

Г Л А В А II

ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ

§ 3. Законы Ньютона

Раздел механики, изучающий движение материальных тел совместно с физическими причинами, вызывающими это движение, называется *динамикой*. Основные представления и количественные закономерности динамики возникли и развиваются на базе многовекового человеческого опыта: наблюдений за движением земных и небесных тел, производственной практики общества и специально поставленных экспериментов. Великий итальянский физик Галилео Галилей экспериментально установил так называемый

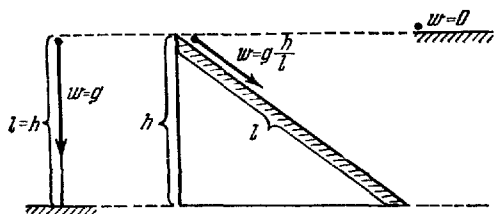


Рис. 1.9.

закон инерции. Он показал, что при отсутствии сопротивления тело под действием постоянной силы будет двигаться равноускоренно, и установил, что ускорение w тяжелого тела, движущегося по гладкой наклонной плоскости, обратно пропорционально

длине этой плоскости l при постоянной ее высоте h (рис. 1.9). Отсюда вытекает, что в пределе движение тела по гладкой горизонтальной плоскости без сопротивления будет происходить без всякого ускорения, т. е. равномерно и прямолинейно. При этом

$$\boxed{w = 0 \text{ и } v = \text{const.}} \quad (3.1)$$

Это положение Галилея было подтверждено всеми последующими опытами и составляет содержание так называемого *первого основного закона динамики*:

Материальная точка (тело), достаточно удаленная от всех других тел (т. е. не взаимодействующая с ними), будет сохранять

свое состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения. При этом покой следует рассматривать лишь как частный случай равномерного и прямолинейного движения, когда $v = \text{const} = 0$.

Этот закон одинаково справедлив как для движения гигантских небесных тел, так и для движения мельчайших пылинок. Свойство материальных тел сохранять состояние равномерного и прямолинейного движения называется *и н е р ц и е й*.

Равномерное и прямолинейное движение тела при отсутствии внешних воздействий называется *д в и ж е н и е м п о и н е р ц и и*.

Следует отметить, что представление о движении по инерции является научной абстракцией. Наблюдать движение по инерции в чистом виде невозможно, так как никакое тело не может быть изолировано от воздействия других тел, как бы далеко от него эти тела ни находились. Введение этой абстракции позволяет связать ускорение материальных тел с действиями, оказываемыми на них другими телами.

Изменения состояния движения материальных тел, т. е. ускорения, вызываются *с и л а м и*. Остановимся на анализе этого важнейшего понятия.

Выше мы уже отмечали, что инерциальное движение, т. е. движение без ускорения, возможно при отсутствии какого бы то ни было взаимодействия между движущимся телом и другими телами. *Всякое изменение состояния движения, любое ускорение есть результат действия на движущееся тело со стороны других тел.*

Если под действием тела A материальная точка испытывает ускорение, то мы говорим, что на эту точку действует со стороны тела A сила F .

В общем случае силу F мы определяем как физическую величину, характеризующую действие, оказываемое одним телом на другое. Эта векторная величина определяется численной величиной или модулем $|F| = F$, направлением в пространстве и *т о ч к о й п р и л о ж е н и я*.

Если на материальную точку действуют две силы F_1 и F_2 , то их действие эквивалентно действию одной силы

$$F' = F_1 + F_2,$$

получаемой из известного треугольника сил.

Если к материальной точке приложены три силы F_1 , F_2 и F_3 , то они складываются по тому же правилу:

$$F_1 + F_2 = F', \\ F_1 + F_2 + F_3 = F' + F_3 = F'',$$

как это показано на рис. 1.10, *а*. Равнодействующая этих трех сил F'' может быть проще построена в форме замыкающей многоугольника сил, как это показано на рис. 1.10, *б*. Когда на

точку действует n сил, равнодействующая F , являющаяся геометрической суммой данных сил

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^{i=n} F_i, \quad (3.2)$$

строится по тому же правилу многоугольника.

Динамическое проявление силы состоит в том, что под действием силы материальное тело испытывает ускорение. Статическое действие силы приводит к тому, что упругие тела (пружины) под действием сил деформируются, газы — сжимаются и т. д.

Количественное измерение силы и установление единицы силы может быть дано лишь в связи с другими, связанными с силой величинами; к этому вопросу мы вернемся ниже.

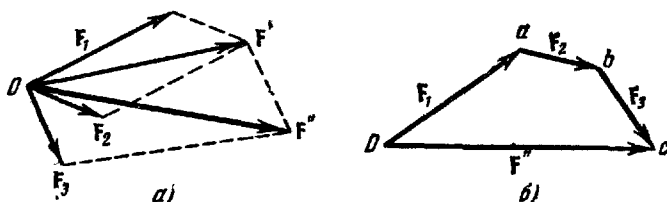


Рис. 1.10.

Опыт показывает, что под действием одной и той же силы различные тела испытывают неодинаковые ускорения, т. е. изменение их инерциального движения различно. Мы говорим, что различна инерция этих тел.

Физической величиной, характеризующей инертность материального тела, является его масса.

Ньютон определил массу как количество вещества, содержащегося в теле. Это определение массы нельзя считать строгим и исчерпывающим. Как и другие физические понятия, понятие массы раскрывается лишь при изучении всех ее свойств и проявлений, которые будут рассмотрены далее. Определением Ньютона можно пользоваться, понимая его в том смысле, что масса двух одинаковых и одинаково движущихся тел вдвое больше массы одного из них. В действительности же масса одного и того же тела может, как мы увидим дальше, меняться при движении.

Отметим сразу же, что масса характеризует не только инерцию материального тела, но и его гравитационные свойства: сила притяжения, испытываемая данным телом со стороны другого тела, пропорциональна их массам. Далее мы увидим, что масса также определяет полный запас энергии материального тела (§ 9).

Величину массы определяют по различным ее проявлениям (инерции, тяготению) путем сравнения с массой какого-нибудь

эталонного тела, произвольно принятой за единицу. За единицу массы в системе СГС принимают $1/1000$ массы международного платиноиридиевого эталона, хранящегося в Париже. Эта единица с точностью до $\sim 0,003\%$ равна массе 1 см^3 дистиллированной воды при 4°C и в $6,02 \cdot 10^{23}$ раз больше массы неподвижного протона (ядра атома водорода). Единицей массы в системе единиц СИ служит масса самого эталона $1 \text{ кг} = 1000 \text{ г}$.

Введение понятия массы позволяет нам теперь уточнить данное нами в § 1 определение материальной точки. *Материальной точкой называется тело, при изучении движения которого можно отвлечься от всех его свойств, кроме массы.* Каждая материальная точка, следовательно, характеризуется величиной своей массы m .

Обобщая результаты опытов Галилея по падению тяжелых тел, астрономические законы Кеплера о движении планет, данные собственных исследований и т. п., Ньютон сформулировал в т о р о й основной законе динамики, количественно связывающий изменение движения материального тела с силами, вызывающими это изменение движения.

При действии сил движение тела перестает быть равномерным и прямолинейным и появляется ускорение w . Направление его совпадает с направлением действия силы.

Сопоставляя действие различных сил на одно и то же тело данной массы m , мы убеждаемся в том, что величина возникающего ускорения прямо пропорциональна величине действующей силы. Следовательно,

$$w \sim F \text{ при } m = \text{const.} \quad (3.3)$$

При действии одной и той же силы на различные тела ускорения этих тел оказываются различными. Чем больше масса тела m , тем больше его инертность и тем меньшее ускорение w под действием данной силы F оно получает. Опыт показывает, что

$$w \sim \frac{1}{m} \text{ при } F = \text{const,} \quad (3.4)$$

т. е. ускорение, получаемое телом под действием данной силы, обратно пропорционально величине его массы. Соотношение (3.4) показывает, что масса тела m является количественной мерой его инертности. Объединяя (3.3) и (3.4), получаем, что

$$w \sim \frac{F}{m}, \text{ или } F \sim mw. \quad (3.5)$$

Вводя соответствующий коэффициент пропорциональности k , мы можем записать соотношение (3.5) в виде

$$F = kmw. \quad (3.6)$$

Величина k зависит от выбора системы единиц измерения массы, ускорения и силы. В физике принято выбирать единицу силы так, чтобы $k = 1$; тогда уравнение (3.6) принимает вид

$$\boxed{F = mw.} \quad (3.7)$$

Уравнение (3.7) представляет математическую запись второго основного закона динамики в классической механике:

Вектор силы, действующей на материальную точку, численно равен произведению массы точки на вектор ускорения, возникающего при действии этой силы.

При указанном выборе коэффициента пропорциональности $k = 1$ единицы измерения силы, массы и ускорения не являются независимыми. Единицы измерения ускорения также принято выбирать не произвольно, а выражать их через единицы длины (пути) и времени — физические величины, которыми в соответствии с формулами (2.6) и (2.2) определяется ускорение. Таким образом, в формулу (3.7) входят четыре физические величины — сила, масса, путь и время, — измеряемые своими единицами, и эти единицы оказываются связанными друг с другом одним уравнением. Единицы измерения любых трех из них могут быть определены произвольно, а оставшаяся четвертая единица определяется через уже введенные.

Чаще всего в качестве основных единиц вводят единицы длины, времени и массы. Так, если массу выражать в г, а ускорение в $\text{см}/\text{с}^2$, то силу надо измерять в динах. Дина (дин) есть единица силы в системе СГС и представляет собой такую силу, которая массе в 1 г сообщает ускорение $1 \text{ см}/\text{с}^2$. В системе единиц СИ масса измеряется в кг, ускорение — в $\text{м}/\text{с}^2$, а сила — в ньютонах. Ньютон (Н) есть такая сила, которая массе в 1 кг сообщает ускорение $1 \text{ м}/\text{с}^2$. Легко видеть, что

$$1 \text{ Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \frac{1000 \text{ г} \cdot 100 \text{ см}}{\text{с}^2} = 10^5 \frac{\text{г} \cdot \text{см}}{\text{с}^2} = 10^5 \text{ дин.}$$

В технической системе единиц в качестве основных выбирают единицы длины, времени и силы. *Единица массы будет при этом уже не основной, а производной единицей.* В этой системе единицей силы является сила веса 1 кгс (килограмм-сила), т. е. такая сила, которая массе в 1 кг сообщает ускорение $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$. Следовательно,

$$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н} = 9,81 \cdot 10^5 \text{ дин}$$

и

$$1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс.}$$

Следует отметить, что первый и второй основные законы динамики не являются независимыми: первый есть частный случай вто-

рого. Действительно, если на материальную точку не действует сила, т. е. $F = 0$, то из второго закона (3.7) следует, что

$$mw = 0,$$

или, в силу того, что m отлично от нуля,

$$w = \frac{dv}{dt} = 0.$$

Но равенство нулю ускорения означает, что приращение скорости Δv равно нулю, т. е. что скорость остается постоянной.

До сих пор мы рассматривали лишь одну сторону взаимодействия между телами: влияние других тел на характер движения данного выделенного тела (материальной точки). Такое влияние не может быть односторонним, взаимодействие должно быть, по сути дела, обоюдным. Этот факт отражается третьим законом динамики, сформулированным для случая взаимодействия двух материальных точек (рис. 1.11):

Если материальная точка m_2 испытывает со стороны материальной точки m_1 силу, равную $F_{1,2}$, то m_1 испытывает со стороны m_2 силу $F_{2,1}$, равную по величине и противоположную по направлению $F_{1,2}$:

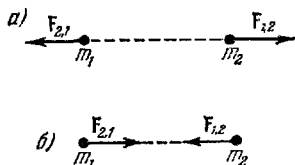


Рис. 1.11.

$$\boxed{F_{2,1} = -F_{1,2}} \quad (3.8)$$

Эти силы действуют всегда вдоль прямой, проходящей через точки m_1 и m_2 , как показано на чертеже. Рис. 1.11, а относится к случаю, когда силы взаимодействия между точками являются силами отталкивания. На рис. 1.11, б изображен случай притяжения.

В случае произвольно большого множества точек взаимодействие в такой системе согласно третьему закону динамики сводится к парным взаимодействиям между любыми двумя точками. Это означает, что сила, испытываемая, например, материальной точкой m_3 системы, складывается из сил, действующих со стороны точек $m_1, m_2, m_4, m_5, \dots$:

$$F_3 = F_{1,3} + F_{2,3} + F_{4,3} + \dots$$

При этом, например, сила $F_{1,3}$ определяется только характером взаимодействия точек m_3 и m_1 и от других точек не зависит.

Часто употребляются сокращенные формулировки третьего закона динамики: «действие равно противодействию» — и ей подобные, в которых не подчеркивается важное обстоятельство: силы действия и противодействия приложены всегда к различным

телам и поэтому никогда не уравновешивают друг друга. Если запомнить это последнее обстоятельство, вытекающее из точной формулировки третьего закона динамики, то никогда не возникнет вопроса о том, почему, например, лошадь движет телегу вперед, хотя их взаимные действия друг на друга и равны.

Когда человек идет по земле, то сила, с которой он отталкивает землю назад, равна по величине и направлена обратно той силе, с которой земля отталкивает человека вперед. При равенстве этих сил, однако, согласно второму закону динамики, возникающие ускорения обратно пропорциональны массам, и землю благодаря ее очень большой сравнительно с человеком массе можно считать практически неподвижной.

Подчеркнем наконец, что явления природы протекают одинаково (следовательно, законы природы имеют один и тот же вид) во всех инерциальных системах отсчета. Для классической механики это было установлено Галилеем — «принцип относительности Галилея». Подробнее об этом будет рассказано в томе III нашего курса.

§ 4. Закон сохранения и изменения количества движения (импульса). Реактивное движение

Второй закон Ньютона (3.7) позволяет найти ускорение движущейся точки в каждый данный момент времени. На практике чаще всего необходимо найти изменение движения тела за какой-нибудь определенный промежуток времени. Для решения этой задачи следовало бы применять второй закон динамики бесчисленное число раз, во все промежуточные моменты времени. Поэтому целесообразно предварительно преобразовать основные законы динамики и вывести из них ряд следствий, позволяющих находить конечные скорости тел сразу, без вычисления ускорений и скоростей во всех промежуточных точках. Первым таким практически важным следствием из основных законов динамики является так называемый закон количества движения (часто вместо термина «количество движения» ныне применяется термин «импульс»). Используя (2.6), перепишем второй закон Ньютона (3.7) в виде

$$\mathbf{F} = m \cdot \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}. \quad (4.1)$$

Рассмотрим конечный, но малый промежуток времени Δt , в течение которого действующая на материальную точку сила \mathbf{F} не успевает заметно измениться ни по величине, ни по направлению. Заменяя тогда в (4.1) величины \mathbf{F} и \mathbf{w} их средними значениями за промежуток времени Δt , получим:

$$\mathbf{F}_{\text{ср}} = m \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}.$$