

# Законы динамики поступательного движения

## 1. Законы Ньютона

**Поступательным** называется такое движение, при котором любая прямая, жестко связанная с телом, перемещается в пространстве, оставаясь параллельной самой себе. Очевидно, что при поступательном движении все точки тела имеют в любой момент времени одинаковую скорость и движутся по параллельным траекториям.

Можно показать, что произвольное движение любого тела можно представить как наложение двух видов движения – поступательного и вращательного.

В физике существует понятие **взаимодействия тел**. Это понятие требует определения. **Под воздействием одного тела на другое, понимается способность одного тела менять скорость своего поступательного движения под влиянием другого тела.** Если два тела не способны изменить скорость друг друга, то такие тела называются **невзаимодействующими**. Разумеется, что тела, которые не взаимодействуют в данный момент времени, могут взаимодействовать в последующие моменты времени и наоборот. Если тело не взаимодействует ни с какими другими телами, то оно называется **свободным**.

**Первый закон Ньютона** утверждает существование инерциальных систем отсчета:

*Существуют системы отсчета (называемые инерциальными), относительно которых любое свободное тело сохраняет скорость своего поступательного движения постоянной.*

В следующем разделе будет показано, что инерциальных систем отсчета существует бесконечное множество. **Любая система отсчета, движущаяся относительно некоторой инерциальной системы прямолинейно и равномерно (т.е. с постоянной скоростью), также является инерциальной.**

Отметим, что система отсчета, связанная с Землей, не является строго инерциальной, главным образом из-за суточного вращения Земли. Однако вращение Земли происходит медленно и в большинстве практических задач обусловленные им эффекты пренебрежимо малы, так что приближенно эту систему отсчета можно считать инерциальной.

Для формулировки второго закона Ньютона необходимо ввести новую физическую величину – **инертную массу тела**. Эта величина определяется с помощью эталона массы следующим образом.

1. Выбирается эталон массы  $m_{эм} = 1$  единица массы (например, килограмм)
2. Выбирается тело, массу  $m$  которого нужно измерить.
3. Эталонное тело и тело неизвестной массы приводятся во взаимодействие. Во время этого взаимодействия в принципе можно измерить ускорения этих тел -

соответственно  $a_{эм}$  и  $a$ . Измерения ускорений производятся в некоторой инерциальной системе отсчета.

4. Неизвестная масса тела находится по формуле

$$m = \frac{a_{эм}}{a} m_{эм}$$

Введенная таким образом масса позволяет сформулировать **второй закон Ньютона**:

*В инерциальной системе отсчета произведение массы тела  $m$  на ускорение его поступательного движения  $\vec{a}$  равно векторной физической величине  $\vec{F}$ , которая полностью определяется всеми телами, воздействующими на данное тело. Эта величина  $\vec{F}$  называется силой, действующей на данное тело со стороны других тел.*

Количественно утверждение, выражающее второй закон Ньютона можно кратко записать в виде одной формулы

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

Из второго закона Ньютона следует, что на одно и то же тело может одновременно действовать несколько сил со стороны разных тел. В этом случае для определения полной силы, действующей со стороны всех тел, нужно сложить вектора всех сил (рис. 1).

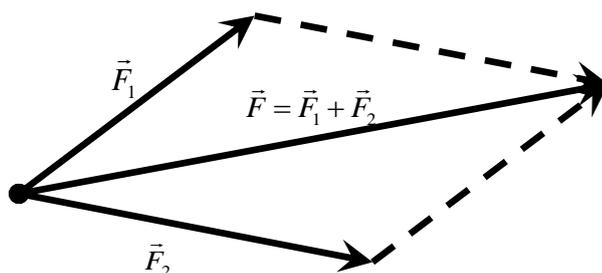


Рис. 1. Сложение сил.

Многочисленные эксперименты показывают, что во всех случаях если воздействие на какое-либо тело оказывает другое тело и это другое тело также подвергается воздействию со стороны первого тела (рис. 2). То есть любое воздействие является взаимодействием (т.е. взаимным действием).

Соотношение между силами взаимодействия любых двух тел устанавливает **третий закон Ньютона**. Его формулировку можно дать в следующей форме:

*Силы, с которыми взаимодействуют друг на друга любые два тела, равны по величине и противоположны по направлению.*



Рис. 2. Третий закон Ньютона.

## 2. Преобразования Галилея и принцип относительности Галилея

Уравнение  $m\vec{a} = \vec{F}$ , выражающее второй закон Ньютона справедливо не в любой системе отсчета. Действительно, ускорение тела различно в системах отсчета, движущихся друг относительно друга с ускорением. В то же время действующая на тело сила определяется только взаимным расположением и скоростями тел физической системы, а значит, от выбора системы отсчета не зависят.

Как следует из его формулировки, второй закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета. Их множественность и равноправие при описании движения тел, а вследствие этого *эквивалентность состояния покоя и прямолинейного равномерного движения*, доказываются так называемыми преобразованиями Галилея, связывающими значения характеристик тела в различных системах отсчета.

При описании движения тел в ряде случаев бывает удобно использовать две различных систем отсчета. Обычно одну из них, условно неподвижную, называют лабораторной системой отсчета (ЛСО), другую – движущейся (ДСО).

Пусть ЛСО является инерциальной. Докажем, что если ДСО не имеет относительно нее ускорения, то она также инерциальная.

Положение тела (мы будем рассматривать вместо тела материальную точку) в ЛСО зададим радиусом-вектором  $\vec{r}$ , в ДСО – радиусом-вектором  $\vec{r}'$  (рис. 3). Положение начала отсчета ДСО – точки  $O'$  – описывается в ЛСО вектором  $\vec{R}$ . Из рисунка видно, что

$$\vec{r} = \vec{R} + \vec{r}'.$$

В классической механике постулируется, что время во всех системах отсчета течет одинаково:  $t = t'$ .

Для простоты предположим, что ДСО движется равномерно вдоль вектора  $\vec{R}$ , причем в начальный момент времени  $t = 0$  начала координат ЛСО и ДСО совпадают. В этом случае

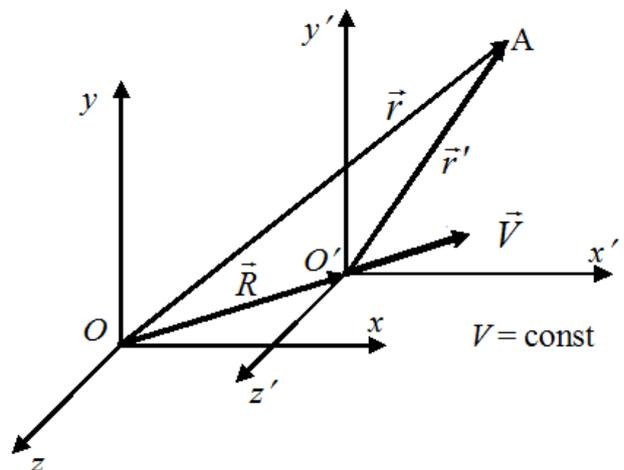


Рис. 3

$$\vec{R} = \vec{V}t$$

и мы можем записать

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{R} = \vec{r}' + \vec{V}t. \quad (1)$$

В координатной форме это выражение можно записать так:

$$\begin{cases} x = x' + V_x t, \\ y = y' + V_y t, \\ z = z' + V_z t, \\ t = t'. \end{cases}$$

Эти соотношения и называются преобразованиями Галилея для координат.

Возьмем от уравнения (1) производную по времени:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt} + \vec{V}.$$

Поскольку  $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$  есть скорость материальной точки в ЛСО,  $\frac{d\vec{r}'}{dt} = \vec{v}'$  а есть скорость материальной точки в ДСО, то получаем

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}.$$

Это уравнение связывает скорости тела в ЛСО и ДСО и носит название **классического закона сложения скоростей**.

Возьмем еще раз производную по времени от уравнения  $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}$ :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} + \frac{d\vec{V}}{dt},$$

Поскольку  $\frac{d\vec{V}}{dt} = 0$ , то получаем

$$\vec{a} = \vec{a}'.$$

Таким образом, ускорение тела в рассматриваемых системах отсчета одинаково, а потому **система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно инерциальной системы отсчета, также является инерциальной**. Поскольку масса тела считается в классической механике одинаковой во всех системах отсчета, то это означает, что **закон движения (второй закон Ньютона) во всех инерциальных системах отсчета имеет одинаковый вид**.

В результате Галилей сформулировал *принцип относительности*: **во всех инерциальных системах отсчета все механические процессы описываются одинаковыми законами и происходят одинаково**.

Иначе говоря, уравнения механики Ньютона, описывающие движение физических тел инвариантны относительно преобразований Галилея.

А. Эйнштейн обобщил этот принцип: **во всех инерциальных системах отсчета все физические процессы описываются одинаковыми законами и происходят одинаково**.

### 3. Виды сил в механике

#### Сила тяготения.

Строго говоря, закон всемирного тяготения формулируется для материальных точек. Закон всемирного тяготения утверждает, что **любые две материальные точки, притягиваются с силой, направленной вдоль линии, их соединяющей, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.**

**Математически** закон всемирного тяготения можно записать в виде формулы

$$\vec{F}_{\text{тяготения}} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$

где  $\vec{e}_r$  - единичный вектор, направленный по вектору  $\vec{r}$ ,  $\vec{F}_{\text{тяготения}}$  есть сила, действующая на материальную точку массой  $m_2$  со стороны материальной точки массой  $m_1$  (рис. 4):

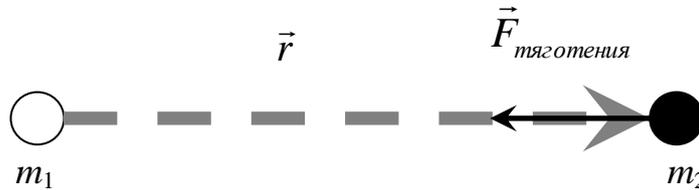


Рис. 4. К закону всемирного тяготения.

**Можно доказать, что эта же формула верна не только для материальных точек, но и для любых сферически симметричных тел (сфер, шаров, сферических слоёв).** В этом случае  $r$  есть расстояние между центрами тел. Для тел, которые не обладают сферической симметрией данная формула не справедлива.

Как видно из формулы, тело с массой  $m_2$  характеризуется только самой величиной массы, а всё остальное относится только к телу с массой  $m_1$  и пространственному расположению материальных точек. Можно считать, что это всё остальное характеризует поле, предающее воздействие от точки с массой  $m_1$  на точку с массой  $m_2$ . Эта характеристика поля называется напряженностью гравитационного поля  $\vec{g}$ :

$$\vec{g} = -G \cdot \frac{m_1}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$

$$\vec{F}_{\text{тяготения}} = m_2 \cdot \vec{g}$$

По второму закону Ньютона любая сила, действующая на тело массой  $m_2$  есть  $\vec{F} = m_2 \cdot \vec{a}$ , следовательно  $\vec{g} = \vec{a}$  - напряженность гравитационного поля равна ускорению, с которым будет двигаться тело массой  $m_2$  по направлению к телу массой  $m_1$ , при условии, что других сил нет. Это ускорение называется **ускорением свободного падения.**

Заметим, что **масса как мера инерции**, входящая в уравнение для второго закона Ньютона, **в точности равна массе как мере гравитации**, входящей в закон всемирного тяготения. Это утверждение носит название **принципа эквивалентности инертной и гравитационной масс** и подтверждено с высокой точностью многочисленными экспериментами.

### Сила тяжести.

В тех задачах, где изменение расстояния между центрами гравитационно взаимодействующих тел намного меньше самого расстояния, величину изменения  $\vec{g}$  обычно можно считать несущественной и принимать  $\vec{g} = const$  для всех точек пространства, описываемых в задаче. Поэтому просто записывают, что сила тяжести  $\vec{F}_{тяжести} = m \cdot \vec{g}$

### Реакция опоры и вес.

Пусть на некоторое тело действует сила тяжести (сила тяготения), но это тело не движется с ускорением  $\vec{g}$ , а покоится. Тогда на него должны действовать и другая сила, которая компенсирует силу тяжести. Как правило, этой силой является сила нормальной реакции опоры  $\vec{N}$ , которая всегда перпендикулярна поверхности взаимодействия тел (рис. 5). Видно, что  $\vec{N}$  не всегда направлена вдоль одной прямой с  $\vec{F}_{тяжести}$  и не всегда равна ей по

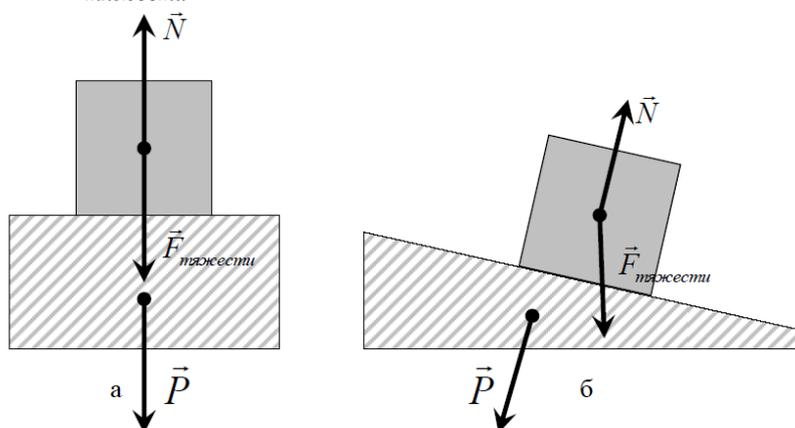


Рис. 5.

модулю. **Вес тела  $\vec{P}$**  – это сила, с которой тело давит на опору или натягивает подвес. Следовательно, вес приложен к опоре или подвесу, и по 3 закону Ньютона равен по модулю и противоположен по направлению силе нормальной реакции опоры ( $\vec{P} = -\vec{N}$ ).

### Сила трения.

Под названием сила трения понимают несколько различных по природе и по способу расчёта сил. Выделяют два типа сил трения: сухого и вязкого. Сил сухого трения – три вида.

Во-первых, это **сила трения покоя**, которая возникает, когда вдоль границы раздела двух тел, неподвижных друг относительно друга (рис. 6). При этом и

скорость, и ускорение равны нулю, поэтому  $\vec{F}_{\text{трения}} = -\vec{F}_{\text{внешняя}}$ , где  $\vec{F}_{\text{внешняя}} = \sum_i \vec{F}_i$  и  $\vec{F}_i$  – все прочие силы. Когда сила сухого трения скольжения достигает максимально возможной (предельной) величины, то тела начинают двигаться друг относительно друга. Эта предельная величина рассчитывается по формуле

$$F_{\text{max}} = \mu_{\text{покоя}} \cdot N,$$

где  $\mu_{\text{покоя}}$  – коэффициент трения покоя, зависящий только от природы контактирующих веществ, качества поверхностей и от температуры.

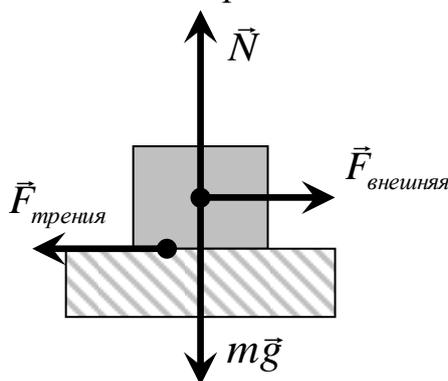


Рис. 6. Сила сухого трения.

Во-вторых, это сила **сухого трения скольжения**. Схема, поясняющая её направление, совпадает со схемой на рис. 6. Величина этой силы рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{скольжения}} = \mu_{\text{скольжения}} \cdot N,$$

где коэффициент трения  $\mu_{\text{скольжения}}$  зависит только от природы контактирующих веществ, качества поверхностей и от температуры. Вообще говоря, обычно  $\mu_{\text{покоя}} > \mu_{\text{скольжения}}$ , однако в большинстве задач эти коэффициенты считаются равными.

В-третьих, это сила трения качения (рис. 7). Видно, что перемещению катящегося тела мешает образование углубления под ним и «горки» перед ним. Величина силы трения качения рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{качения}} = \mu_{\text{качения}} \cdot N,$$

где коэффициент трения  $\mu_{\text{качения}}$  зависит только от природы контактирующих веществ, качества поверхностей и от температуры. Обычно  $\mu_{\text{качения}} < \mu_{\text{скольжения}}$ .

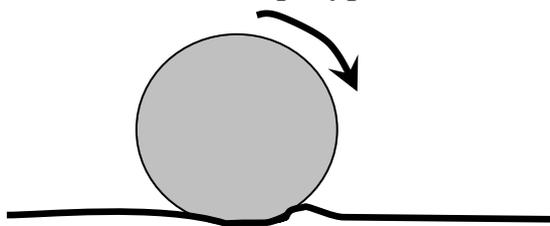


Рис. 7. Причина появления силы трения качения

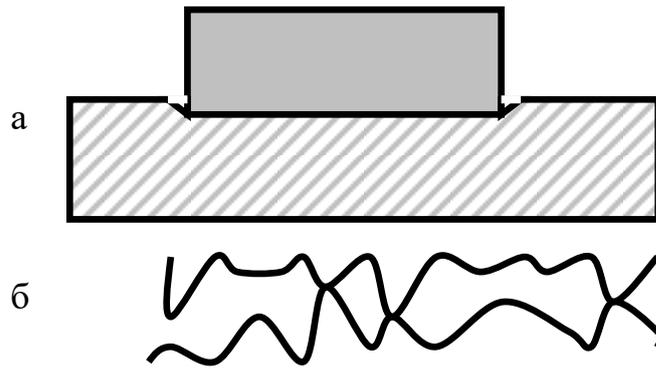


Рисунок 8. Причины появления сил трения на контактирующих поверхностях.

Природа всех видов сил сухого трения сходная: во-первых, прижатые (например, под действием силы тяжести) тела деформируют свои поверхности и меньшее тело оказывается в некотором углублении (рис. 7), во вторых, контактирующие поверхности имеют шероховатости, мешающие взаимному перемещению (рис. 8), в третьих, в зонах контакта могут возникать межатомные связи, которые должны рваться при перемещении.