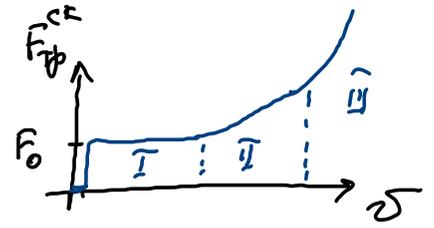


$$F_{ТП}^{СК} = \mu \cdot N$$

$$F_{ТП}^{СК} = \mu \cdot N \cdot \frac{v}{v_0}$$



На участке I:

$$F_{ТП}^{СК} = \mu \cdot N$$

II:

$$F_{ТП}^{СК} = k \cdot \delta$$

k - коэффициент сопротивления сдвига

III:

$$F_{ТП}^{СК} = k_1 \cdot \delta^2$$

k₁ - коэффициент сопротивления сжатию

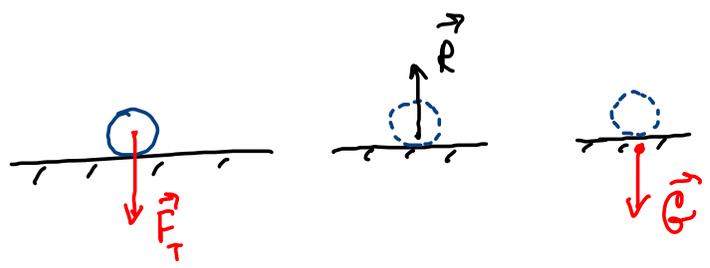
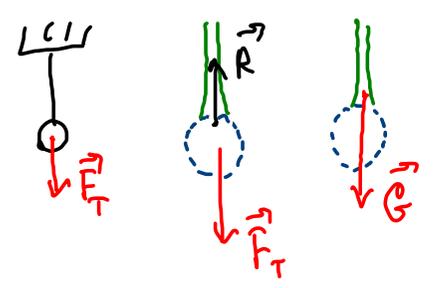
F < F₀ ⇒ тело покоится

4) Сила тяжести и вес тела

На тело на поверхности Земли действует сила тяжести: $\vec{F}_T = m \vec{g}$

Сила реакции - сила, противоположная силе тяжести: \vec{R}, \vec{N}, \dots

Вес тела - сила, действующая со стороны тела на опору - то есть вес тела: \vec{G}



$$\text{III} \text{ } \vec{G} = -\vec{R}$$

$$\text{II} \text{ } \vec{F}_T = -\vec{R}$$

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

Сила приложена к разным телам!

справедливо, если опора / опора не подвижна.

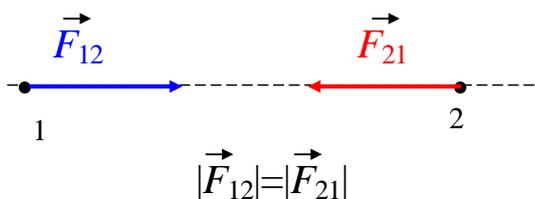


Рис. 3.2

Третий закон Ньютона утверждает: силы, с которыми два тела действуют друг на друга, всегда равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (3.6)$$

Эти силы приложены к разным телам, всегда действуют парами и являются силами одной природы.

Из закона следует:

1. Силы имеют одну и ту же физическую природу (например, гравитационную, электрическую, контактную).
2. Эти силы не уравнивают друг друга, т.к. приложены к различным телам (поэтому их нельзя складывать).

Для системы тел (материальных точек) взаимодействие всех тел можно свести к силам парного взаимодействия между материальными точками.

Следовательно, третий закон Ньютона позволяет осуществить переход от динамики отдельной материальной точки к динамике системы материальных точек.

3.6. Силы в механике

Все силы, встречающиеся в природе и известные науке в настоящее время, в конечном счёте сводятся к четырем типам фундаментальных взаимодействий: гравитационным, электромагнитным, ядерным и слабым. Ядерные и слабые взаимодействия характерны для процессов с участием атомных ядер и элементарных частиц и проявляются на малых расстояниях ($\sim 10^{-13}$ см). Электромагнитные и гравитационные силы убывают с увеличением расстояния между взаимодействующими телами медленно (например, сила гравитационного взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами), поэтому электромагнитные и гравитационные силы называют дальнодействующими.

В механике рассматриваются различные силы: гравитационные силы, силы упругости, силы трения.

Гравитационные силы

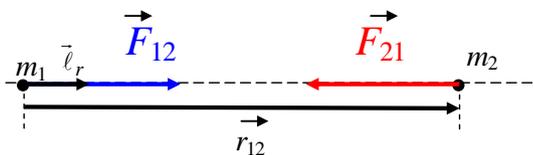
Гравитационное взаимодействие передается посредством гравитационного поля. Поэтому гравитационные силы – это силы дальнего действия. *Гравитационные силы* – это силы, обусловленные гравитационным взаимодействием всех без исключения тел (всемирным тяготением).

Согласно открытому Ньютоном закону всемирного тяготения два тела (материальные точки) притягиваются с силой, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F_{\text{гр}} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}, \quad (3.7)$$

где γ – гравитационная постоянная, $\gamma = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.

Гравитационную силу \vec{F}_{21} , действующую на тело массой m_2 со стороны тела массой m_1 , можно записать в векторной форме: $\vec{F}_{21} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \vec{\ell}_r$, где $\vec{\ell}_r$ – единичный вектор, направленный от тела 1 к телу 2 (рис. 3.3).



Две материальные точки взаимодействуют друг с другом силами, равными по величине, противоположно направленными вдоль одной прямой.

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

Рис. 3.3

Силы упругости

Всякое реальное тело под действием приложенных к нему внешних сил деформируется, т.е. изменяет свои размеры и форму. Если после прекращения действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму, деформация называется упругой. Упругие силы возникают в теле в процессе его упругой деформации.

Силы упругости и силы трения определяются характером взаимодействия между молекулами вещества. Силы взаимодействия между молекулами имеют электромагнитное происхождение. Следовательно, упругие силы и силы трения являются по своей природе электромагнитными.

Примером *силы упругости* является сила, возникающая при растяжении пружины. Введём следующие обозначения (рис. 3.4): ℓ_0 – длина пружины в недеформированном состоянии; $\Delta\ell$ – удлинение пружины (величина деформации); $\vec{F}_{\text{внеш}}$ – внешняя сила, вызывающая деформацию; $\vec{F}_{\text{упр}}$ – сила

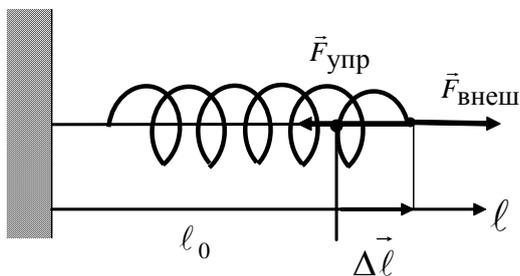


Рис. 3.4

упругости, возникающая в пружине. По закону Гука

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k\Delta\vec{\ell}, \quad (3.8)$$

где k – коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом жесткости пружины*. Знак минус указывает на то, что сила упругости направлена в сторону, противоположную деформации.

Силы трения

Силы трения возникают при перемещении соприкасающихся тел друг относительно друга или при попытке вызвать такое перемещение. Трение между

поверхностями двух твердых тел называется сухим, а между твердым телом и жидкой или газообразной средой – вязким. Применительно к сухому трению различают *трение покоя, скольжения и качения*.

В случае сухого трения сила трения возникает не только при скольжении одной поверхности по другой, но также и при попытках вызвать такое скольжение. В этом случае она называется *силой трения покоя*.

Пусть тело в форме бруска прижимается к неподвижной гладкой плоской горизонтальной поверхности другого тела с силой \vec{F}_n , направленной по нормали к поверхности соприкосновения тел (рис. 3.5). Сила \vec{F}_n называется *силой нормального давления*. Она может быть обусловлена притяжением бруска к Земле $\vec{F}_n = m\vec{g}$ или другими причинами. Так как брусок в вертикальном направлении не движется, то сила нормального давления уравнивается силой нормальной реакции опоры \vec{N} ($N = F_n$).

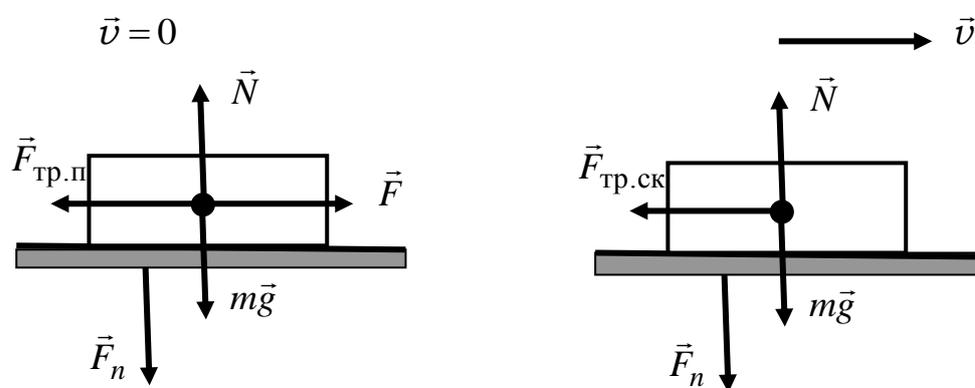


Рис. 3.5

Попытаемся переместить брусок внешней горизонтальной силой \vec{F} , направленной параллельно поверхности соприкосновения тел. Из опыта известно, что если модуль силы \vec{F} не превышает некоторого значения F_0 , то внешняя сила уравнивается силой трения покоя $\vec{F}_{\text{тр.п}}$, при этом $\vec{F}_{\text{тр.п}} = -\vec{F}$. Поэтому брусок не движется. Если модуль силы \vec{F} превышает значение F_0 , то брусок начнет скользить. Таким образом, при увеличении внешней силы F от нуля до F_0 автоматически меняется в этих же пределах сила трения покоя $F_{\text{тр.п}}$: $0 \leq F_{\text{тр.п}} \leq F_0$.

Сила трения покоя препятствует попыткам переместить соприкасающиеся тела друг относительно друга.

Сила трения скольжения $\vec{F}_{\text{тр.ск}}$, возникает при перемещении (скольжении) соприкасающихся тел друг относительно друга. Приложенная к бруску сила трения скольжения направлена вдоль поверхности соприкосновения тел и противоположна скорости бруска. Явление сухого трения изучено Кулоном и Амонтоном. Из опыта известно, что модуль силы трения скольжения пропорционален силе нормального давления или, что то же самое, силе нормальной реакции опоры N ($N = F_n$). Сила трения скольжения равна

$$F_{\text{тр.ск}} = \mu F_n = \mu \cdot N, \quad (3.9)$$

где μ – коэффициент трения скольжения, зависящий от природы и состояния соприкасающихся поверхностей.

Сила трения скольжения возникает при относительном скольжении тела по поверхности контакта, поэтому сила трения скольжения является функцией относительной скорости. В векторной форме закон Кулона – Амонтона для силы сухого трения имеет вид

$$\vec{F}_{\text{тр.ск}} = -\mu N \frac{\vec{v}}{v}, \quad (3.10)$$

где $\frac{\vec{v}}{v} = \vec{l}_v$ – единичный вектор в направлении движения тела относительно поверхности, по которой движется тело. Скорость \vec{v} имеет смысл относительной скорости, т.е. скорости тела по отношению к поверхности, по которой движется тело. Коэффициент трения скольжения μ является функцией относительной скорости движения тел $\mu = \mu(v)$, однако эта зависимость является слабой и в большинстве случаев ею можно пренебречь, считая коэффициент трения скольжения постоянной величиной.

Если тело движется по горизонтальной поверхности, то сила нормального давления численно равна силе тяжести ($N = mg$), тогда $F_{\text{тр.ск}} = \mu mg$.

Если тело движется вдоль наклонной плоскости (рис. 3.6), то

$$F_{\text{тр.ск}} = \mu \cdot P \cdot \cos \alpha = \mu \cdot mg \cdot \cos \alpha. \quad (3.11)$$

Сила трения направлена в сторону, противоположную направлению движения данного тела относительно другого.

Вязкая среда (газ, жидкость) оказывает сопротивление движению тела. Из обобщения результатов эксперимента следует, что при малых скоростях тела $\vec{v}_{\text{отн}}$ относительно вязкой среды сила сопротивления пропорциональна относительной скорости: $F_c = \beta \cdot v_{\text{отн}}$, где β – коэффициент

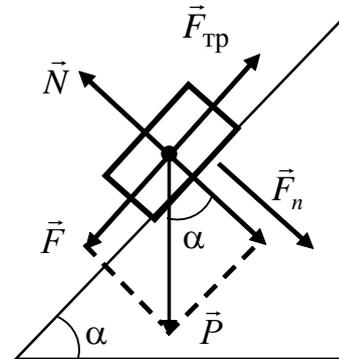


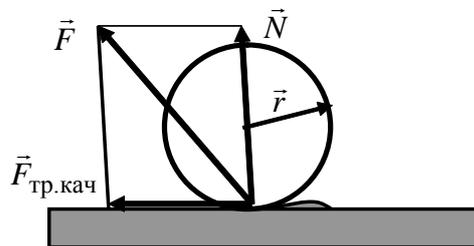
Рис. 3.6

сопротивления, зависящий от формы тела, вещества и температуры среды. Например, сила сопротивления, действующая на шарик радиуса R в жидкости, определяется законом $F_c = 6\pi\eta R v_{\text{отн}}$, где $\beta = 6\pi\eta R$ и η – вязкость среды.

В векторной форме закон силы сопротивления имеет вид: $\vec{F}_c = -\beta \cdot \vec{v}_{\text{отн}}$.

При больших скоростях движения сила сопротивления начинает зависеть от скорости по закону $F_c \sim v_{\text{отн}}^2$ или $F_c \sim v_{\text{отн}}^3$. Такое наблюдается, например, при полете самолетов.

Сила трения качения возникает при качении тел цилиндрической или шарообразной формы по гладкой поверхности вследствие деформации обоих соприкасающихся тел (рис. 3.7). На гладкой поверхности в месте ее соприкосновения с телом круглой формы появляется небольшое углубление и бугорок. Вследствие этого возникает сила сопротивления движению \vec{F} (сила реакции), горизонтальная составляющая которой называется силой трения качения $\vec{F}_{\text{тр.кач}}$, а вертикальная составляющая – силой нормальной реакции опоры \vec{N} . Сила трения качения определяется по закону Кулона



$$F_{\text{тр.кач}} = \mu_{\text{кач}} \frac{N}{r}, \quad (3.12)$$

где $\mu_{\text{кач}}$ – коэффициент трения качения; r – радиус катящегося тела.

Обычно величина силы трения качения во много раз меньше силы трения скольжения. Этим обусловлено широкое использование в технике подшипников качения, позволяющих значительно уменьшить трение в деталях машин и механизмов.

3.7. Преобразования Галилея. Механический принцип относительности

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета (рис. 3.8). Пусть система K' движется с постоянной скоростью \vec{v} относительно другой системы K . Выберем оси координат систем так, чтобы оси x и x' совпадали и были направлены вдоль вектора \vec{v} . За начало отсчета времени берем момент, когда начала координат O и O' совпадали. Пусть \vec{r} – радиус-вектор точки M в системе K , а \vec{r}' – радиус-вектор той же точки в системе K' . Соотношение между \vec{r} и \vec{r}' имеет вид

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v} t. \quad (3.13)$$

В классической механике предполагается, что ход времени не зависит от системы отсчета, т.е.

$$t = t'. \quad (3.14)$$

Соотношения (3.13) и (3.14) представляют собой так называемые преобразования Галилея. В проекции на оси координат эти преобразования имеют вид:

$$x = x' + vt', \quad y = y', \quad z = z'. \quad (3.15)$$