (ω = const) вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр. На диске, на разных расстояниях от оси вращения, установлены маятники (на нитях подвешены шарики массой m). При вращении маятников вместе с диском шарики отклоняются от вертикали на некоторый угол (рис. 13.2).

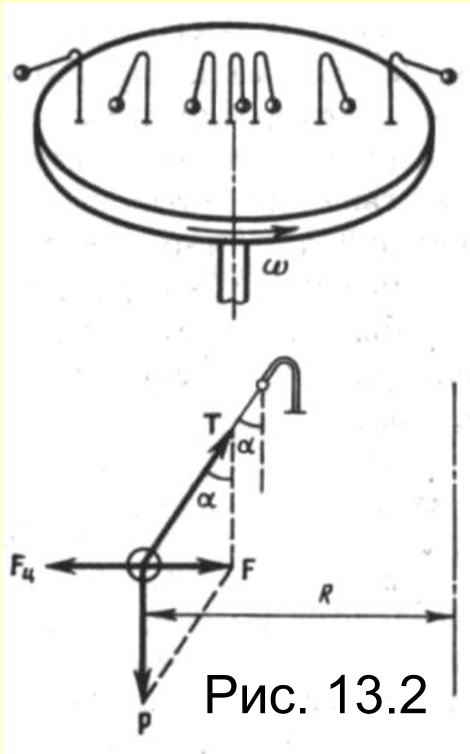


Рис. 13.2

В инерциальной системе отсчета, связанной, например, с помещением, где установлен диск, шарик равномерно вращается по окружности радиуса R (расстояние от точки крепления маятника к диску до оси вращения). Следовательно, на него действует сила, равная $\boldsymbol{F = m\omega^2 R}$ и направленная перпендикулярно оси вращения диска. Она является равнодействующей силы тяжести (**P**) и силы натяжения нити (**T**): $\mathbf{F} = \mathbf{P} + \mathbf{T}$. Когда движение шарика установится, то $F = mg\,\mathrm{tg}\alpha = m\omega^2 R$, откуда

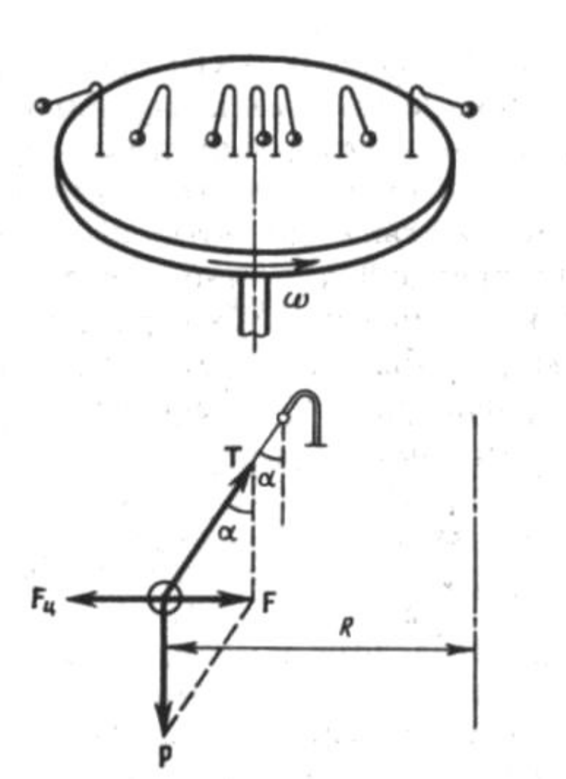


Рис. 13.2

$$\mathrm{tg}\alpha = \omega^2 R/g,$$

т. е. углы отклонения нитей маятников будут тем больше, чем больше расстояние R от шарика до оси вращения диска и чем больше угловая скорость вращения ω.

Шарик покоится относительно системы отсчета, связанной с вращающимся диском, если сила **F** будет уравновешена равной и противоположно направленной ей силой $\mathbf{F}_ц$, которая является ни чем иным, как силой инерции, так как на шарик никакие другие силы не действуют. Сила $F_ц$, называемая центробежной силой инерции, направлена по горизонтали от оси вращения диска и равна

$$F_ц = -m\omega^2 R. \quad (13.1.2)$$

Действию центробежных сил инерции подвергаются, например, пассажиры в движущемся транспорте на поворотах, летчики при выполнении фигур высшего пилотажа; центробежные силы инерции используются во всех центробежных механизмах: насосах, сепараторах и т. д., где они достигают огромных значений. При проектировании быстро вращающихся деталей машин (роторов, винтов самолетов и т. д.) принимаются специальные меры для уравновешивания центробежных сил инерции.

Из формулы (13.1.2) вытекает, что центробежная сила инерции, действующая на тела во вращающихся системах отсчета в направлении радиуса от оси вращения, зависит от угловой скорости вращения ω системы отсчета и радиуса R, но не зависит от скорости тел относительно вращающихся систем отсчета. Следовательно, центробежная сила инерции действует во вращающихся системах отсчета на все тела, удаленные от оси вращения на конечное расстояние, независимо от того, покоятся ли они в этой системе (как мы предполагали до сих пор) или движутся относительно нее с какой-то скоростью.

3. Силы инерции, действующие на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета. Пусть шарик массой m движется с постоянной скоростью v' вдоль радиуса равномерно вращающегося диска (v' = const, ω = const, $v' \perp \omega$). Если диск не вращается, то шарик, направленный вдоль радиуса, движется по радиальной прямой и попадает в точку *A*, если же диск привести во вращение в направлении, указанном стрелкой, то шарик катится по кривой *OB* (рис. 13.3, *а*), причем его скорость v' относительно диска изменяет свое направление. Это возможно лишь тогда, если на шарик действует сила, перпендикулярная скорости v'.

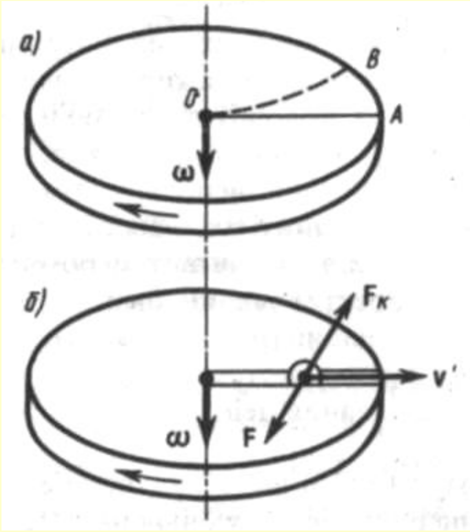


Рис. 13.3

Для того чтобы заставить шарик катиться по вращающемуся диску вдоль радиуса, используем жестко укрепленный вдоль радиуса диска стержень, на котором шарик движется без трения равномерно и прямолинейно со скоростью v' (рис. 13.3, *б*).

При отклонении шарика стержень действует на него с некоторой силой **F**. Относительно диска (вращающейся системы отсчета) шарик движется равномерно и прямолинейно, что можно объяснить тем, что сила **F** уравновешивается приложенной к шарику силой инерции $F_к$, перпендикулярной скорости υ' . Эта сила называется кориолисовой силой инерции.

Можно показать, что сила Кориолиса*

$$\mathbf{F}_к = 2m\,[\upsilon'\,\omega]. \qquad (13.1.3)$$

Вектор $\mathbf{F}_к$ перпендикулярен векторам скорости **v'** тела и угловой скорости вращения **ω** системы отсчета. Его направление определяется правилом правого винта.

Сила Кориолиса действует только на тела, движущиеся относительно вращающейся системы отсчета, например относительно Земли. Поэтому действием этих сил объясняется ряд наблюдаемых на Земле явлений.

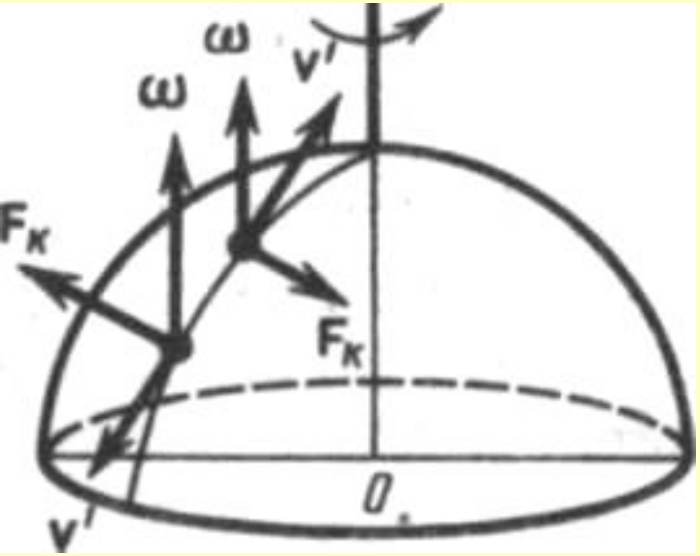
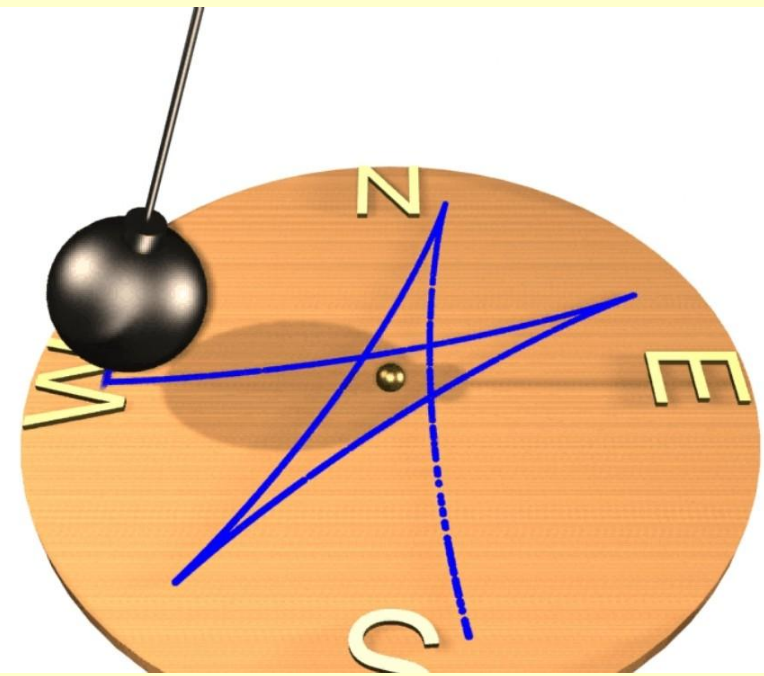


Рис. 13.4

Так, если тело движется в северном полушарии на север (рис. 13.4), то действующая на него сила Кориолиса, как это следует из выражения (13.1.3), будет направлена вправо по отношению к направлению движения, т. е. тело несколько отклонится на восток. Если тело движется на юг, то сила Кориолиса также действует вправо, если смотреть по направлению движения, т. е. тело

отклонится на запад. Поэтому в северном полушарии наблюдается более сильное подмывание правых берегов рек; правые рельсы железнодорожных путей по движению изнашиваются быстрее, чем левые, и т. д. Аналогично можно показать, Что в южном полушарии силы Кориолиса, действующие на движущиеся тела, будут направлены влево по отношению к направлению движения.

Благодаря силе Кориолиса падающие на поверхность Земли тела отклоняются к востоку (на широте 60^0 это отклонение должно составлять 1 см при падении с высоты 100 м). С силой Кориолиса связано поведение маятника Фуко, явившееся в свое время одним из доказательств вращения Земли. Если бы этой силы не было, то плоскость колебаний качающегося вблизи поверхности Земли маятника оставалась бы неизменной (относительно Земли).



Действие же сил Кориолиса приводит к вращению плоскости колебаний вокруг вертикального направления.

Раскрывая содержание $\mathbf{F}_{ин}$ в формуле (13.1), получим основной закон динамики для неинерциальных систем отсчета:

$$m\mathbf{a}' = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{и} + \mathbf{F}_{ц} + \mathbf{F}_{к},$$

где силы инерции задаются формулами (13.1.1) - (13.1.3).

Обратим еще раз внимание на то, что силы инерции вызываются не взаимодействием тел, а ускоренным движением системы отсчета: Поэтому они не подчиняются третьему закону Ньютона, так как, если на какое-либо тело действует сила инерции, то не существует противодействующей силы, приложенной к данному телу. Два основных положения механики, согласно которым ускорение всегда вызывается силой, а сила всегда обусловлена взаимодействием между телами, в системах отсчета, движущихся с ускорением, одновременно не выполняются.

Для любого из тел, находящегося в неинерциальной системе отсчета, силы инерции являются внешними; следовательно, здесь нет замкнутых систем. Это означает, что

в неинерциальньдх системах отсчета не выполняются законы сохранения количества движения, энергии и момента количества движения.

Таким образом, силы инерции действуют только в неинерциальных системах. В инерциальных системах отсчета таких сил не существует.

Возникает вопрос о «реальности» или «фиктивности» сил инерции. В ньютоновской механике, согласно которой сила есть результат взаимодействия тел, на силы инерции можно смотреть как на «фиктивные», «исчезающие» в инерциальных системах отсчета. Однако возможна и другая их интерпретация. Так как взаимодействия тел осуществляются посредством силовых полей, то силы инерции рассматриваются как воздействия, которым подвергаются тела со стороны каких-то реальных силовых полей, и тогда их можно считать «реальными». Независимо от того, рассматриваются ли силы инерции в качестве «фиктивных» или «реальных», многие явления, о которых упоминалось в настоящем параграфе, объясняются с помощью сил инерции.

Силы инерции, действующие на тела в неинерциальной системе отсчета, пропорциональны их массам и при прочих равных условиях сообщают этим телам одинаковые ускорения. Поэтому в «поле сил инерции» эти тела движутся совершенно одинаково, если только одинаковы начальные условия. Тем же свойством обладают тела, находящиеся под действием сил поля тяготения.

При некоторых условиях силы инерции и силы тяготения невозможно различить. Например, движение тел в равноускоренном лифте происходит точно так же, как и в неподвижном лифте, висящем в однородном поле тяжести. Никакой эксперимент, выполненный внутри лифта, не может отделить однородное поле тяготения от однородного поля сил инерции.

Аналогия между силами тяготения и силами инерции лежит в основе принципа эквивалентности гравитационных сил и сил инерции (принципа эквивалентности Эйнштейна): все физические явления в поле тяготения происходят совершенно так же, как и в соответствующем поле сил инерции, если напряженности обоих полей в соответствующих точках пространства совпадают, а прочие начальные условия для рассматриваемых тел одинаковы. Этот принцип является основой общей теории относительности

2. Центростремительная и центробежная силы

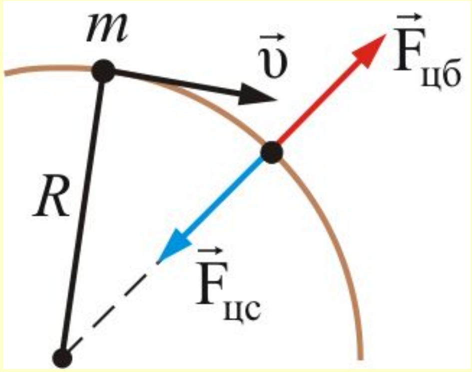
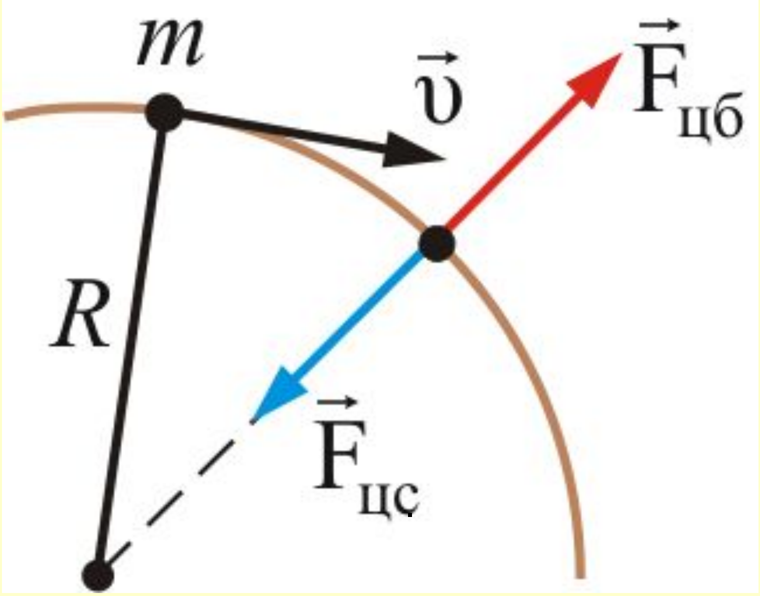


Рис. 11.1

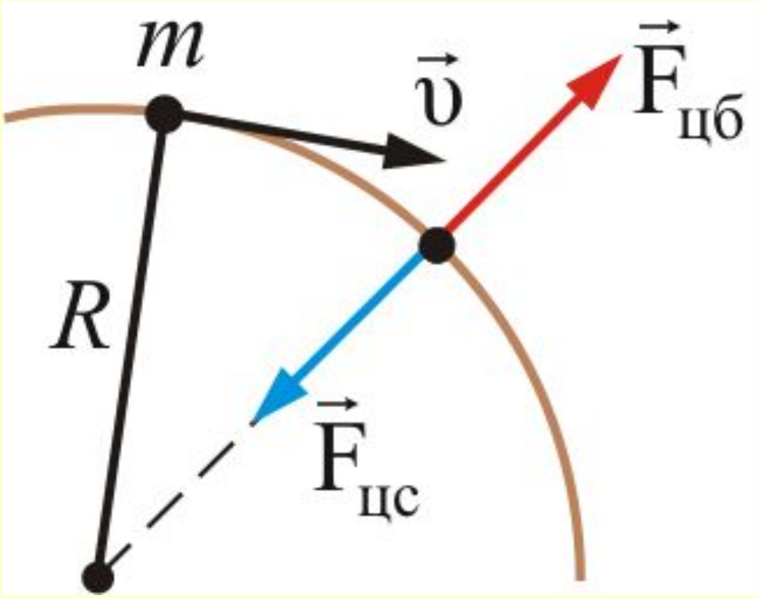
В каждый момент времени камень должен был бы двигаться прямолинейно по касательной к окружности. Однако он связан с осью вращения веревкой. Веревка растягивается, появляется упругая сила, действующая на камень, направленная вдоль веревки к центру вращения. Это и есть ***центростремительная сила*** (при вращении Земли вокруг оси в качестве центростремительной силы выступает сила гравитации).



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

$$\vec{F}_{цс} = m\vec{a}_n, \qquad (11.2)$$

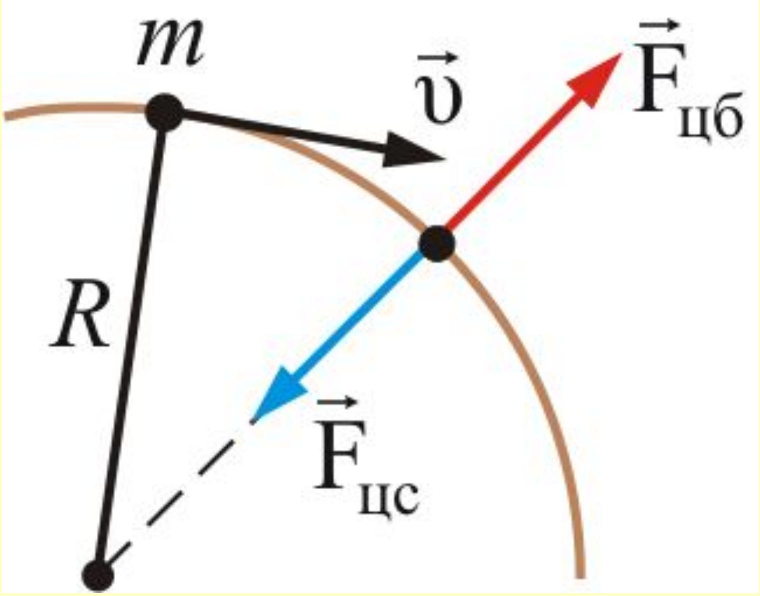
$$F_{цс} = m\frac{\upsilon^2}{R}. \qquad (11.3)$$



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.***

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

Центробежная сила – сила инерции первого рода.



$$\vec{F}_{цб} = -m\vec{a}_n,$$

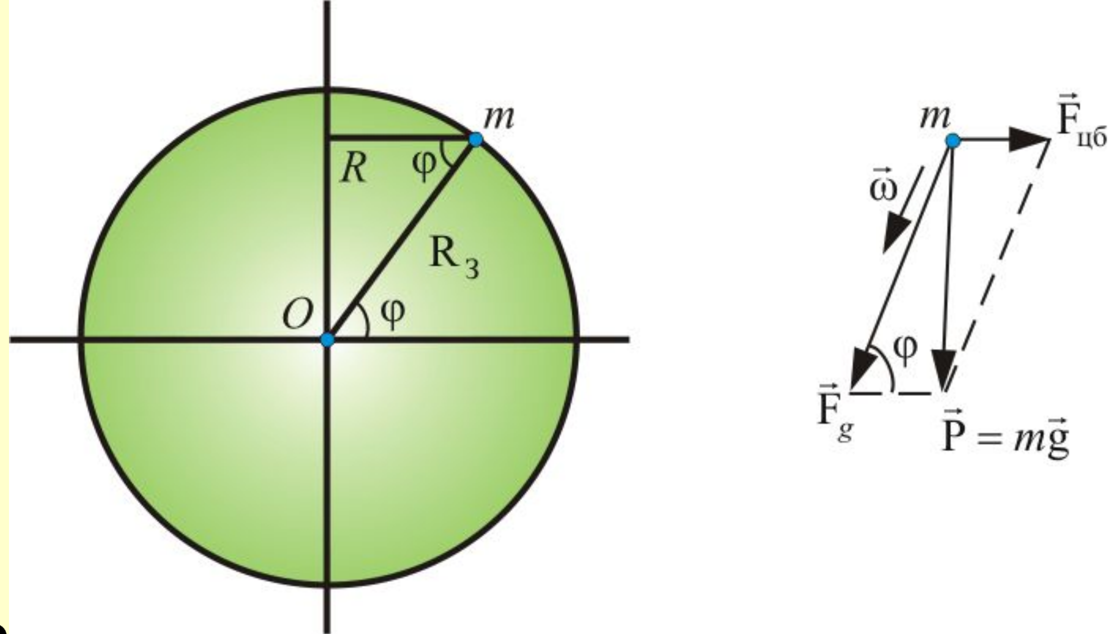
$$F_{цб} = -m\frac{\upsilon^2}{R},$$

т.к. $$a_n = \omega^2 R$$

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

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

Рис. 11.2



$$R = R_з \cos\varphi$$

(φ – широта местности)

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

где ω – угловая скорость вращения Земли. Сила тяжести есть результат сложения $\vec{F}_g$ и $\vec{F}_{цб}$

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

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

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

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

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

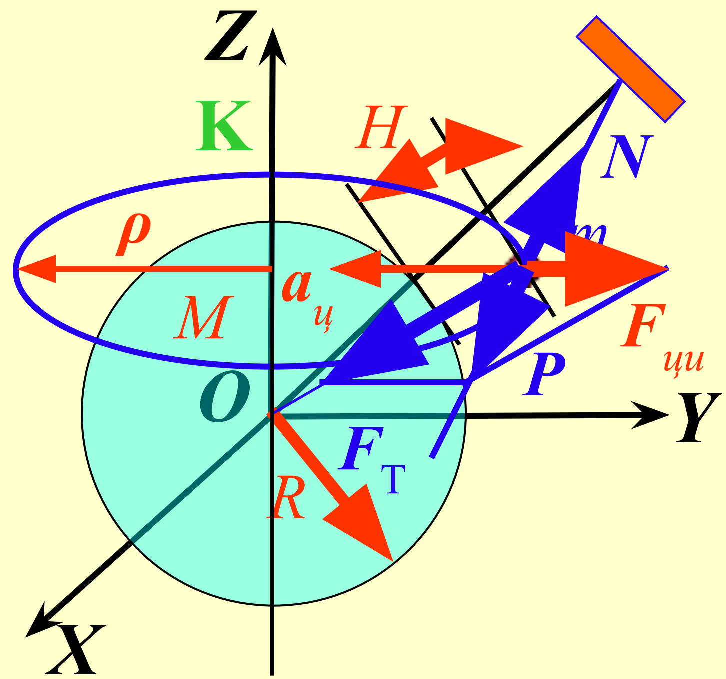
***Введем* обозначение**

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

***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***



3. Сила Кориолиса

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

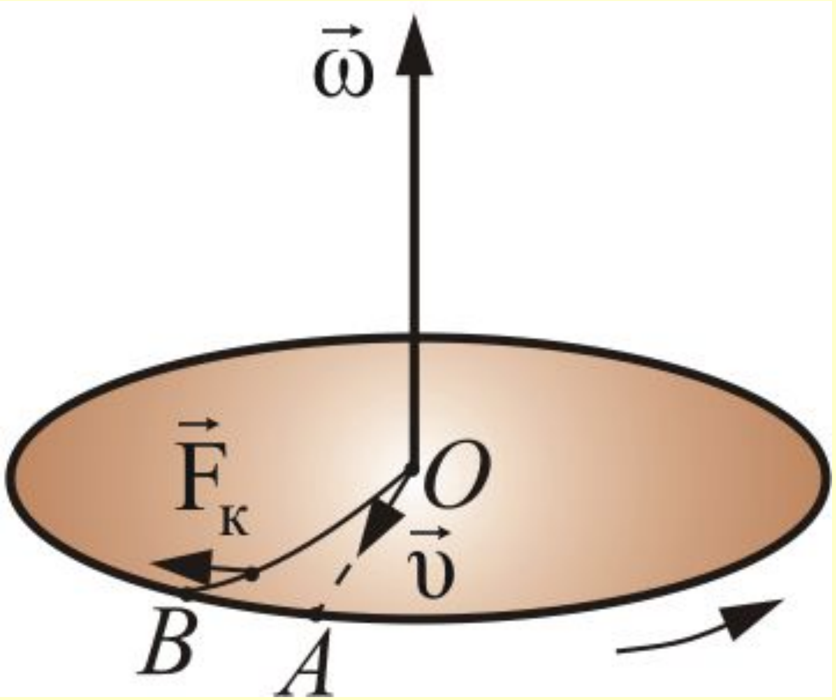
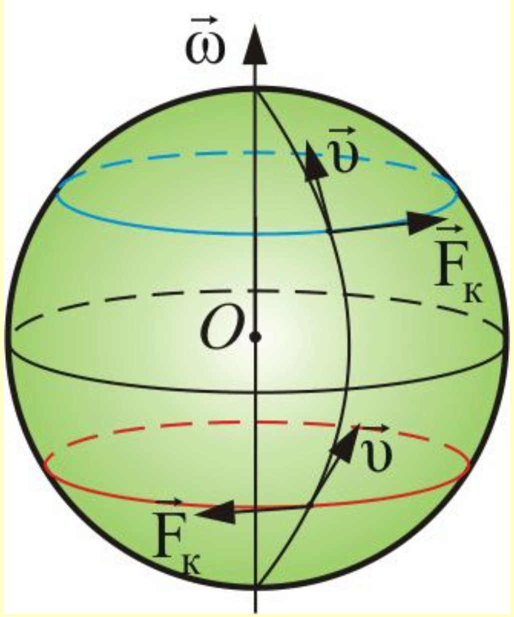


Рис. 11.3



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 севером 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:

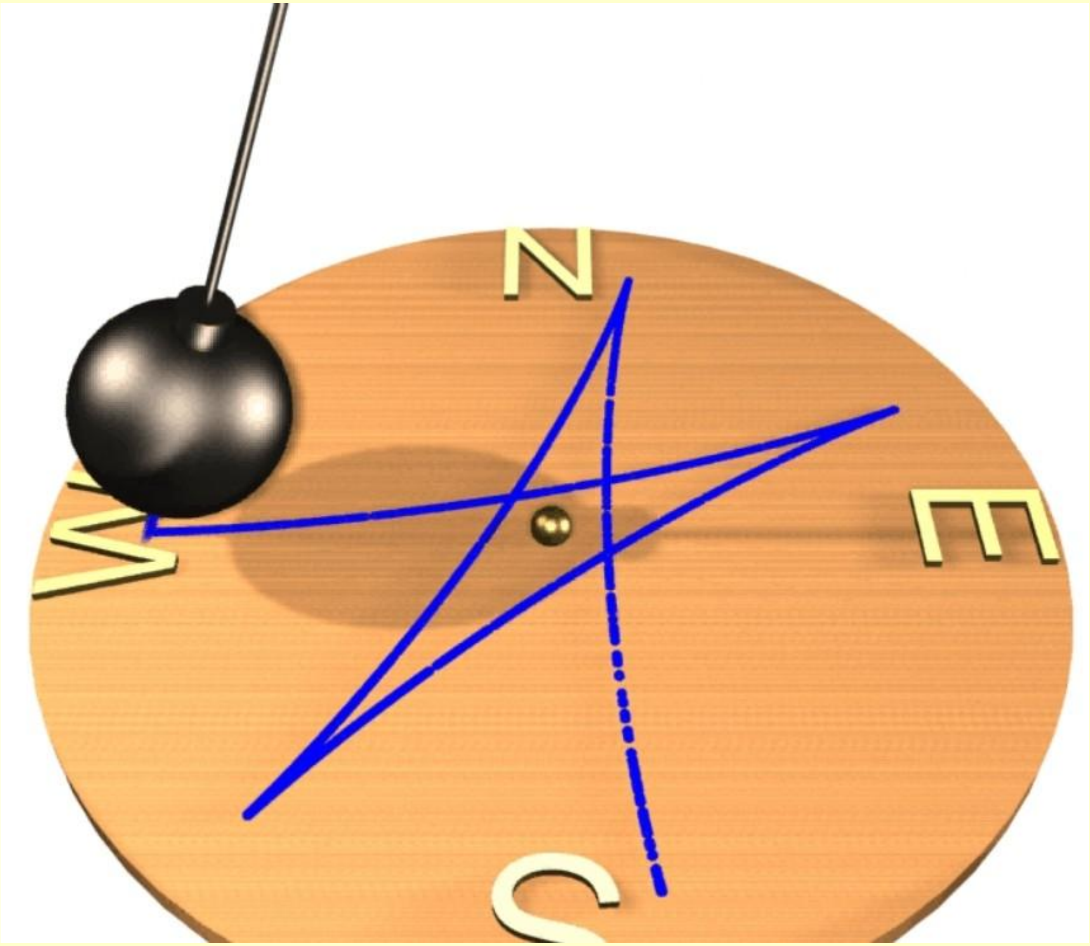


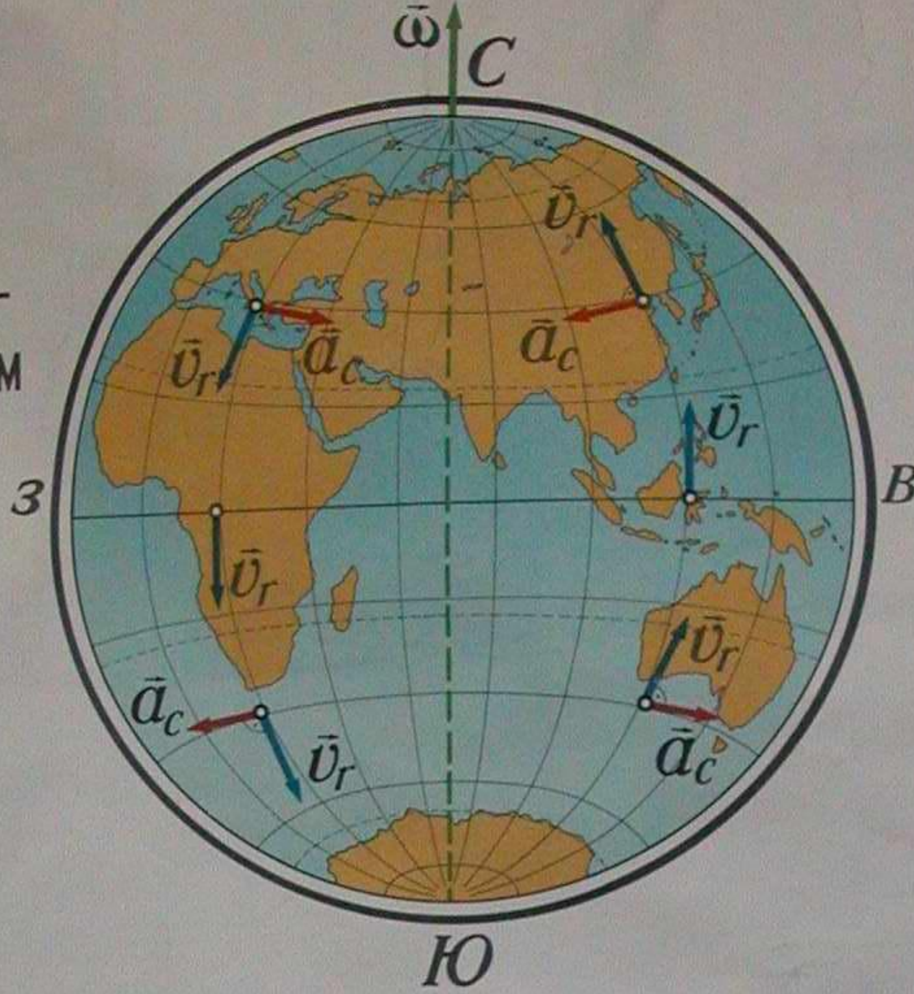
Рис. 11.4

НАПРАВЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА

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

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

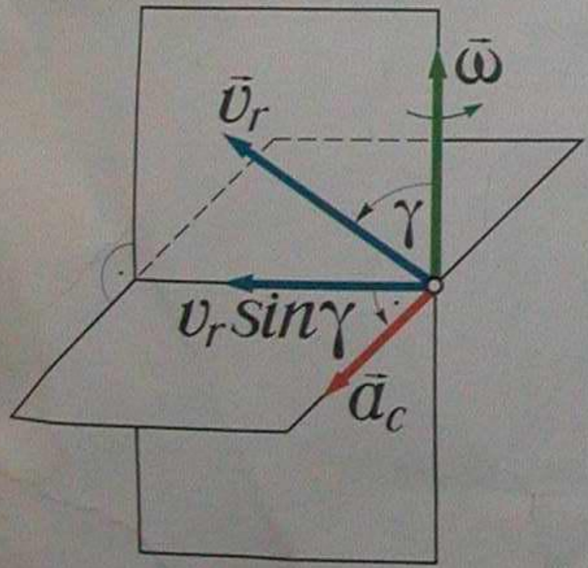
СЛЕДОВАТЕЛЬНО:



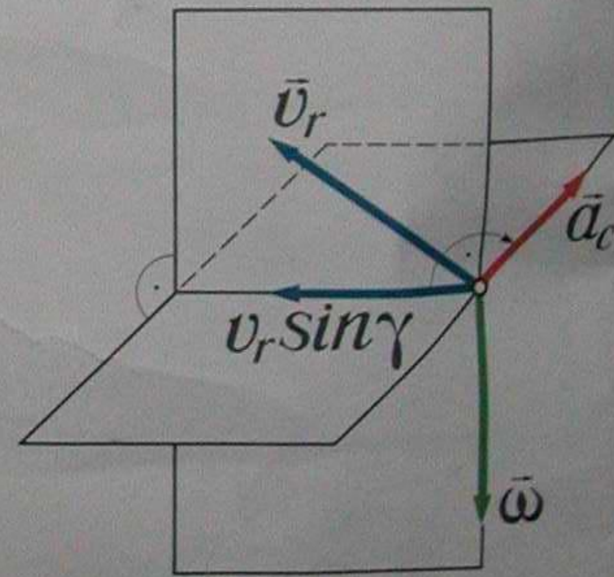
$\bar{a}_c$ НАПРАВЛЕНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ЭТИМ ВЕКТОРАМ В ТАКУЮ СТОРОНУ, ОТКУДА УГОЛ γ, СОСТАВЛЯЕМЫЙ $\bar{\omega}$ С $\bar{v}_r$, ПОЛОЖИТЕЛЕН И МЕНЬШЕ π

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

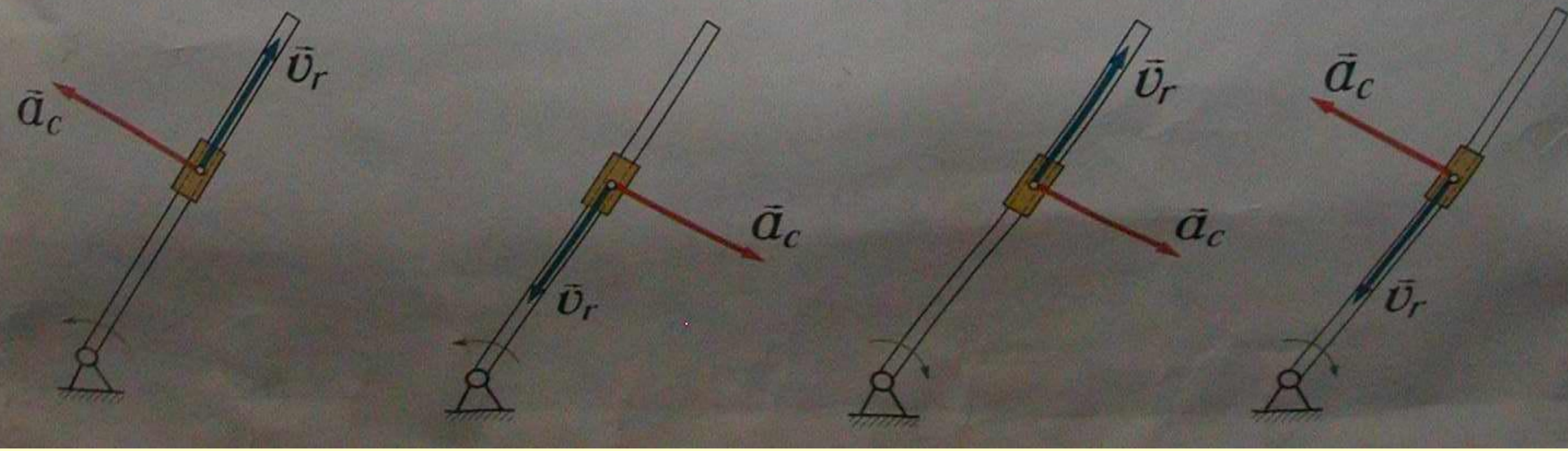
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА НАДО:



1. СПРОЕКТИРОВАТЬ $\vec{v}_r$ НА ПЛОСКОСТЬ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНУЮ $\vec{\omega}$;
2. ПОВЕРНУТЬ ПРОЕКЦИЮ В ЭТОЙ ПЛОСКОСТИ В СТОРОНУ ПЕРЕНОСНОГО ВРАЩЕНИЯ НА 90°



ЕСЛИ $\vec{v}_r \perp \vec{\omega}$, ТО ПОВЕРНУТЬ $\vec{v}_r$ НА 90° В СТОРОНУ ПЕРЕНОСНОГО ВРАЩЕНИЯ



4. Законы сохранения и их связь с симметрией пространства и времени

Три фундаментальных закона природы: *закон сохранения импульса*, *момента импульса* и *энергии*.

Следует понимать, что эти законы выполняются только в инерциальных системах отсчета. В самом деле, при выводе этих законов мы пользовались вторым и третьим законами Ньютона, а последние применимы только в инерциальных системах.

Напомним также, что импульс и момент импульса сохраняются в том случае, если систему можно считать *замкнутой* (сумма всех внешних сил, и собственно, всех моментов сил, равна нулю). Для сохранения же энергии тела условия замкнутости недостаточно – тело должно быть еще и *адиабатически изолированным* (т.е. не участвовать в теплообмене).

Во всей истории развития физики, законы сохранения оказались, чуть ли не единственными законами, сохранившими свое значение при замене одних теорий другими. Эти законы тесно связаны с основными свойствами пространства и времени.

1. В основе ***закона сохранения энергии*** лежит ***однородность времени***, т. е. равнозначность всех моментов времени (симметрия по отношению к сдвигу начала отсчета времени).

Равнозначность следует понимать в том смысле, что замена моментом времени t_1 на момент времени t_2, без изменения значений координат и скорости частиц не изменяет механические свойства системы. Это означает то, что после указанной замены, координаты и скорости частиц имеют в любой момент времен $t_2 + t$ такие же значения, какие имели до замены, в момент времени $t_1 + t$

2. В основе *закона сохранения импульса* лежит ***однородность пространства***, т. е. одинаковость свойств пространства во всех точках (симметрия по отношению к сдвигу начала координат).

Одинаковость следует понимать в том смысле, что параллельный перенос замкнутой системы из одного места пространства в другое, без изменения взаимного расположения и скоростей частиц, не изменяет механические свойства системы.

3. В основе закона сохранения момента импульса лежит ***изотропия пространства***, т. е. одинаковость свойств пространства по всем направлениям (симметрия по отношению к повороту осей координат).

Одинаковость следует понимать в том смысле, что поворот замкнутой системы, как целого, не отражается на её механических свойствах.

Между законами типа основного уравнения динамики и законами сохранения имеется принципиальная разница. Законы динамики дают нам представление о детальном ходе процесса.

Так, если задана сила, действующая на материальную точку и начальные условия, то можно найти закон движения, траекторию, величину и направление скорости в любой момент времени и т. п. Законы же сохранения не дают нам прямых указаний на то, как должен идти тот или иной процесс. Они говорят лишь о том, какие процессы запрещены и потому в природе не происходят.

*Таким образом, законы сохранения проявляются как **принципы запрета**:*

Любое явление, при котором не выполняются хотя бы один из законов сохранения, **запрещено**, *и в природе такие явления никогда не наблюдаются.*

Всякое явление, при котором не нарушается ни один из законов сохранения, в принципе может происходить.

Рассмотрим следующий пример. Может ли покоящееся тело за счет внутренней энергии начать двигаться? Этот процесс не противоречит закону сохранения энергии. Нужно лишь, чтобы возникающая кинетическая энергия точно равнялась убыли внутренней энергии.

На самом деле такой процесс никогда не происходит, ибо он противоречит закону сохранения импульса. Раз тело покоилось, то его импульс был равен нулю. А если оно станет двигаться, то его импульс сам собой увеличится, что невозможно. Поэтому внутренняя энергия тела не может превратиться в кинетическую, если тело не распадётся на части.

Если же допустить возможность распада этого тела на части, то запрет, налагаемый законом сохранения импульса, снимается.

При этом возникшие осколки могут двигаться так, чтобы их центр масс оставался в покое, – а только этого и требует закон сохранения импульса.

Итак, для того чтобы внутренняя энергия покоящегося тела могла превратиться в кинетическую, это тело должно распадаться на части. Если же есть еще один какой-либо закон, запрещающий распад этого тела на части, то его внутренняя энергия и масса покоя будут постоянными величинами.

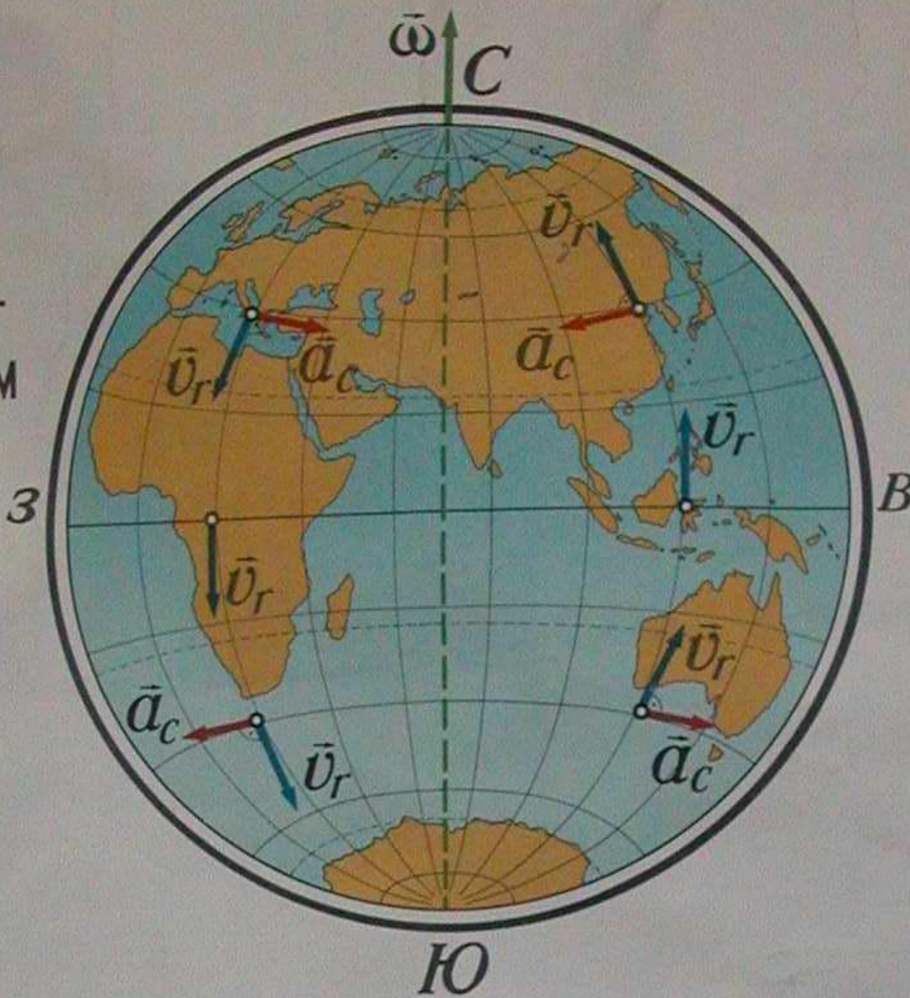
Фундаментальность законов сохранения заключается в их универсальности. Они справедливы при изучении любых физических процессов (механических, тепловых, электромагнитных, и др.). Они одинаково применимы в релятивистском и нерелятивистском движении, в микромире, где справедливы квантовые представления и в макромире.

НАПРАВЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА

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

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

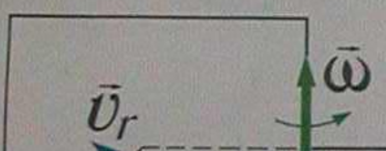
СЛЕДОВАТЕЛЬНО:



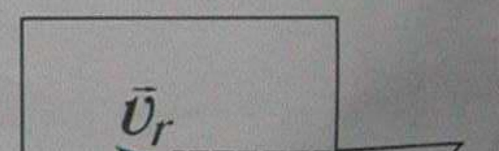
$\bar{a}_c$ НАПРАВЛЕНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ЭТИМ ВЕКТОРАМ В ТАКУЮ СТОРОНУ, ОТКУДА УГОЛ γ, СОСТАВЛЯЕМЫЙ $\bar{\omega}$ С $\bar{v}_r$, ПОЛОЖИТЕЛЕН И МЕНЬШЕ π

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

ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА НАДО:



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



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)

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, γ – 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.

Сила тяжести и вес тела

Рассмотрим небольшое тело, подвешенное на некоторой (небольшой) высоте** H **от поверхности Земли

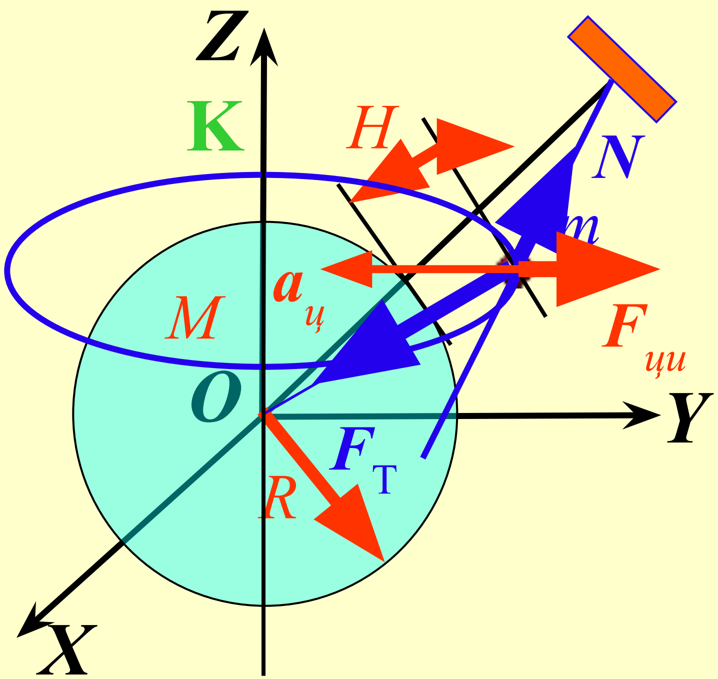
Земля **вращается** *(суточное вращение)* **– вместе с ней** *в этом вращении* **участвуют все тела на** *Земле*

За счет ***гравитационного взаимодействия*** *тела с Землей на тело действует* **сила тяжести**

***В* ИСО K,** *связанной с центром Земли, закон динамики для нашей частицы имеет вид*

$$\vec{F}_T + \vec{N} = m\vec{a}_ц$$

где ***N*** *- сила реакции нити,* ***a***$_ц$ *- центростремительное ускорение*



Поверхность Земли является* НСО,** *вращающейся с ускорением* ***a$_ц$ *– соответственно, закон динамики для такой* **НСО** *примет вид*

$$\vec{F}_T + \vec{N} + \vec{F}_{ци} = 0$$

где ***F***$_{ци}$ $= -m$***a***$_ц$ *– центробежная сила инерции*

Весом тела ***называют силу, действующую на горизонтальную опору или вертикальный подвес***

4.2. Сила тяжести и вес тела

Одна из фундаментальных сил – сила гравитации проявляется на Земле в виде ***силы тяжести*** *– 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

$$m\vec{g}$$

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 (рисунок 4.1) или положить его на опору, то сила тяжести уравновесится силой $\vec{R}$ – которую называют ***реакцией опоры или подвеса***.

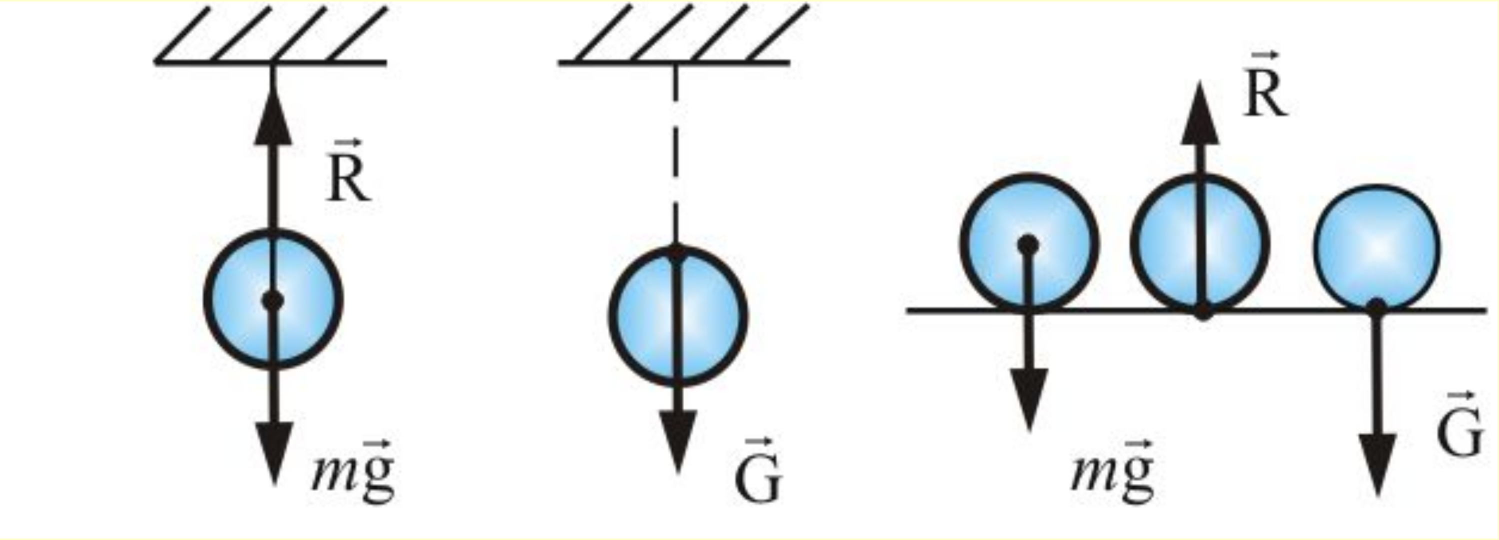
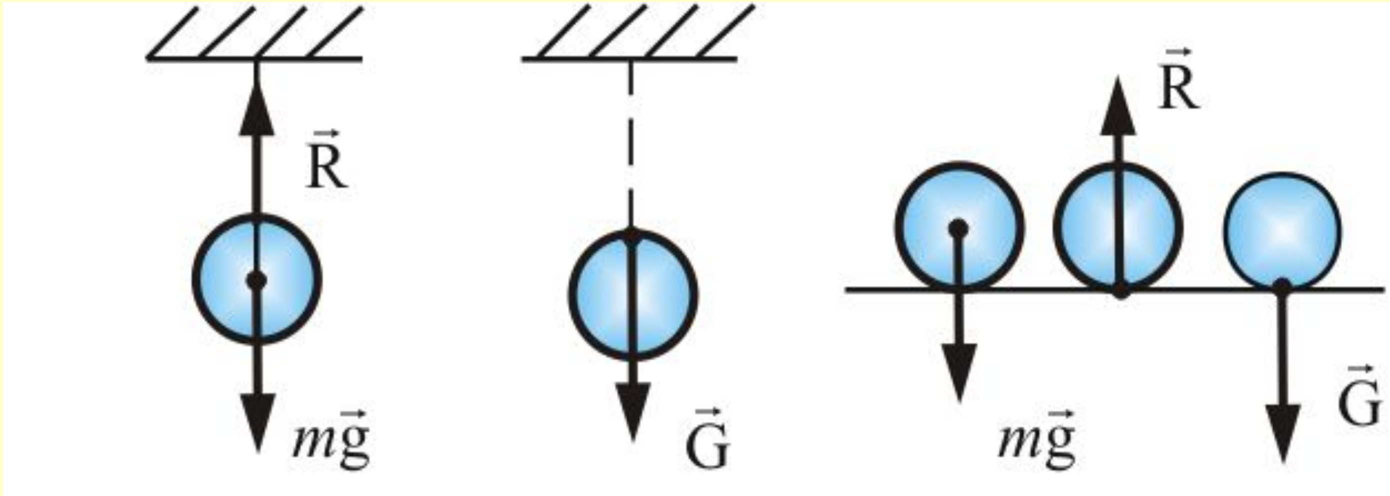


Рисунок 4.1

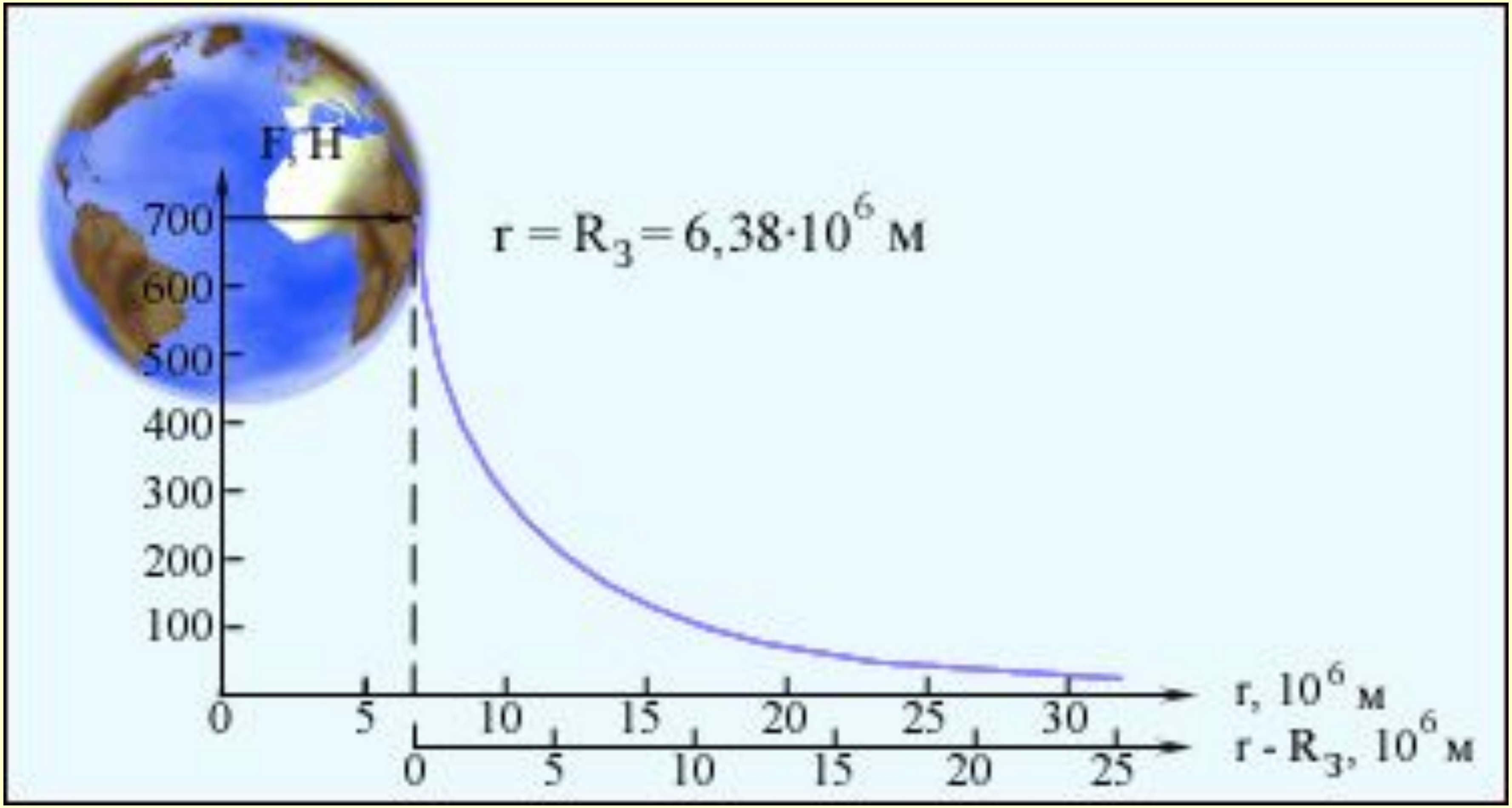


По третьему закону Ньютона тело действует на подвес или опору *с силой* $\vec{G}$ *которая называется* ***весом тела***. Поскольку силы $m\vec{g}$ и $\vec{R}$ уравновешивают друг друга, то выполняется соотношение

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

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

Значит $$\boxed{\vec{G} = m\vec{g},} \qquad (4.2.1)$$



F, H
700
600
500
400
300
200
100
r = R₃ = 6,38·10⁶ м
0
5
10
15
20
25
30
r, 10⁶ м
0
5
10
15
20
25
r - R₃, 10⁶ м

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:

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

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

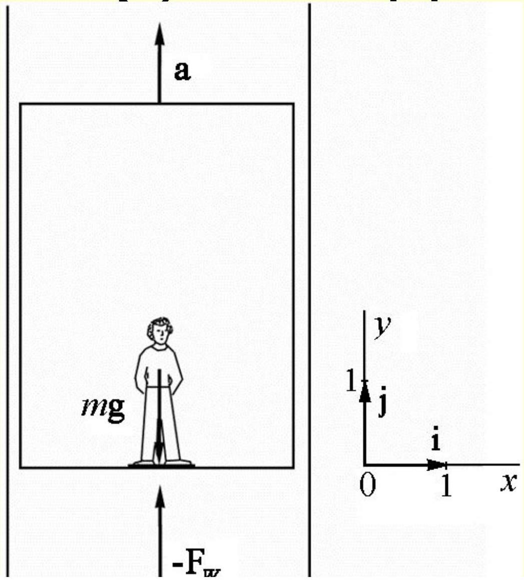
$$\boxed{G < mg}$$

и если наоборот, то $\boxed{G > mg}$

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

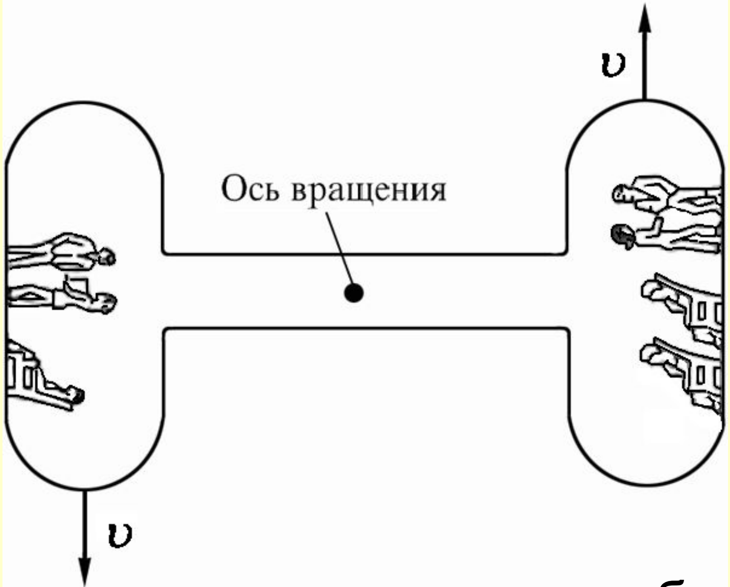
Пример: космический корабль на орбите.

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.

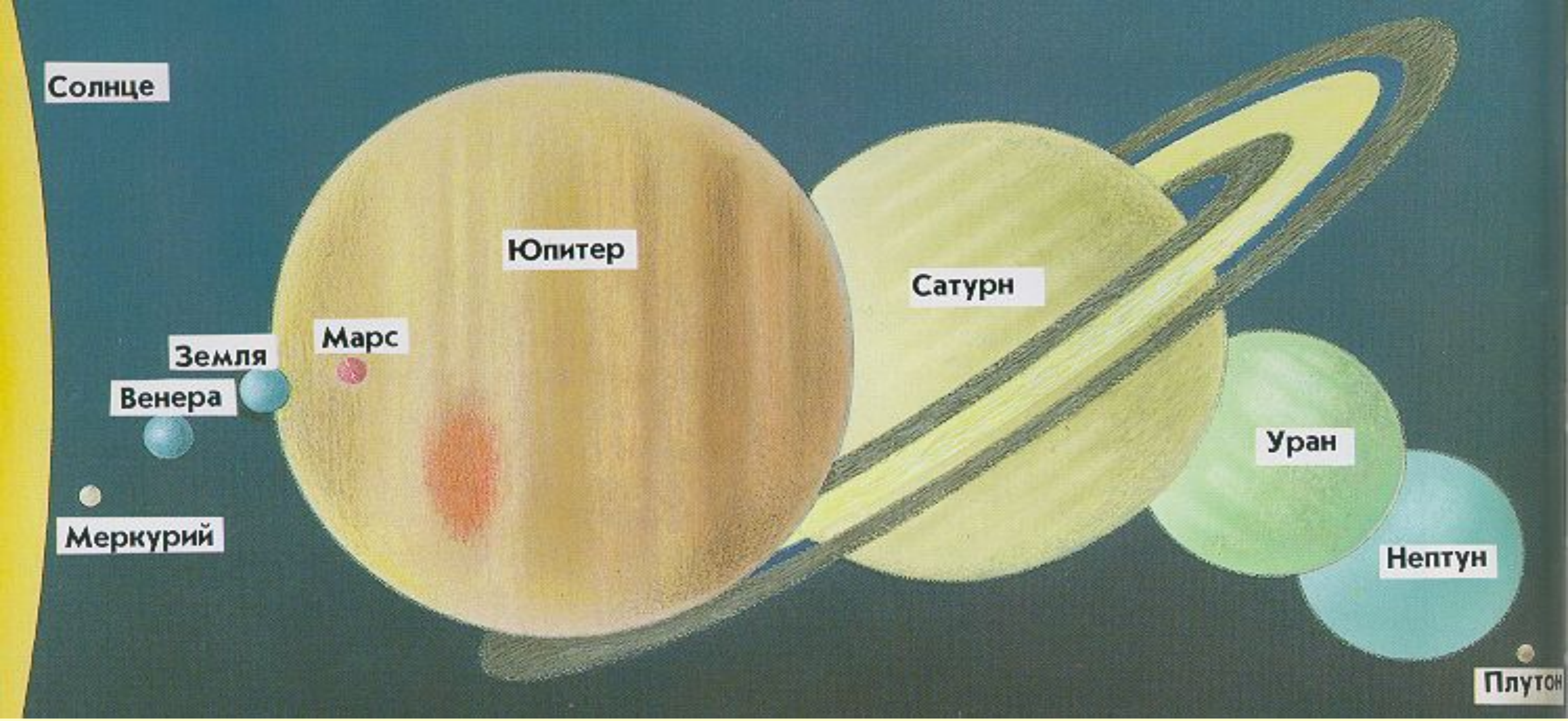


$\mathbf{F} = m(\mathbf{g} - \mathbf{a})$.

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



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.



Планеты солнечной системы

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 (рисунок 4.2) 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* $F_{вн}$.

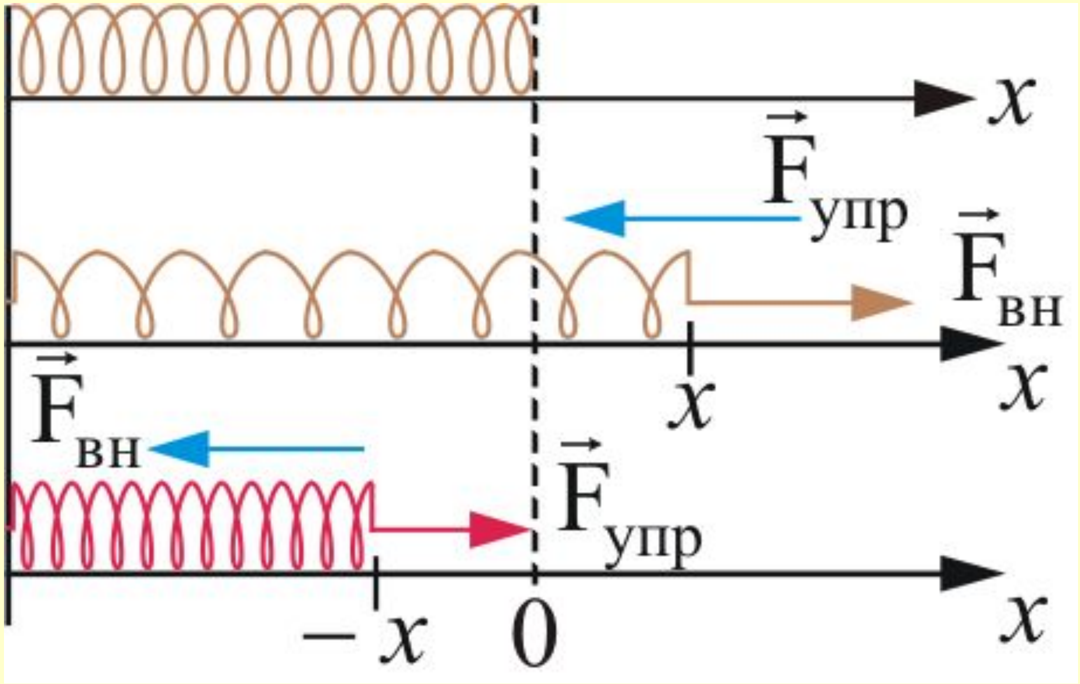
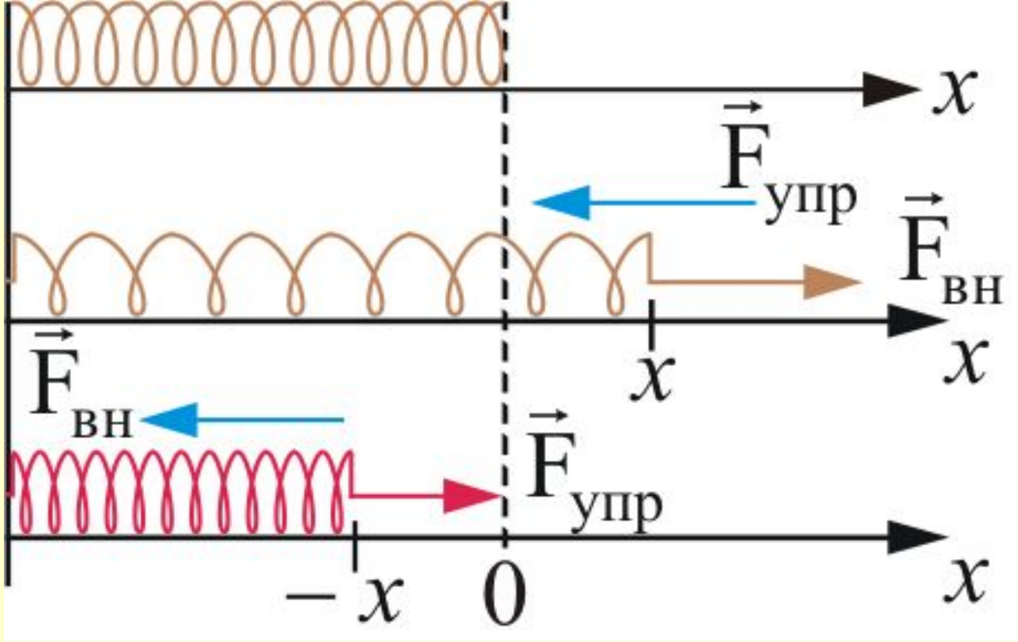


Рис. 4.2

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***:

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

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

Гук Роберт (1635 – 1703) знаменитый нглийский физик, сделавший множество обретений 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.

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

то закон Гука можно записать в виде:

$$\boxed{x = -\frac{1}{k} F_{упр.}}$$

отсюда

$$\boxed{F_{упр.} = -kx.}$$

Потенциальная энергия упругой пружины 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***:

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

Закон Гука для стержня

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

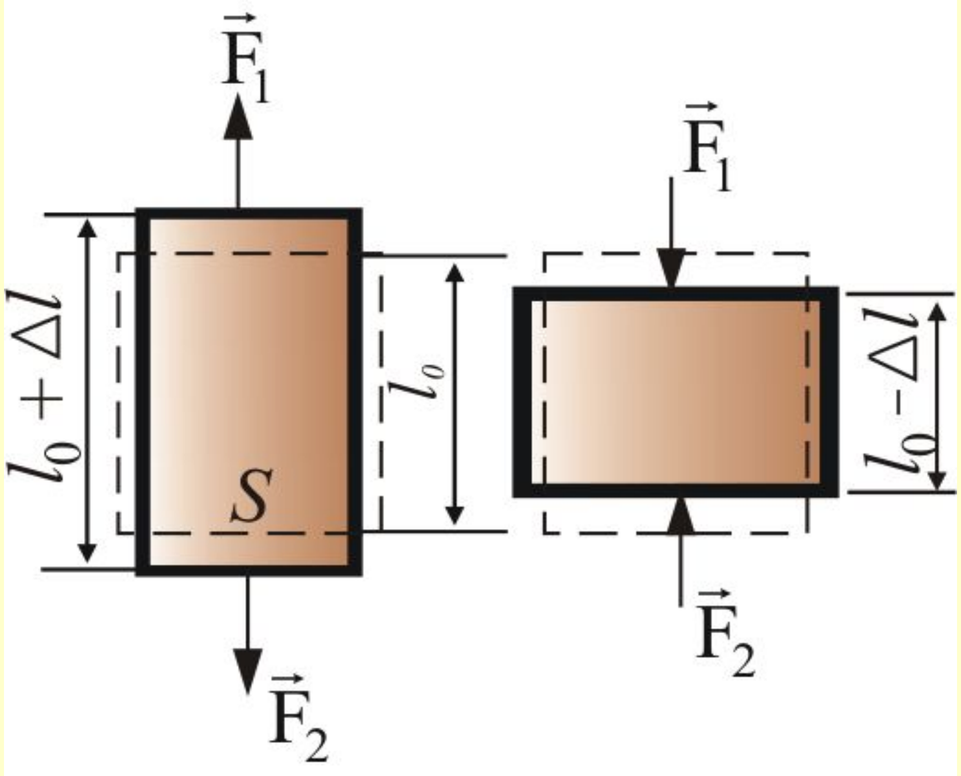


Рисунок 4.3

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

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

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

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

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

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

Доказано, что

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

где *E* – *величина, характеризующая упругие свойства материала стержня –* ***модуль Юнга.*** *E* измеряется в Н/м^2 или в Па.

приращение длины:

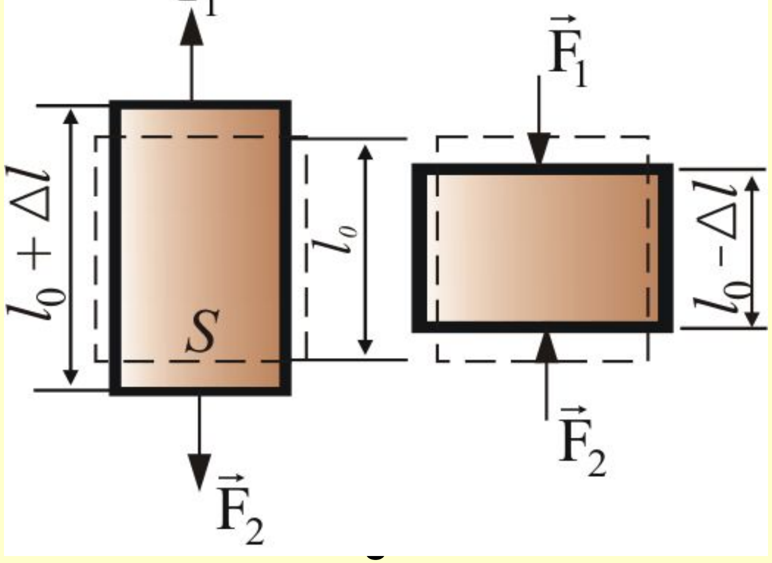
$$\boxed{\Delta l = \frac{l_0 \sigma}{E},}$$

обозначим $\boxed{\dfrac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon}$ – *относительное*

приращение длины, получим:

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

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) $\frac{\Delta d}{d}$ *стержня к относительному удлинению (сжатию)* $\frac{\Delta l}{l}$ 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:

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

Деформация сдвига

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

Пусть *AB* – плоскость сдвига

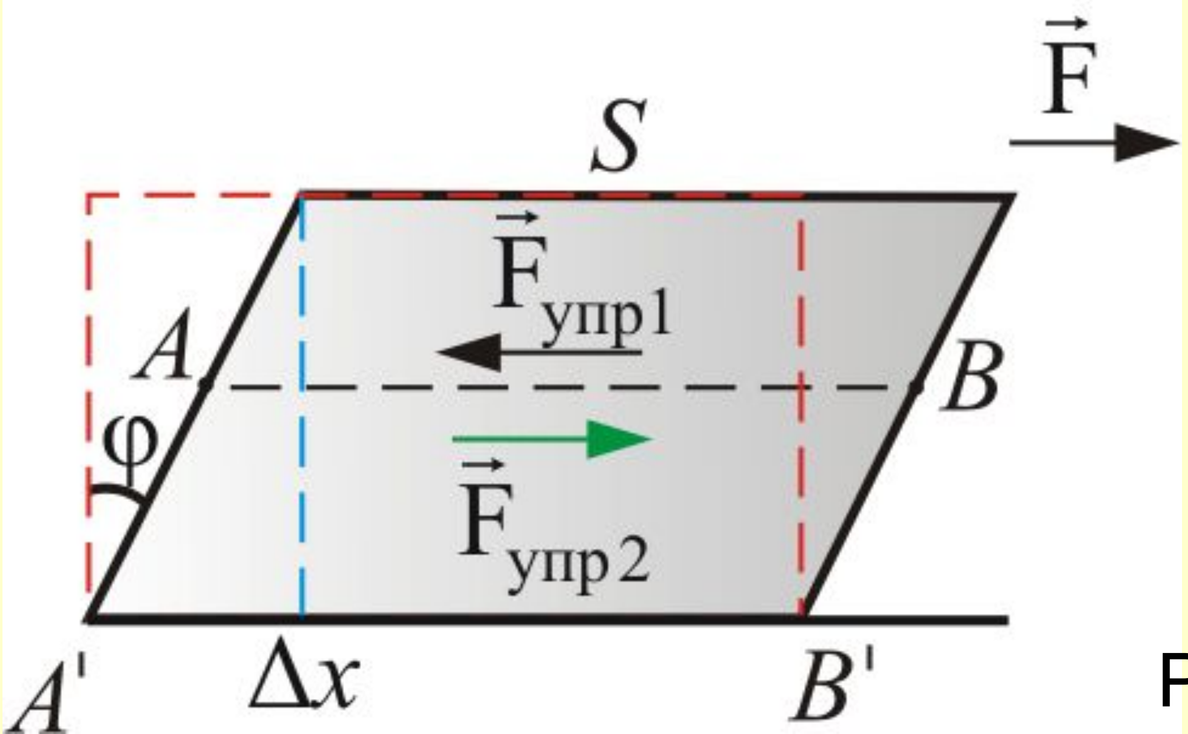
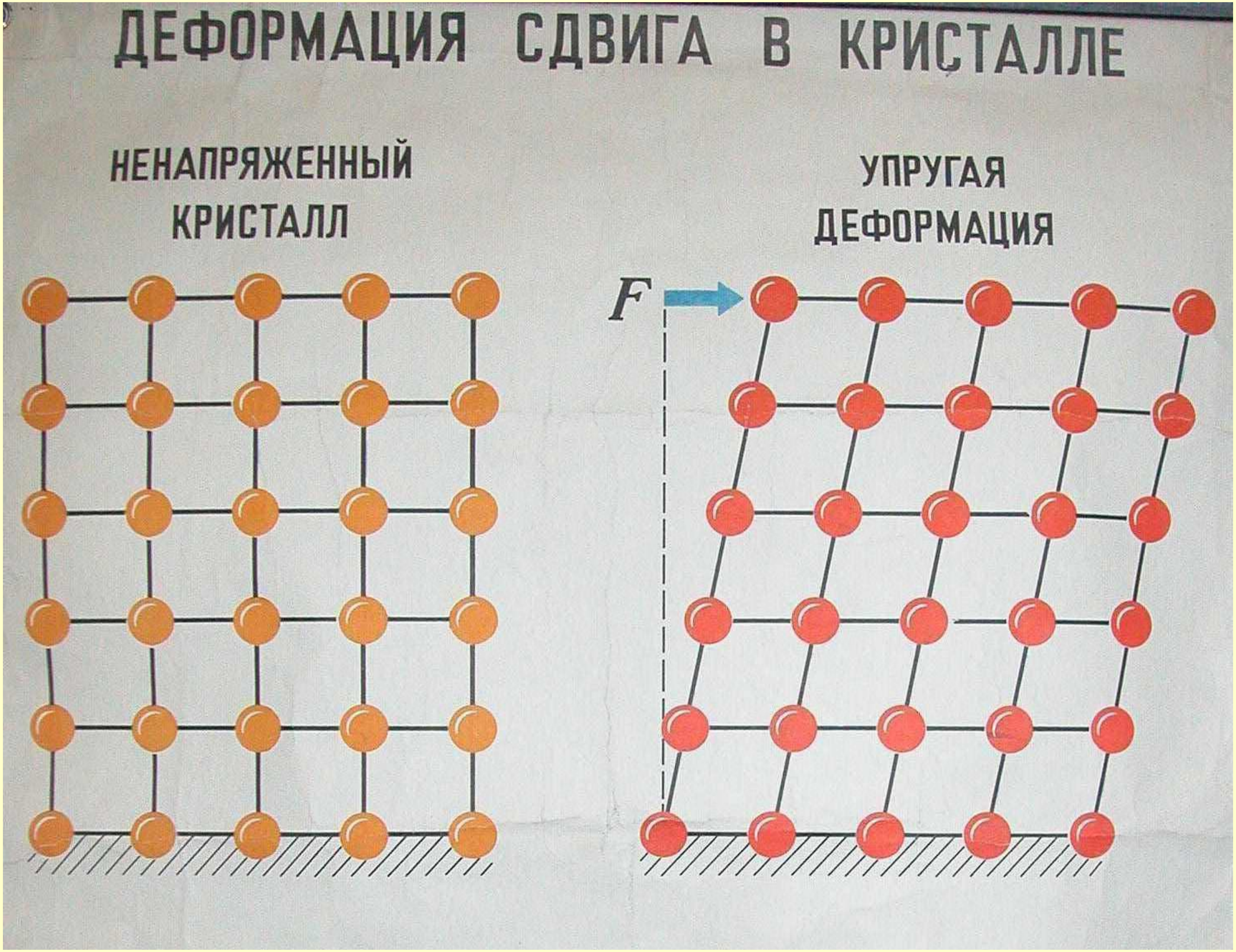
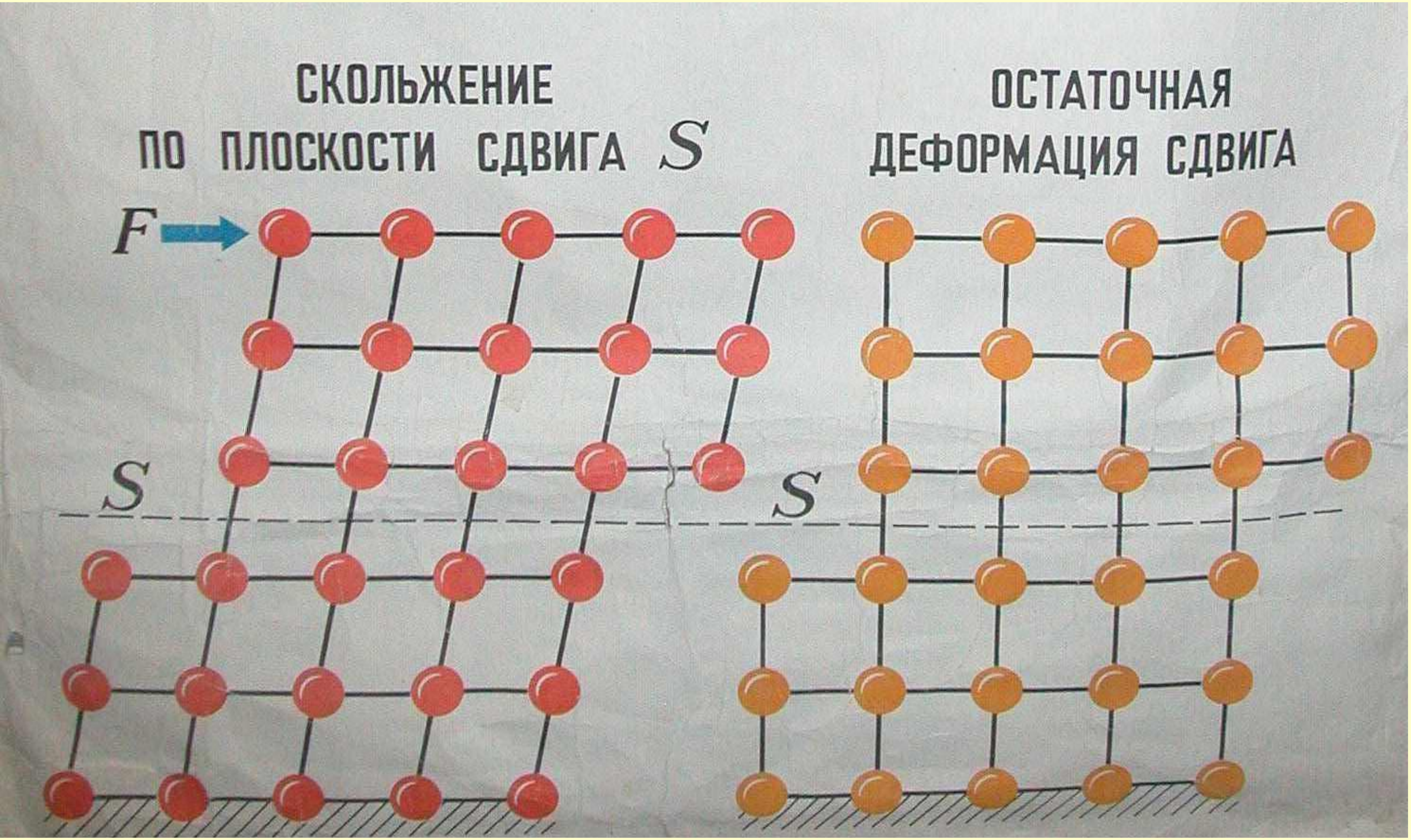


Рисунок 4.4


ДЕФОРМАЦИЯ СДВИГА В КРИСТАЛЛЕ
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 $\mathrm{tg}\,\phi \approx \phi$

Таким образом, ***относительный сдвиг***

$$\boxed{\gamma = \mathrm{tg}\,\phi \approx \phi}$$

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* $\gamma = \mathrm{tg}\phi = 1$ а $\phi = 45°$ *(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

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

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**.

Рассмотрим законы сухого трения

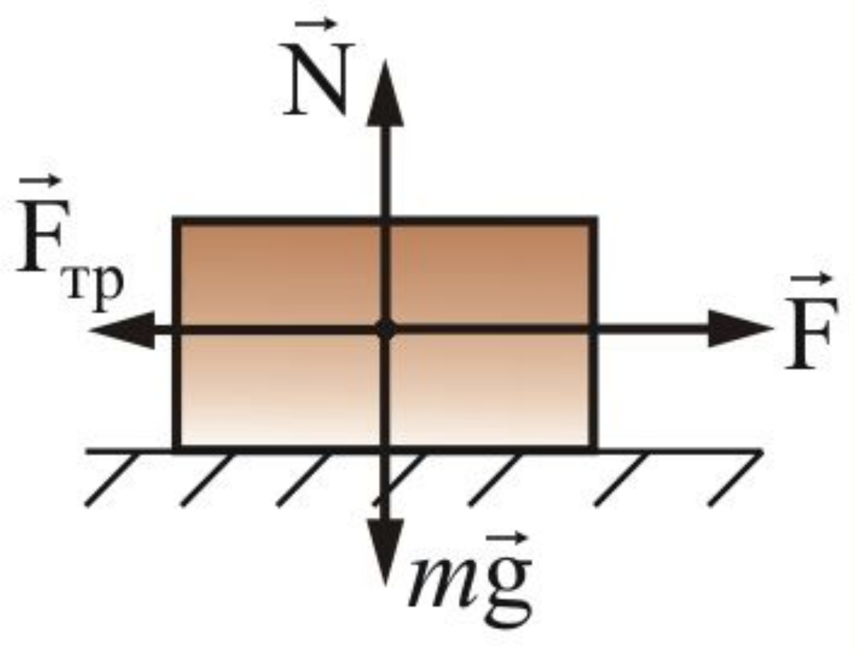


Рисунок 4.5

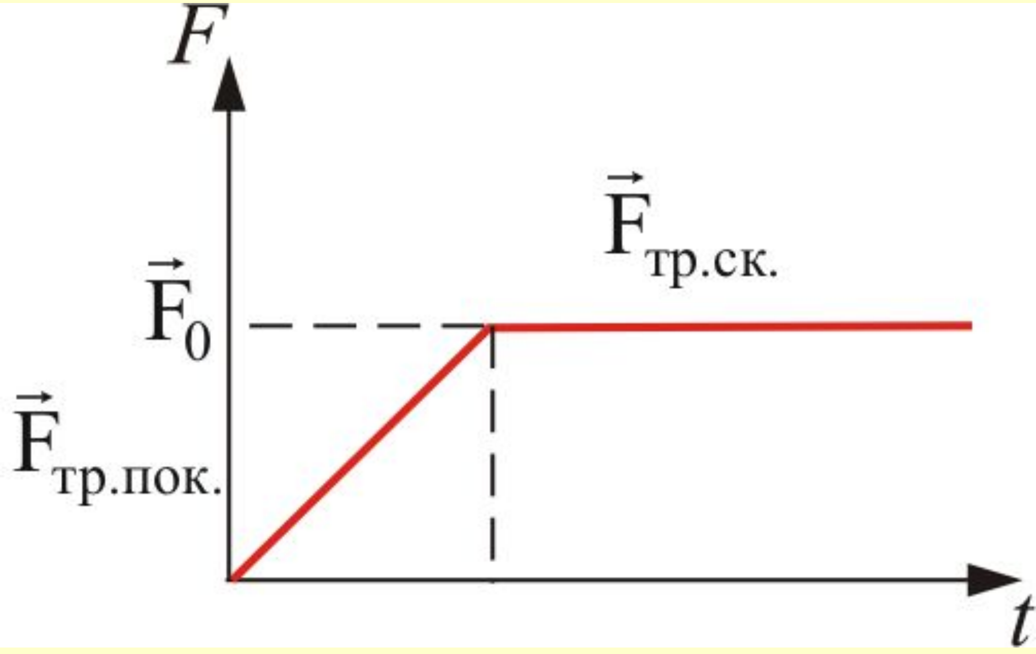
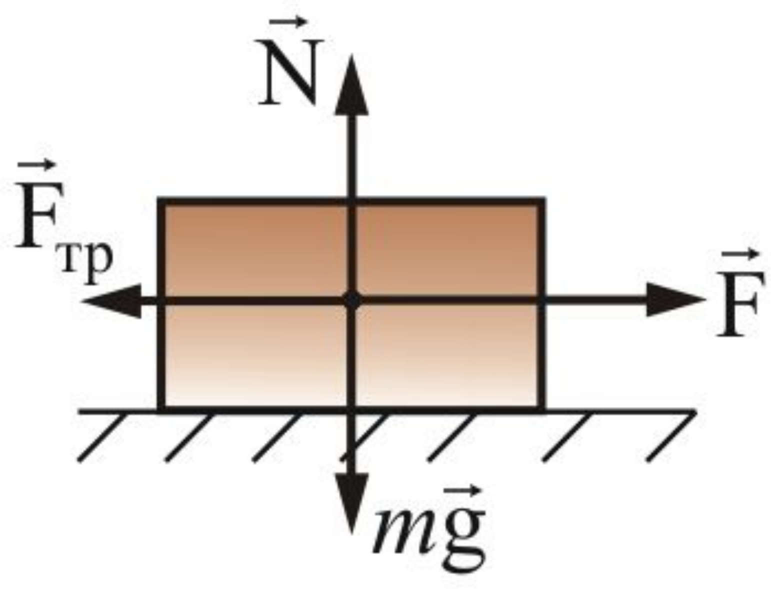
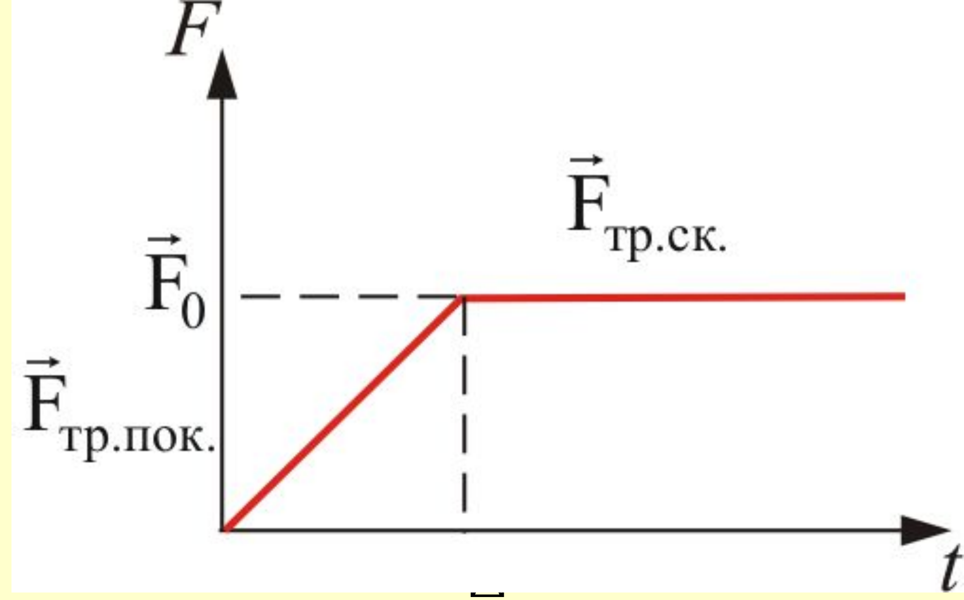


Рисунок 4.6





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*:

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

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.

Подробнее рассмотрим силу трения скольжения на наклонной плоскости.

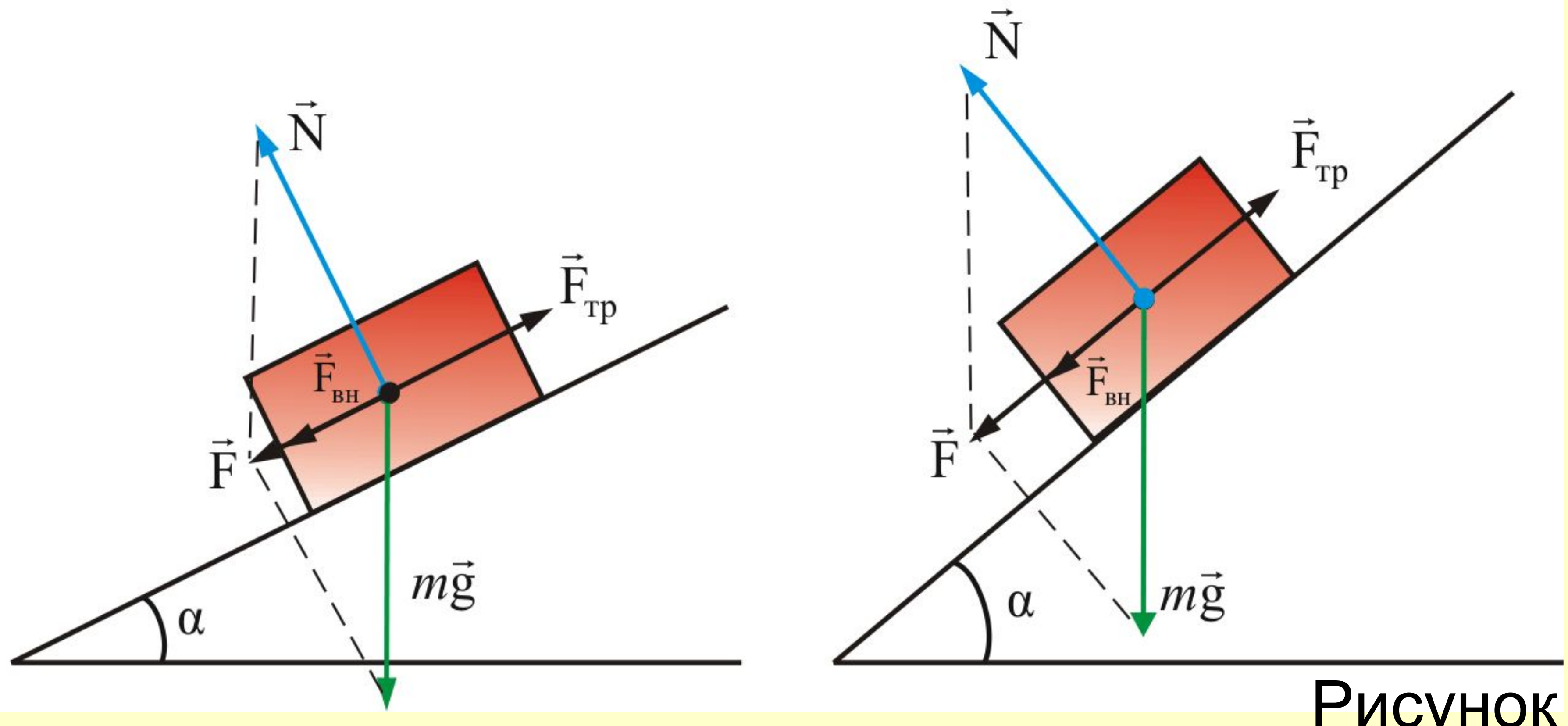
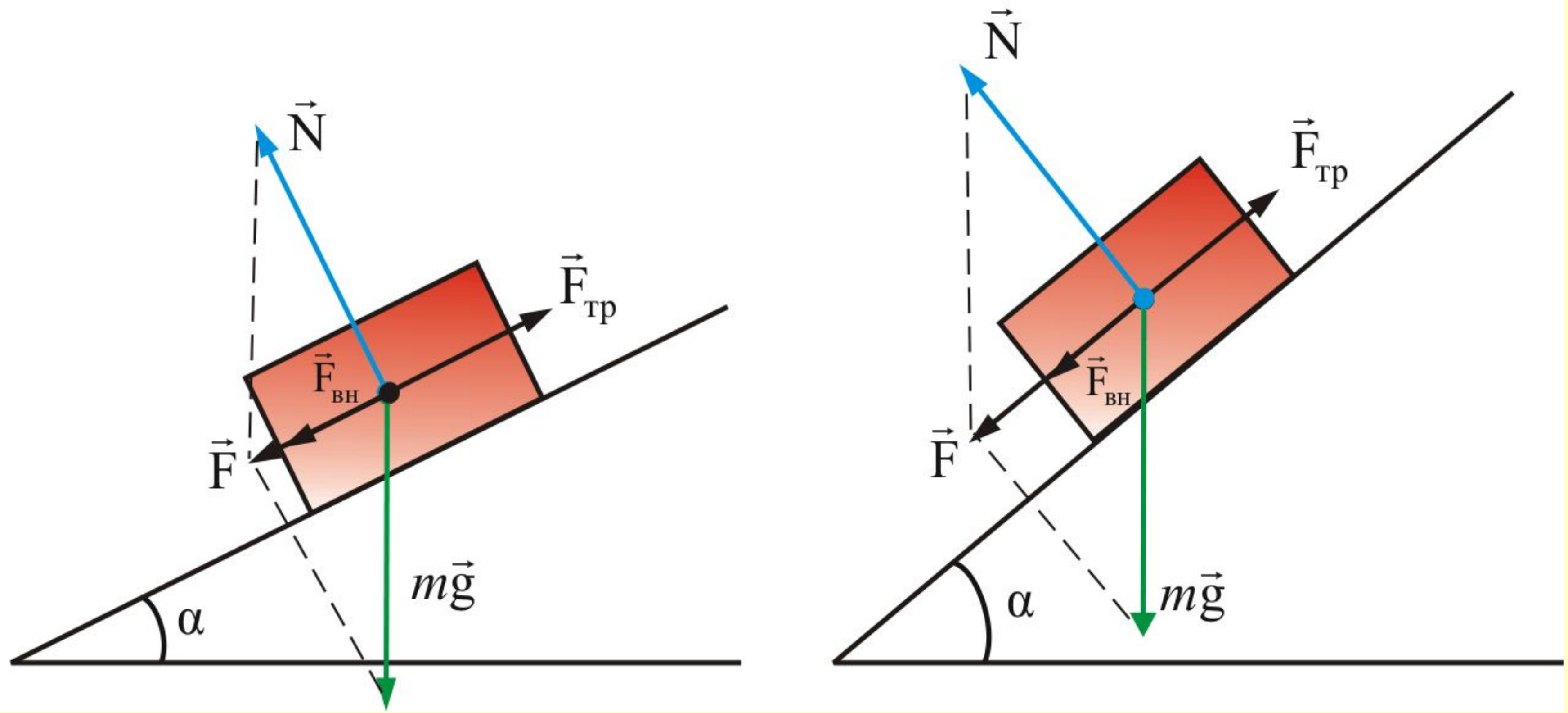
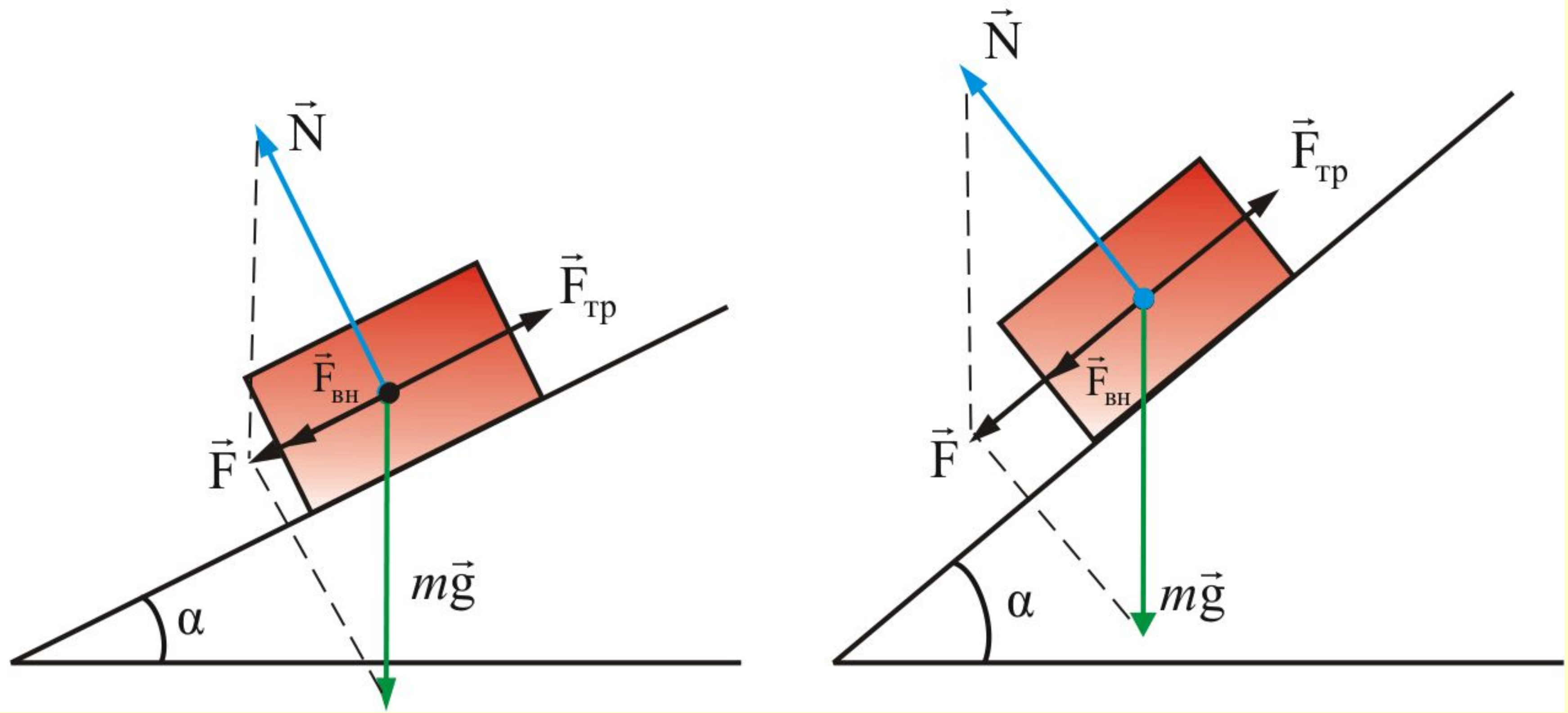


Рисунок 4.7



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

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



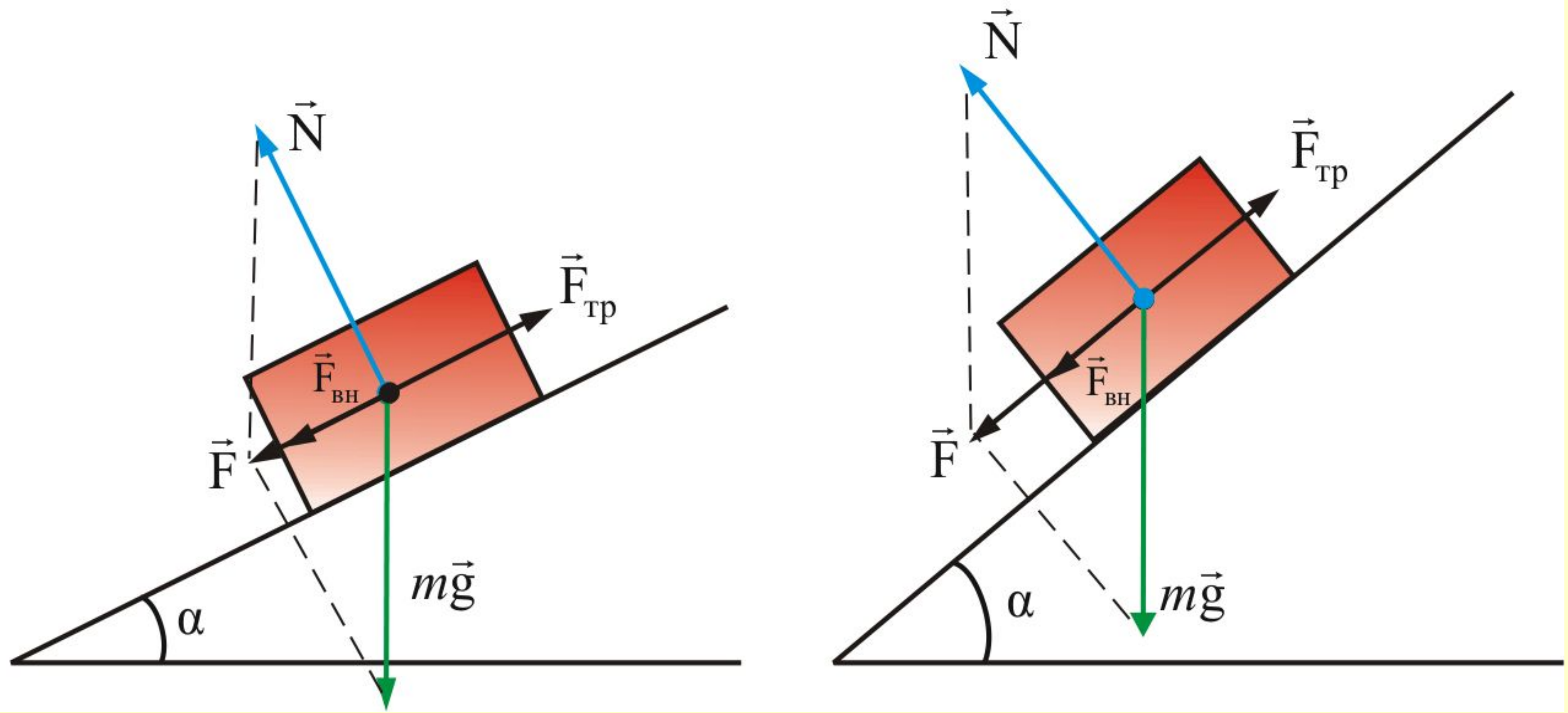
Максимальный угол наклона α определяется из условия:

$$(F_{тр.})_{max} = F$$

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

$$\mathrm{tg}\,\alpha_{max} = \mu$$

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

$$a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha),$$
$$F_{ск.} = ma = F - F_{тр.}.$$