

Энергетический выход ядерных реакций в миллионы раз больше, чем химических реакций. На ядерных реакциях соотношение между массой и энергией (13.2) подтверждено экспериментально. В ядерной физике и физике элементарных частиц это соотношение играет исключительную роль.

§ 17. О законах трения

1. В механике обычно имеют дело с силами всемирного тяготения, упругими силами и силами трения. Иногда в механику включаются также задачи на движение электрически заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Тогда к указанным силам добавляются еще электромагнитные силы, т. е. силы, которым подвержены заряженные частицы со стороны таких полей. Силы всемирного тяготения и упругие силы будут подробно рассмотрены в дальнейшем. Сейчас же мы кратко рассмотрим *силы трения*. Заметим при этом, что механика не занимается изучением физической природы действующих сил — эти вопросы рассматриваются в других разделах физики. Поэтому мы здесь совсем не будем затрагивать вопрос о происхождении сил трения, а ограничимся описанием эмпирически найденных *законов трения*. Понятно, что эти вопросы при всей их важности не имеют все же того фундаментального значения, каким характеризуются, например, законы Ньютона, а сами законы трения являются приближениями, часто довольно грубыми.

Упругие силы, силы всемирного тяготения, а также силы притяжения и отталкивания электрически заряженных тел зависят только *от конфигурации тел*, т. е. от их взаимного расположения, но не от их скоростей. Силы трения, помимо конфигурации, зависят еще *от относительных скоростей тел*, между которыми они действуют.

Силы трения могут действовать между соприкасающимися телами или их частями как при их относительном движении, так и при их относительном покое. Трение называется *внешним*, если оно действует между различными соприкасающимися телами, не образующими единого тела (например, трение между бруском и наклонной плоскостью, на которой он лежит или с которой он соскальзывает). Если же трение проявляется между различными частями одного и того же тела, например между различными слоями жидкости или газа, скорости которых непрерывно меняются от слоя к слою, то трение называется *внутренним*. Впрочем, разделение трения на внутреннее и внешнее носит условный характер. Если соприкасающиеся тела объединить в одну механическую систему, то трение, которое ранее рассматривалось как внешнее, становится внутренним. Сила трения, испытываемая твердым телом при движении в жидкости (или газе), есть сила внутреннего трения в жидкости,

а не внешнего трения между жидкостью и твердым телом. Действительно, опыт показывает, что слои жидкости или газа, непосредственно примыкающие к поверхности тела, прилипают к ней и движутся вместе с телом, а трение возникает в окружающей среде между различными слоями ее, соприкасающимися друг с другом.

Трение между поверхностями двух соприкасающихся твердых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки (смазки) называется *сухим*. Применительно к этому случаю, когда соприкасающиеся тела движутся друг относительно друга, различают *трение скольжения* и *трение качения*. Трение между поверхностью твердого тела и окружающей его жидкой или газообразной средой, в которой оно движется, а также трение между различными слоями такой среды, называется *жидким* или *вязким*.

2. Рассмотрим сначала законы сухого трения. Такое трение возникает не только при скольжении одного тела по поверхности другого, но и при всякой попытке вызвать такое скольжение. В последнем случае трение называется *трением покоя* или *трением сцепления*. Наличие трения покоя — характерная особенность сухого трения. В более общем смысле, безотносительно к тому, между какими телами возникает трение, оно называется *сухим*, если силы трения не исчезают при обращении в нуль относительных скоростей соприкасающихся тел. В противоположном случае трение называется *жидким*. Положим тяжелый брусок на поверхность горизонтального стола (рис. 27). В состоянии покоя вес бруска P уравновешен силой нормального давления f_n , с которой на брусок действует стол ($P = f_n$). Приложим затем к бруску горизонтальную силу f , лежащую в вертикальной плоскости, проходящей через его центр масс, как можно ближе к поверхности стола, чтобы предотвратить опрокидывание бруска, когда он придет в движение. Опыт показывает, что если сила f не превосходит некоторой определенной величины f_0 ($f < f_0$), то брусок не приходит в движение. Отсюда следует сделать вывод, что на брусок со стороны стола действует равная и противоположно направленная сила $f_{тр}$, уравновешивающая силу f . Это и есть сила трения, а именно трения покоя. Такая же сила трения, но в противоположном направлении, действует на поверхность стола со стороны бруска. Сила трения покоя автоматически принимает значения, равные внешней силе f . Максимальное значение силы трения покоя равно f_0 .

Допустим теперь, что брусок скользит по поверхности стола со скоростью v . При равномерном движении действующая сила f по-прежнему уравновешивается силой трения $f_{тр}$. Если равно-

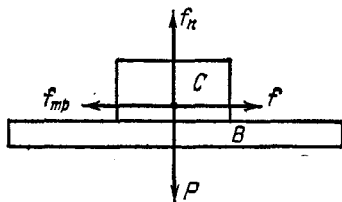


Рис. 27.

веса нет, то движение будет ускоренным. В обоих случаях величина силы трения $f_{\text{тр}}$, вообще говоря, зависит от скорости v . Характер этой зависимости графически изображен на схематическом рис. 28. Сила трения, приложенная к поверхности бруска, всегда действует против направления движения последнего. На графике это отражено тем, что знаки величин $f_{\text{тр}}$ и v всегда противоположны. При $v = 0$ график вырождается в отрезок вертикальной прямой. Этому соответствует тот факт, что сила трения покоя может принимать любое значение от $-f_0$ до $+f_0$. При увеличении абсолютной величины скорости абсолютная величина силы трения сначала убывает, проходит через минимум, а затем начинает возрастать. Вся кривая симметрична относительно начала координат [$f(+v) = -f(-v)$]. Как экспериментально установил Кулон (1736—1806),

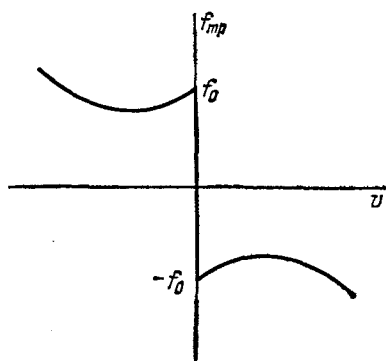


Рис. 28.

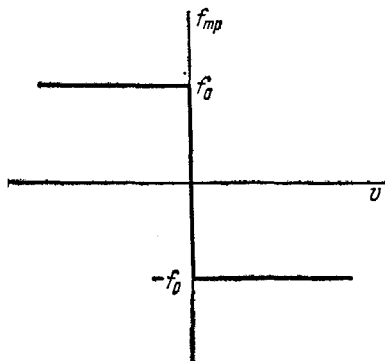


Рис. 29.

величина силы трения $f_{\text{тр}}$ не зависит от величины площади поверхности, вдоль которой тела соприкасаются, и пропорциональна силе нормального давления f_n , с которой одно тело действует на другое. Поэтому можно написать

$$f_{\text{тр}} = \mu f_n. \quad (17.1)$$

Постоянная μ называется *коэффициентом трения* и зависит от природы и состояния трущихся поверхностей. Если тело действительно скользит по поверхности другого тела, то μ называют *коэффициентом трения скольжения*. Если же тела покоятся друг относительно друга, то его называют *коэффициентом трения покоя*. В последнем случае предполагается, что в формуле $f_{\text{тр}}$ равно f_0 , т. е. максимальному значению, которое может принимать сила трения покоя. В соответствии с рис. 28 коэффициент трения μ , вообще говоря, зависит от величины скорости v . Впрочем, как также установил Кулон, эта зависимость, как правило, выражена слабо, так что, когда не требуется большая точность, коэффициент μ можно считать независимым от скорости. Тогда кривая рис. 28 вырождается

в кривую рис. 29. Сила трения и в этом идеализированном случае зависит от v , поскольку при переходе скорости через нуль она меняет знак, а при $v = 0$ становится неопределенной. Во всех задачах на силы трения, приводимых в конце этого параграфа, предполагается, что μ не зависит от v .

Независимость силы трения покоя от площади соприкосновения тел можно демонстрировать с помощью следующего опыта. Брусок (например, кирпич), имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, кладется различными гранями на наклонную плоскость. Увеличивая угол наклона наклонной плоскости, на опыте убеждаемся, что скольжение начинается при одном и том же угле, независимо от того, какой гранью брусок был положен на наклонную плоскость.

3. При наличии сухого трения тело может находиться в состоянии покоя, даже если на него подействовать какой-либо силой. Если приложенная сила f не превосходит максимального значения f_0 силы трения покоя, то тело не придет в движение. С этой особенностью сухого трения связано так называемое явление застоя. Допустим, например, что тело A , лежащее на поверхности горизонтального стола, находится в равновесии, когда обе прикрепленные к нему пружины не растянуты или растянуты одинаково (рис. 30). В этом положении сила, действующая на тело A , равна нулю. Сместим

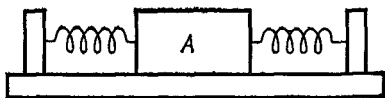


Рис. 30.

тело A из положения равновесия в ту или другую сторону. Если сила f , действующая со стороны растянутых пружин, не превосходит f_0 , то тело A и в новом положении останется в равновесии. На поверхности стола не существует определенного положения равновесия тела. Напротив, существует область, при смещении в пределах которой тело остается в равновесии. Эта область называется *областью застоя*. Сухое трение, действующее, например, в подшипниках измерительных приборов со стрелками, ограничивает чувствительность таких приборов. Наличие же области застоя делает неопределенным положение равновесия, в котором устанавливается стрелка при измерениях, т. е. ограничивает точность измерения.

4. Во многих случаях силы трения оказываются полезными. Так, автомобиль приводится в движение силами трения, действующими между шинами колес и полотном дороги. Силы трения приводят в движение поезда. Силы трения, возникающие между приводным ремнем и шкивами, осуществляют передачу движения от одного маховика к другому. Подобных примеров можно привести неограниченно много. Но сплошь и рядом силы трения являются вредными. Таковы, например, силы трения, возникающие между осью и втулкой, а также между другими деталями машины. Они приводят к преждевременному износу машин, и с ними приходится бороться. Для этой цели применяется *смазка*. Однако более радикальным

способом уменьшения сил трения является замена трения скольжения трением качения (шарикоподшипники). Под трением качения понимают трение, возникающее, например, между шарообразным или цилиндрическим телом, катящимся без скольжения по плоской или изогнутой поверхности. Трение качения формально подчиняется тем же законам, что и трение скольжения. Однако коэффициент трения при качении значительно меньше, чем при скольжении. Наиболее радикальным способом уменьшения сил трения, который за последнее время начинает получать все большее и большее распространение, является создание «воздушной подушки» между соприкасающимися поверхностями.

5. Как уже говорилось выше, в отличие от сил сухого трения, силы жидкого или вязкого трения обращаются в нуль вместе с относительными скоростями между соприкасающимися слоями среды. Более подробно вопрос о вязком трении будет разобран в механике жидкостей и газов, а также в кинетической теории газов. Здесь же мы очень кратко рассмотрим только силы жидкого трения, возникающие при движении твердого тела в жидкой или газообразной среде. Помимо сил, обусловленных собственно внутренним трением, на поверхность движущегося тела со стороны среды действуют также силы нормального давления. Результирующая этих нормальных давлений имеет составляющую, направленную против движения тела. Такая составляющая называется *силой сопротивления среды*. При больших скоростях она во много раз превосходит силы сопротивления, обусловленные собственно вязким трением. При рассмотрении движения тела в вязкой среде эти две силы целесообразно объединить вместе. Такую суммарную силу, направленную против скорости движущегося тела, условно будем называть также *силой трения* и обозначать символом $f_{\text{тр}}$.

При малых скоростях сила $f_{\text{тр}}$ пропорциональна первой степени скорости тела:

$$f_{\text{тр}} = -k_1 v. \quad (17.2)$$

При возрастании скорости зависимость становится более сложной, а затем сила трения начинает возрастать приблизительно пропорционально квадрату скорости:

$$f_{\text{тр}} = -k_2 v^2 \frac{v}{v} = -k_2 v v. \quad (17.3)$$

«Коэффициенты трения» k_1 и k_2 , а также область скоростей, в которой осуществляется переход от линейного закона (17.2) к квадратичному (17.3), в сильной степени зависят от формы и размеров тела, направления его движения, состояния поверхности тела и от свойств окружающей среды. Искусственно увеличивая поверхность тела и придавая ей надлежащую форму, можно сильно увеличить значения коэффициентов k_1 и k_2 . На этом основано устройство и действие парашюта (см. задачу 8 к этому параграфу).

ЗАДАЧИ

1. Удобный метод измерения коэффициента трения покоя состоит в следующем. Тело кладется на наклонную плоскость. Измеряется минимальный угол наклона плоскости α , при котором начинается скольжение. Найти связь между углом α и коэффициентом трения μ .

Ответ: $\mu = \operatorname{tg} \alpha$.

2. Человек может, хотя и медленно, привести в движение тяжелую баржу на воде, если он будет тянуть за канат, привязанный к ней. Но он не в состоянии сделать это с тяжелым телом, лежащим на земле, если даже вес этого тела заметно меньше веса баржи. Почему?

3. Положите стержень в горизонтальном положении на указательные пальцы ваших рук. Вначале пальцы должны быть разведены, а стержень должен лежать на них своими концами. Затем приближайте пальцы друг к другу. Около какой точки стержня они сойдутся? После этого пальцы снова разведите так, чтобы стержень все время лежал на них в горизонтальном положении. В каком месте будет находиться один из пальцев, когда другой достигнет конца стержня? Произведите этот опыт и объясните наблюдаемые явления.

4. Шофер, едущий на автомобиле по горизонтальной площади в тумане, внезапно заметил недалеко впереди себя стену, перпендикулярную к направлению движения. Что выгоднее: затормозить или повернуть в сторону, чтобы предотвратить аварию?

Ответ. Затормозить.

5. Автомобиль движется с постоянной скоростью вдоль извилистой горизонтальной дороги. Принимая дорогу за синусоиду, найти максимальную скорость, которую может развивать автомобиль, чтобы не было заноса.

Решение. Если автомобиль движется по криволинейной траектории с постоянной по величине скоростью, то его ускорение a будет только нормальным. Это ускорение создается силой трения покоя между колесами автомобиля и полотном дороги: $f_{\text{тр}} = ma$. Если скорость автомобиля превзойдет определенный предел, то для удержания автомобиля на требуемой траектории, где кривизна ее велика, максимальной силы трения f_0 будет недостаточно ($f_0 < ma$). Автомобиль начнет скользить в направлении нормали к траектории. При этом в соответствии с графиком рис. 28 сила трения скольжения уменьшится, что приведет к дальнейшему боковому смещению автомобиля с траектории. В этом и состоит явление заноса. При движении по синусоиде нормальное ускорение максимально в ее вершинах, где кривизна кривой максимальна. Если $y = y(x)$ — уравнение синусоиды, то в вершинах $y' = 0$, и радиус кривизны в этих точках можно вычислить по формуле $\frac{1}{R} = |y''|$. Имея все это в виду и записав уравнение синусоиды в виде $y = A \sin 2\pi \frac{x}{l}$ (амплитуда A и пространственный период l постоянны), нетрудно получить условие, при котором заноса не будет:

$$v < \frac{l}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu g}{A}},$$

где μ — коэффициент трения, g — ускорение силы тяжести.

6. Решить ту же задачу, предполагая, что автомобиль движется с постоянной скоростью по эллипсу с полуосями A и B . В каких точках траектории нормальное ускорение автомобиля достигает максимального и минимального значений? Найти эти значения.

Ответ. $a_{\text{макс}} = \frac{Av^2}{B^2}$, $a_{\text{мин}} = \frac{Bv^2}{A^2}$. Заноса не будет при условии

$$v < B \sqrt{\frac{\mu g}{A}}.$$

7. Предполагая, что обе пружины на рис. 30 одинаковы, найти для тела A размеры области застоя.

О т в е т. Центр основания тела A может находиться в равновесии в любой точке в пределах области

$$-\frac{\mu P}{2k} < x < +\frac{\mu P}{2k},$$

где P — вес тела, μ — коэффициент трения, k — коэффициент упругости пружины (одной). За начало координат принят центр области застоя.

8. Парашютист совершает затяжной прыжок. Считая массу парашютиста m равной 70 кг, найти установившиеся скорости его падения без парашюта и с раскрытым парашютом. Для человеческого тела при падении без парашюта коэффициент k_2 по порядку величины равен 2 г/см. При раскрытом парашюте этот коэффициент возрастает примерно в 100 раз, т. е. составляет приблизительно 200 г/см.

Р е ш е н и е. Установившаяся скорость падения найдется из условия, чтобы вес человека $P = mg$ уравновешивался силой трения. Это дает

$$v = \sqrt{\frac{mg}{k_2}} \approx \begin{cases} 60 \text{ м/с без парашюта;} \\ 6 \text{ м/с с раскрытым парашютом.} \end{cases}$$