

§ 9. Границы применимости законов классической механики

Три вышеизложенных закона динамики обобщают человеческий опыт изучения движения больших — м а к р о с к о п и ч е с к и х («микрос» по-гречески — маленький, а «макрос» — большой) тел при не слишком больших скоростях движения. Многочисленные следствия и конкретные выводы из этих законов неизменно подтверждаются на практике (расчет движения машин, снарядов, небесных тел, обладающих скоростями в десятки километров в секунду и т. д.).

В целом механика небыстрых макроскопических движений, базирующаяся на своих законах и располагающая своими методами, имеет стройную, законченную форму и носит название к л а с с и ч е с к о й м е х а н и к и.

Широкий охват опытного материала, отсутствие противоречий с наблюдениями привели многих исследователей XIX века к ложной мысли об абсолютной правильности и универсальности классической механики.

Однако в конце XIX и начале XX веков были обнаружены явления, которые оказались невозможным понять в рамках законов классической механики. В связи с этим началось изучение движения и взаимодействия микроскопических частиц материи — атомов и электронов. Широкое развитие электротехники дало возможность физикам разгонять заряженные электроны в сильных электрических полях до очень больших скоростей, во много раз превысивших и скорости полета снарядов на земле, и наблюдаемые скорости движения небесных тел. Изучение строения атомов показало, что внутри последних электроны также движутся с огромными скоростями порядка десятков и сотен тысяч километров в секунду.

К началу XX века стало очевидным, что законы классической механики являются лишь приближением к действительности, не отражающим целого ряда новых, ранее неизвестных явлений. Для установления границ применимости законов классической механики рассмотрим вкратце некоторые новые факты, установленные за последние 50—60 лет.

В классической механике принималось, что масса тела m , характеризующая количество материи, заключенное в теле, его инерцию и тяготение, есть неизменная величина ($m = \text{const}$). В конце XIX века было экспериментально установлено, что масса быстро движущегося электрона m превышает массу покоящегося электрона m_0 и возрастает со скоростью движения v по закону

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (9.1)$$

где $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с $= 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость распространения света в вакууме.

Формула (9.1) оказалась справедливой не только для электрона, но и для других материальных частиц. Она дает критерий для оценки границ применимости классической механики.

Пусть v равно 300 км/с, т. е. $v/c = 0,001$. Тогда масса движущегося тела m будет превышать массу покоя m_0 всего на $0,5 \cdot 10^{-6} m_0$. При этой скорости масса 1 кг увеличится всего на 0,5 мг. Следовательно, при скоростях, малых по сравнению со скоростью света (а такими будут скорости даже в несколько сотен километров в секунду), истинная масса тела m практически не отличается от его массы покоя m_0 и может считаться постоянной. Это значит, что при таких скоростях законы классической механики остаются с высокой степенью точности справедливыми, и ими можно пользоваться для расчета движения обычных машин и механизмов, полета снарядов и движения небесных тел.

Таким образом, условие

$$\boxed{v \ll c} \quad (9.2)$$

дает количественную оценку скоростей движений, для которых еще применимы законы классической механики.

Отказ от одного из основных положений классической механики ($m = \text{const}$) привел к необходимости критического анализа и ряда других ее основ. Такой пересмотр основных представлений о пространстве и времени был произведен в 1905 г. А. Эйнштейном, создавшим новую теорию, названную им теорией относительности.

В этой теории выражение (9.1) вытекает как следствие ее основных постулатов.

Проанализируем причину возрастания массы движущегося тела. При малых скоростях движения $v \ll c$, и формулу (9.1) можно преобразовать с помощью бинома Ньютона:

$$\begin{aligned} m &= m_0 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = m_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(-\frac{v^2}{c^2}\right) + \dots\right] = \\ &= m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2} + \dots \approx m_0 + \frac{K}{c^2} \end{aligned} \quad (9.3)$$

(члены ряда, содержащие (v/c) в четвертой и более высоких степенях, отброшены ввиду их малости).

Таким образом, увеличение массы связано с тем, что тело приобрело кинетическую энергию. Приращение массы $m - m_0 = \Delta m$ прямо пропорционально кинетической энергии:

$$\Delta m = \frac{K}{c^2}, \text{ или } K = c^2 \cdot \Delta m. \quad (9.4)$$

Установленная таким образом *взаимосвязь* (9.4) *между массой и энергией является совершенно универсальной*, т. е. применимой к любым массам и формам энергии — кинетической и потенциальной. Так, например, если две частицы с массами покоя $m_{1,0}$ и $m_{2,0}$ при сближении друг с другом на некоторое расстояние взаимодействуют так, что их потенциальная энергия равна U , то масса всей системы M будет равна

$$M = m_{1,0} + m_{2,0} + \frac{U}{c^2}. \quad (9.5)$$

При взаимном отталкивании частиц $U > 0$ и добавка к массам покоя U/c^2 положительна. При взаимном протяжении частиц $U < 0$ и масса системы меньше суммы масс составляющих ее не-взаимодействующих ($U = 0$) частиц.

Умножая (9.3) на c^2 , получим:

$$mc^2 = m_0c^2 + K = E_0 + K = E.$$

Равенство

$$\boxed{E = mc^2} \quad (9.6)$$

представляет собой количественную формулировку закона *взаимосвязи (пропорциональности) массы и энергии*, справедливого для любых тел. Величина

$$E_0 = m_0c^2 \quad (9.7)$$

есть энергия, внутренне присущая частице, и называется *собственной энергией*, или «энергией покоя» частицы. Классическая механика эту величину E_0 не учитывала вовсе, считая, что при $v = 0$ энергия покоящегося тела равна нулю.

В классической механике масса тела считалась постоянной и соотношения (4.2) и (4.4) эквивалентными друг другу. При учете зависимости (9.1) массы от скорости эта эквивалентность пропадает ($m \cdot \Delta v \neq \Delta(m \cdot v)$). Справедливым оказывается лишь закон импульсов, и правильная запись второго закона динамики имеет вид

$$F = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(mv)}{\Delta t},$$

в котором его писал сам Ньютон.

Подробнее о теории относительности, ее основных положениях и выводах будет сказано в третьем томе курса (т. III, гл. VIII). Там же (т. III, гл. XIII) будут указаны границы применимости классической механики, обусловленные волновой природой элементарных частиц.