

**Лекция №15** Движение тел при наличии трения. Силы трения. Сухое трение. Статическое и кинематическое трение. Трение скольжения и трение качения. Жидкое трение. Движение тел в вязкой среде. Значение сил трения в технике.

Л-1: 7.11-7.13; Л-2: с. 82-92

*Силами трения* называют силы, возникающие при соприкосновении поверхностей двух тел или частей одного тела и препятствующие их взаимному перемещению. Они приложены к телам (или к их частям) вдоль поверхности соприкосновения и всегда направлены в сторону, противоположную относительной скорости движения.

Силы трения отличаются от рассматриваемых в механике сил всемирного тяготения и упругих сил тем, что эти силы зависят не только от конфигурации тел, т.е. от их взаимного расположения, но также еще от относительных скоростей тел, между которыми они действуют. Отметим, что силы трения зависят от многих факторов, которыми сопровождается движение тел при наличии трения. В связи с этим описание сил трения возможно лишь при помощи эмпирически найденных приближенных законов, которые часто являются довольно грубыми.

Если силы трения действуют между различными соприкасающимися телами (например, между телом и плоскостью, по которой оно движется или находится в покое), то такое трение называется *внешним*. Чисто внешнее трение является *сухим* трением, оно возникает в том случае, если между телами отсутствует слой смазки.

Силы сухого трения возникают не только при скольжении одного тела по поверхности другого, но и при попытке вызвать такое скольжение. Существует три вида внешнего трения: *трение покоя*, *трение скольжения* и *трение качения*. Существование трения покоя является характерной особенностью сухого трения.

Силы сухого трения существенно зависят от степени обработки соприкасаемых поверхностей, их чистоты и относительной скорости. Характерная особенность этих сил заключается в том, что сила трения не обращается в нуль и то-

гда, когда относительная скорость тел становится равной нулю. Сила трения, которая существует между телами, которые соприкасаются, но не движутся под действием приложенной силы, носит название силы трения покоя.

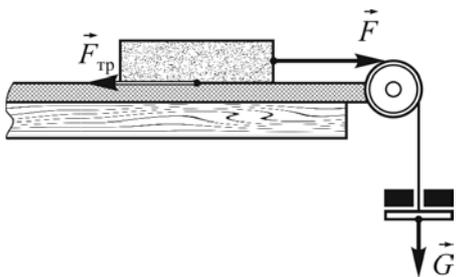


Рис. 15.1

Результаты опыта (рис.15.1) позволяют сделать вывод, что в том случае, когда на тело, находящееся на поверхности другого тела, вдоль поверхности их соприкосновения сила не действует, то сила трения при этом также равна нулю. Однако по мере возрастания величины внешней силы, которая должна была бы вызвать скольжение, будет возрастать и противоположно ей направленная сила трения покоя. Сумма рассматриваемых сил будет оставаться равной нулю до тех пор, пока тело не придет в движение. Как видно, сила трения покоя – неоднозначная величина. Она изменяется с изменением внешней силы так, чтобы уравновесить внешнюю силу. Изменение силы трения покоя происходит до некоторого максимального значения  $F_{\max}$ , при котором возникает скольжение данного тела по поверхности соприкасающегося с ним другого тела.

Таким образом, трение скольжения происходит тогда, когда одно тело, имея скорость по отношению другого, неподвижного тела, за все время движения соприкасается с ним определенной частью своей поверхности и скользит по нему.

Законы трения скольжения были сформулированы французскими физиками Гильомом Амонтоном (1663–1705) и независимо от него Шарлем Кулоном (1736–1806).

Кулон экспериментально установил, что сила трения  $F_{\text{тр}}$  не зависит от площади поверхности, вдоль которой тела соприкасаются, и пропорциональна силе нормального давления  $N$ , с которой одно тело действует на другое. Аналитический вид этого закона

$$F_{\text{тр}} = \mu N.$$

Постоянная  $\mu$  называется *коэффициентом трения* и зависит от природы и состояния трущихся поверхностей. Если тела покоятся друг относительно друга при максимальном значении, которое может принимать сила трения покоя,  $\mu$  называют *коэффициентом трения покоя*. Если же тело скользит по поверхности другого тела,  $\mu$  называют *коэффициентом трения скольжения*. Закон Кулона

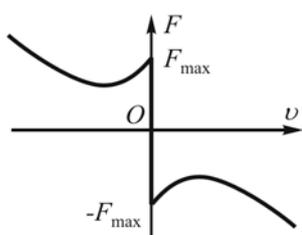


Рис. 15.2

является приближенной зависимостью, применимой лишь в условиях умеренных давлений.

Характер зависимости силы трения скольжения от скорости различен для разных тел и зависит от обработки поверхностей. Типичная такая зависимость изображена на рис. 15.2.

Сила трения скольжения вначале медленно падает с увеличением скорости, достигает минимального значения, а затем снова начинает возрастать. При скорости  $v=0$  сила трения может принимать любые значения по

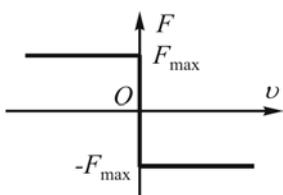


Рис. 15.3

абсолютной величине, меньшие или равные  $F_{\max}$ . Этому соответствует вертикальный участок характеристики, совпадающий с осью ординат. В некоторых специальных случаях (трение металлических тел при специальной обработке соприкасающихся поверхностей) сила трения скольжения для сравнительно небольшого интервала скоростей примерно равна предельной силе трения покоя и не зависит от скорости движения. Характерная зависимость силы трения от скорости в этих случаях изображена на рис. 15.3 и к ней применим закон Кулона.

Приборы, с помощью которых производят измерение сил трения скольжения, называются *трибометрами*. Рассмотрим суть метода измерения сил трения с помощью этого прибора.

Чтобы поддерживать скорость движущегося тела  $\vec{v}$  неизменной, на него необходимо постоянно действовать с силой  $\vec{F}$ , направленной в сторону движения, по модулю равной силе трения. Тогда эти две силы уравновесят друг друга и ускорение тела окажется равным нулю.

Трение называется *вязким*, если оно существует между поверхностью твердого тела и окружающей его жидкой или газообразной средой, в которой оно движется, а также трение между различными слоями такой среды. Иногда вязкое трение называют *жидким трением*. Поскольку силы вязкого трения возникают между различными частями одного и того же тела (например, в жидкостях и газах), скорости слоев которых непрерывно меняются от слоя к слою, то такое трение является *внутренним трением*.

При движении тел в жидкостях и газах на них действуют силы внутреннего (вязкого) трения и силы нормального давления со стороны среды. Суммарная сил давления, действующих на тело со стороны среды, имеет составляющую, направленную против движения тела. Данная составляющая получила название *силы сопротивления среды*. Для сил вязкого трения характерно отсутствие сил трения покоя, потому что силы вязкого трения обращаются в нуль, когда относительная скорость движения слоев среды оказывается равной нулю. В этом легко

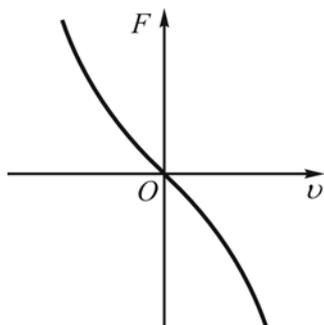


Рис. 15.4

убедиться на следующих примерах. Человек может привести в движение тяжелую баржу относительно воды, если он будет тянуть за канат, привязанный к ней; легкий порыв ветра приводит в движение поплавков удочки. Зависимость силы вязкого трения от скорости движения изображена на рис. 15.4. Сила вязкого трения с увеличением скорости в пределах относительно небольших скоростей растет сначала

линейно, а затем пропорционально квадрату скорости. Для малых скоростей сила вязкого трения

$$F = \mu_1 v.$$

При достаточно больших скоростях сила вязкого трения изменяется по квадратичному закону

$$F = \mu_2 v^2.$$

Коэффициенты  $\mu_1$  и  $\mu_2$  в значительной степени зависят от формы и размеров тела, направления его движения, состояния поверхности тела и от свойств окружающей среды.

Важной разновидностью внешнего трения является трение качения. Этот вид трения широко используется в технике вследствие значительно меньших значений силы трения качения по сравнению с внешним трением скольжения.

Основная причина, которая вызывает возникновение силы трения качения, обусловлена потерями энергии механического движения на упругий гистерезис, связанный со сжатием под нагрузкой катящегося тела и материала основания.

Для качественного объяснения возникновения сил трения качения рассмотрим более подробно качение цилиндра по горизонтальной плоскости. Опыт показывает, что при качении цилиндра без скольжения с течением времени он останавливается. Это вызвано тем, что при качении цилиндра возникает сила трения, которая препятствует его движению.

Рассмотрим случай, когда однородный цилиндр радиуса  $R$ , равномерно катится по горизонтальной плоскости. К оси цилиндра в этом случае должна быть

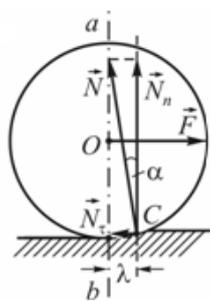


Рис. 15.5

приложена постоянная горизонтальная сила  $\vec{F}$  в направлении движения, равная по модулю силе трения качения  $F_k$  (рис. 15.5).

Также к оси приложена и сила тяжести  $P$ , направленная вертикально вниз. Результирующий момент этих сил, действующих на цилиндр относительно мгновенной оси вращения, которая совпадает с образующей цилиндра и проходит через точку  $C$  приложения силы реакции опоры, равен нулю. Разложим силу реакции

опоры  $\vec{N}$  на нормальную  $\vec{N}_n$  и касательную  $\vec{N}_\tau$  к горизонтальной поверхности составляющие:

$$N_n = N \cos \alpha;$$

$$N_\tau = N \sin \alpha.$$

Поскольку в практических случаях деформации невелики и угол  $\alpha$  ничтожно мал, то можем принять:

$$N_n \approx N \text{ и } mg \approx N.$$

Равенство моментов силы  $F$  относительно мгновенной оси вращения и силы тяжести  $P$  относительно этой оси приводит к соотношению

$$FR = mg\lambda \text{ или } FR = N\lambda.$$

Откуда

$$F_k = \lambda \frac{N}{R}.$$

В этой формуле расстояние  $\lambda$  между точкой приложения результирующей силы реакции опоры и вертикальной плоскостью, проходящей через ось цилиндра, называется *коэффициентом трения качения*. Как видно из рисунка  $\lambda$  представляет собой плечо силы тяжести относительно мгновенной оси вращения.

Коэффициент трения качения  $\lambda$  существенно зависит от природы трущихся тел, которые участвуют в трении качения, характера покрывающих их пленок и скорости качения. Обычно для металлов (сталь по стали) коэффициент  $\lambda$  лежит в пределах (0,01–0,02) мм.

Различные современные теории, объясняющие появление сил трения, сходятся на том, что основная причина явления – это неровности поверхностей соприкасающихся тел, деформации и диспергирование их, происходящие вследствие давления и трения во время движения.

Эти теории основываются на значении молекулярных сил, которые обуславливают трение даже идеально полированных поверхностей. В результате трения трущиеся поверхности нагреваются, что указывает на преобразование кинетической энергии во внутреннюю.

Вследствие волнистости и шероховатости каждой из поверхностей касание двух твердых тел происходит в дискретных областях, так называемых пятнах касания. *Пятна касания* – это элементарные площадки контакта, возникающие в результате упругих или пластических деформаций неровностей соприкасающихся тел. Размеры пятен касания зависят от свойств контактирующих тел и условий нагружения и колеблются в пределах от 1 до 50 мкм.

Шероховатости поверхностей накладываются друг на друга, поэтому при сдвиге в местах контакта возникают микродеформации. Электромагнитные силы

отталкивания, возникающие при этом, макроскопически проявляются как силы трения.

Наличие статического трения является причиной явления *застоя* во многих механизмах и измерительных приборах. Это явление заключается в том, что трогание с места и скольжение начинаются не сразу, а лишь после приложения некоторой определенной силы. Это создает известный предел повышению чувствительности, например, стрелочных приборов, который обусловлен тем, что ось стрелки прибора обычно укрепляется в подшипниках и вращение стрелки связано со скольжением оси в подшипнике.

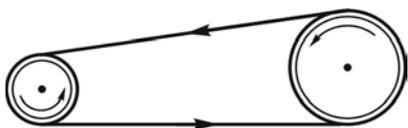


Рис. 15.6

Явлением застоя обусловлено отсутствие взаимного перемещения двух тел при действии касательных сил, меньших силы трения покоя. Это явление широко используется в технике для передачи усилий от одних деталей машины к другим (различные типы клиновидных передач) (рис. 15.6).

Ремень и ведомый шкив приводятся в движение силами статического трения, которые действуют между шкивами и надетым на них ремнем. Силы статического трения определяются силами, действующими на ведомый шкив. Если силы, которые действуют на ведомый шкив со стороны ведущего, оказываются большими, чем максимальная сила статического трения между ремнем и шкивом, то возникает скольжение ремня по ведомому шкиву. Поскольку сила трения скольжения меньше силы статического трения, то скорость ведомого шкива падает. В данном примере явление застоя играет положительную роль.

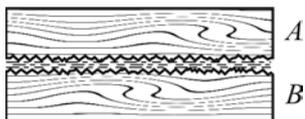


Рис. 15.7

При всех видах трения применение смазки значительно уменьшает силы трения. Влияние смазки заключается в том, что между трущимися поверхностями вводится слой вязкой жидкости (рис. 15.7), которая заполняет все неровности поверхностей и, прилипая к ним, образует два трущихся слоя жидкости. Поэтому вместо трения двух твердых поверхностей *A* и *B* при смазке возникает внутреннее трение жидкости, которое значительно меньше внешнего трения двух твердых поверхностей. Применение смазочных масел уменьшает трение в 8–10 раз.



Рис. 15.8

Типичный пример значения смазки представляет бег конькобежца на коньках. В результате действия силы со стороны конькобежца на нож конька снег тает и под коньком появляется вода, которая вновь

замерзает, после того как пробежал конькобежец и исчезло давление. Однако в механизмах вода для смазки не годится, поскольку вследствие малой вязкости она выдавливалась бы из зазора неровностей между трущимися поверхностями.

Потребности новой техники, где имеют место высокоскоростные и высокотемпературные режимы, привели к широкому применению различных смазочных материалов (как жидких, так и твердых) и созданию специальных самосмазывающихся материалов.

В повседневной жизни силы трения играют как положительную, так и отрицательную роль, причем их проявления разнообразны. На использовании статического трения основаны скрепление деталей при помощи гвоздей, движение человека и автомобиля по земной поверхности. Можно представить, какие возникли бы трудности при ходьбе, если бы не существовало сил статического трения (например, при гололеде). Вообще говоря, если бы не было сил трения, невозможно было бы удержать любой предмет в руке. Во многих случаях роль сил трения наоборот отрицательна. В первую очередь это касается деталей разных машин и механизмов, которые находятся в соприкосновении. В технике для уменьшения влияния сил сухого трения между поверхностями вводят смазку (вязкую жидкость, создающую тонкий слой между твердыми поверхностями). В наше время создаются вездеходы на «воздушной подушке», которая удерживает вездеход на некотором расстоянии от земли и резко уменьшает силу трения при его движении. Принцип действия вездехода-автомобиля на воздушной подушке поясняет рис. 15.8.