

## ЛЕКЦИЯ 5

### Трение

Трение принимает участие, и притом весьма существенное, там, где мы о нём даже и не подозреваем. Если бы трение внезапно исчезло из мира, множество обычных явлений протекало бы совершенно иным образом.

Трение представляет настолько распространенное явление, что нам, за редкими исключениями, не приходится призывать его на помощь: оно является к нам само.

Трение способствует устойчивости. Плотники выравнивают пол так, что столы и стулья остаются там, куда их поставили. Блюдца, тарелки, стаканы, поставленные на стол, остаются неподвижными без особых забот с нашей стороны, если только дело не происходит на пароходе во время качки.

Вообразим, что трение может быть устранено совершенно. Тогда никакие тела, будь они величиною с каменную глыбу или малы, как песчинки, никогда не удержатся одно на другом: всё будет скользить и катиться, пока не окажется на одном уровне.

Наглядный урок, убеждающий нас в огромной важности трения, даёт нам всякий раз гололедица. Застигнутые ею на улице, мы оказываемся беспомощными, и всё время рискуем упасть.

Однако, ничтожное трение на льду может быть успешно использовано технически. Например, так называемые ледяные дороги, которые устраивали для вывозки леса с места рубки к железной дороге или к пунктам сплава. На такой дороге, имеющей гладкие ледяные рельсы, две лошади тащат сани, нагруженные 70 тоннами брёвен.

#### **Трение покоя, скольжения.**

Прежде думали, что механизм трения не сложен: поверхность покрыта неровностями и трение есть результат подъёма скользящих частей на эти неровности; но это неправильно, ведь тогда не было бы потерь энергии, а на самом деле энергия на трение тратится.

Механизм потерь иной. И здесь крайне неожиданным оказывается, что эмпирически это трение можно приближенно описать простым законом. Сила, необходимая для того, чтобы преодолеть трение и тащить один предмет по поверхности другого, зависит от силы, направленной по нормали к поверхностям соприкосновения.

Поверхность твёрдого тела обычно обладает неровностями. При сжатии тел соприкосновение происходит только в самых высоких местах и площадь реального контакта значительно меньше общей площади соприкасающихся поверхностей. Давление в местах соприкосновения может быть очень большим, и там возникает пластическая деформация. При этом площадь контакта увеличивается, а давление падает. Так продолжается до тех пор, пока давление не достигнет определённого значения, при котором деформация прекращается. Поэтому площадь фактического контакта оказывается пропорциональной сжимающей силе.

В месте контакта действуют силы молекулярного сцепления (известно, например, что очень чистые и гладкие металлические поверхности прилипают друг к другу).

Эта модель сил сухого трения (так называют трение между твёрдыми телами), по-видимому, близка к реальной ситуации в металлах.

Если тело, например, просто лежит на горизонтальной поверхности, то сила трения на него не действует. Трение возникает, если попытаться сдвинуть тело, приложить к нему силу. Пока величина этой силы не превышает определённого значения, тело остаётся в покое и сила трения равна по величине и обратна по направлению приложенной силе. Затем начинается движение.

Может показаться удивительным, но именно сила трения покоя разгоняет автомобиль. Ведь при движении автомобиля колеса не проскальзывают относительно дороги, и между шинами и поверхностью дороги возникает сила трения покоя (рис.1). Как легко видеть, она направлена в сторону движения автомобиля. Величина этой силы не может превосходить максимального значения трения покоя. Поэтому если на скользкой дороге резко нажать на газ, то автомобиль начнет буксовать. А вот если нажать на тормоза, то вращение колёс прекратится, и автомобиль будет скользить по дороге. Сила трения изменит своё направление и начнёт тормозить автомобиль.

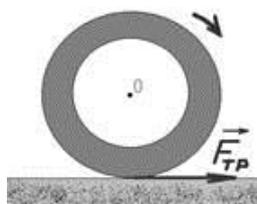


Рис.1

Сила трения при скольжении твёрдых тел зависит не только от свойств поверхностей и силы давления (это зависимость качественно такая же, как для трения покоя), но и от скорости движения. Часто с увеличением скорости сила трения сначала резко падает, а затем снова начинает возрастать.

Эта важная особенность силы трения скольжения как раз и объясняет, почему звучит скрипичная струна. Вначале между смычком и струной нет проскальзывания, и струна захватывается смычком. Когда сила трения покоя достигнет максимального значения, струна сорвется, и дальше она колеблется почти как свободная, затем снова захватывается смычком и т.д.

Подобные, но уже вредные колебания могут возникнуть при обработке металла на токарном станке вследствие трения между снимаемой стружкой и резцом. И если смычок натирают канифолью, чтобы сделать зависимость силы трения от скорости более резкой, то при обработке металла приходится действовать наоборот (выбирать специальную форму резца, смазку и т.п.). Так что важно знать законы трения и уметь ими пользоваться.

Кроме сухого трения существует ещё так называемое жидкое трение, возникающее при движении твёрдых тел в жидкостях и газах и связанное с их вязкостью. Силы жидкого трения пропорциональны скорости движения и об-

ращаются в нуль, когда тело останавливается. Поэтому в жидкости можно заставить тело двигаться, прикладывая даже очень маленькую силу. Например, тяжелую баржу на воде человек может привести в движение, отталкиваясь то дна шестом, а на земле такой груз ему, конечно, не сдвинуть. Эта важная особенность сил жидкого трения объясняет, например, тот факт, почему автомобиль «заносит» на мокрой дороге. Трение становится жидким, и даже небольшие неровности дороги, создающие боковые силы, приводят к «заносу» автомобиля.

Резюмируя вышесказанное можно заключить, что возникновение трения обусловлено, прежде всего, шероховатостью поверхностей, создающей сопротивление перемещению, и наличием сцепления у прижатых друг к другу тел. Изучение всех особенностей явления трения представляет собою довольно сложную физико-механическую проблему, рассмотрение которой выходит за рамки курса теоретической механики.

В инженерных расчетах обычно исходят из ряда установленных опытным путем общих закономерностей, которые с достаточной для практики точностью отражают основные особенности явления трения. Эти закономерности, называемые законами трения скольжения при покое (законами Кулона), можно сформулировать следующим образом:

1. При стремлении сдвинуть одно тело по поверхности другого в плоскости соприкосновения тел возникает сила трения (или сила сцепления), величина которой может принимать любые значения от нуля до значения  $F_{\text{пр}}$ , называемого предельной силой трения.  $0 < \bar{F} < \bar{F}_{\text{пр}}$ .

Силой трения скольжения  $\bar{F}$  (или просто силой трения) называется составляющая силы реакции связи, которая лежит в касательной плоскости к поверхностям соприкасающихся тел (рис.2).

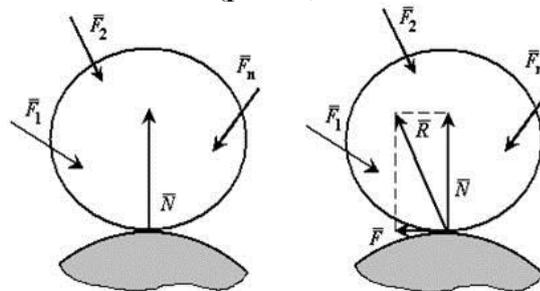


Рис.2

Сила трения направлена в сторону, противоположную той, куда действующие силы стремятся сдвинуть тело.

В теоретической механике предполагается, что между поверхностями соприкасающихся тел нет смазывающего вещества.

**Сухим трением** называется трение, когда между поверхностями соприкасающихся тел нет смазывающего вещества.

Будем рассматривать два случая: трения при покое или равновесии тела и трение скольжения при движении одного тела по поверхности другого с некоторой относительной скоростью.

При покое сила трения зависит только от активных сил. При выбранном направлении касательной в точке соприкосновения поверхностей тел сила трения вычисляется по формуле:  $\vec{F} = -\sum \vec{F}_{\tau i}$

Аналогично при выбранном направлении нормали нормальная реакция выражается через заданные силы:  $\vec{N} = -\sum \vec{F}_{ni}$ .

При движении одного тела по поверхности другого сила трения является постоянной величиной.

2. Величина предельной силы трения равна произведению статического коэффициента трения на нормальное давление или нормальную реакцию:  $F_{\text{пр}} = f_0 N$ .

Статический коэффициент трения  $f_0$  — число отвлеченное  $0 < f_0 < 1$ ; он определяется опытным путем и зависит от материала соприкасающихся тел и состояния поверхностей (характер обработки, температура, влажность, смазка и т. п.). Считается, что коэффициент трения не зависит от скорости движения.

3. Предельная сила трения скольжения при прочих равных условиях не зависит от площади соприкосновения трущихся поверхностей. Из этого закона следует, что для того чтобы сдвинуть, например, кирпич, надо приложить одну и ту же, силу, независимо, от того, какой гранью он положен на поверхность, широкой или узкой. Объединяя вместе первый и второй законы, получаем, что при равновесии сила трения покоя (сила сцепления)  $F \leq F_{\text{пр}}$  или  $F \leq f_0 N$ .

### Реакции шероховатых связей. Угол трения.

До сих пор при решении задач статики мы пренебрегали трением и считали поверхности связей гладкими, а их реакции направленными по нормальям к этим поверхностям. Реакция реальной (шероховатой) связи будет слагаться из двух составляющих: из нормальной реакции  $\vec{N}$  и перпендикулярной к ней силы трения  $\vec{F}$ . Следовательно, полная реакция  $\vec{R}$  будет отклонена от нормали к поверхности на некоторый угол. При изменении силы трения от нуля до  $F_{\text{пр}}$  сила  $R$  будет меняться от  $N$  до  $R_{\text{пр}}$ , а ее угол с нормалью будет расти от нуля до некоторого предельного значения  $\varphi_0$  (рис. 3).

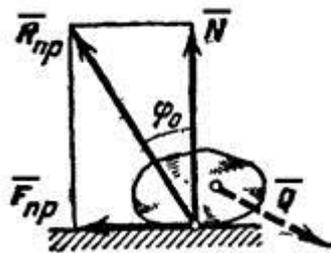


Рис.3

Наибольший угол  $\varphi_0$ , который полная реакция шероховатой связи образует с нормалью к поверхности, называется углом трения. Из рис.3 видно, что  $\text{tg } \varphi_0 = F_{\text{пр}}/N$ . Так как  $F_{\text{пр}} = f_0 N$ , отсюда находим следующую связь между углом трения и коэффициентом трения:  $\text{tg } \varphi_0 = f_0$

При равновесии полная реакция  $R$ , в зависимости от сдвигающих сил, может проходить где угодно внутри угла трения. Когда равновесие становится предельным, реакция будет отклонена от нормали на угол  $\varphi_0$ .

Конусом трения называют конус, описанный предельной силой реакции шероховатой связи  $\bar{R}_{\text{тр}}$  вокруг направления нормальной реакции.

Если к телу, лежащему на шероховатой поверхности, приложить силу  $P$ , образующую угол  $\alpha$  с нормалью (рис. 4), то тело сдвинется только тогда, когда сдвигающее усилие  $P \sin \alpha$  будет больше  $F_{\text{тр}} = f_0 P \cos \alpha$  (считаем  $N = P \cos \alpha$ , пренебрегая весом тела). Неравенство  $P \sin \alpha > f_0 P \cos \alpha$ , в котором  $f_0 = \text{tg} \varphi_0$ , выполняется только при  $\text{tg} \alpha > \text{tg} \varphi_0$ , т.е. при  $\alpha > \varphi_0$ . Следовательно, никакой силой, образующей с нормалью угол  $\alpha$ , меньший угла трения  $\varphi_0$ , тело вдоль данной поверхности сдвинуть нельзя. Этим объясняются известные явления заклинивания или самоторможения тел.

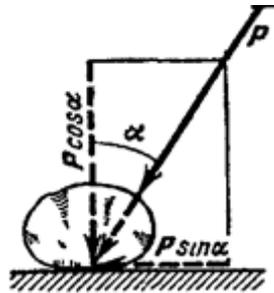


Рис.4

Для равновесия твёрдого тела на шероховатой поверхности необходимо и достаточно, чтобы линия действия равнодействующей активных сил, действующих на твёрдое тело, проходила внутри конуса трения или по его образующей через его вершину.

Тело нельзя вывести из равновесия любой по модулю активной силой, если её линия действия проходит внутри конуса трения.

#### **Равновесие при наличии трения.**

Изучение равновесия тел с учетом трения сводится обычно к рассмотрению предельного положения равновесия, когда сила трения достигает своего наибольшего значения  $F_{\text{тр}}$ . При аналитическом решении задач реакцию шероховатой связи в этом случае изображают двумя составляющими  $N$  и  $F_{\text{тр}}$ , где  $F_{\text{тр}} = f_0 N$ . Затем составляют обычные условия равновесия статики, подставляют в них вместо  $F_{\text{тр}}$  величину  $f_0 N$  и, решая полученные уравнения, определяют искомые величины.

#### **Трение качения и верчения.**

Возьмем деревянный цилиндр и положим его на стол так, чтобы он касался стола по образующей. В центры оснований цилиндра вставим концы проволочной вилки и прикрепим к ней снабженный очень чувствительный динамометр. Если тянуть за динамометр, то цилиндр покатится по столу. По показаниям динамометра увидим, что нужна весьма небольшая сила тяги, чтобы сдвинуть с места цилиндр и катить его равномерно дальше, гораздо меньшая, чем при скольжении того же цилиндра, если бы он не вращался и скользил бы

по столу. При той же силе давления на стол сила трения качения много меньше силы трения скольжения. Например, при качении стальных колёс по стальным рельсам трение качения примерно в 100 раз меньше, чем трение скольжения. Поэтому в машинах стремятся заменить трение скольжения трением качения, применяя так называемые шариковые или роликовые подшипники.

Происхождение трения качения можно наглядно представить себе так. Когда шар или цилиндр катится по поверхности другого тела, он немного вдавливается в поверхность этого тела, а сам немного сжимается (рис.15). Таким образом, катящееся тело всё время как бы вкатывается на горку.

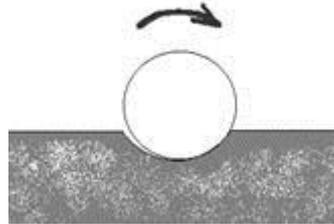


Рис.5

Вместе с тем происходит отрыв участков одной поверхности от другой, а силы сцепления, действующие между этими поверхностями, препятствуют этому. Оба эти явления и вызывают силы трения качения. Чем твёрже поверхности, тем меньше вдавливание и тем меньше трение качения.

Трением качения называется сопротивление, возникающее при качении одного тела по поверхности другого.

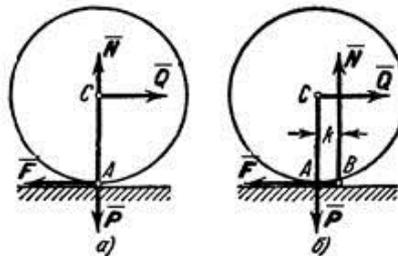


Рис.6

Рассмотрим круглый цилиндрический каток радиуса  $R$  и веса  $\bar{P}$ , лежащий на горизонтальной шероховатой плоскости. Приложим к оси катка силу  $\bar{Q}$  (рис. 6,а), меньшую  $F_{\text{пр}}$ . Тогда в точке  $A$  возникает сила трения  $\bar{F}$ , численно равная  $Q$ , которая будет препятствовать скольжению цилиндра по плоскости. Если считать нормальную реакцию  $\bar{N}$  тоже приложенной в точке  $A$ , то она уравнивает силу  $\bar{P}$ , а силы  $\bar{Q}$  и  $\bar{F}$  образуют пару, вызывающую качение цилиндра. При такой схеме качение должно начаться, под действием любой, сколь угодно малой силы  $\bar{Q}$ . Истинная картина, как показывает опыт, выглядит иначе. Объясняется это тем, что фактически, вследствие деформаций тел, касание их происходит вдоль некоторой площадки  $AB$  (рис. 6,б). При действии силы  $\bar{Q}$  давлений у края  $A$  убывает, а у края  $B$  возрастает. В результате реакция  $\bar{N}$  оказывается смещенной в сторону действия силы  $\bar{Q}$ . С увеличением  $\bar{Q}$  это смеще-

ние растёт до некоторой предельной величины  $k$ . Таким образом, в предельном положении на каток будут действовать пара  $(Q_{\text{пр}}, \bar{F})$  с моментом  $Q_{\text{пр}}R$  и уравновешивающая ее пара  $(\bar{N}, \bar{P})$  с моментом  $Nk$ . Из равенства моментов находим  $Q_{\text{пр}}R = Nk$  или  $Q_{\text{пр}} = \frac{kN}{R}$ . Пока  $Q < Q_{\text{пр}}$ , каток находится в покое; при  $Q > Q_{\text{пр}}$  начинается качение. Входящая в формулу линейная величина  $k$  называется коэффициентом трения качения. Измеряют величину  $k$  в сантиметрах. Значение коэффициента  $k$  зависит от материала тел и определяется опытным путем.

Коэффициент трения качения при качении в первом приближении можно считать не зависящим от угловой скорости качения катка и его скорости скольжения по плоскости (для вагонного колеса по рельсу  $k=0,5$  мм).

Рассмотрим движение ведомого колеса.  $\bar{L} = 0$ , а  $\bar{Q} \neq 0$ .

Качение колеса начнется, когда выполнится условие  $QR > M$  или  $Q > M_{\text{max}}/R = kN/R$

Скольжение колеса начнется, когда выполнится условие  $Q > F_{\text{max}} = fN$ .

Обычно отношение  $k/R < f_0$  и качение начинается раньше скольжения.

Если  $k/R > f_0$ , то колесо будет скользить по поверхности, без качения. Отношение  $k/R$  для большинства материалов значительно меньше статического коэффициента трения  $f_0$ . Этим объясняется то, что в технике, когда это возможно, стремятся заменить скольжение качением (колеса, катки, шариковые подшипники и т. п.).

### **Соппротивление среды.**

Если твёрдое тело находится внутри жидкости или газа, то вся его поверхность всё время соприкасается с частицами жидкости или газа. При движении тела на него со стороны жидкости или газа действуют силы, направленные навстречу движению. Эти силы называют сопротивлением среды. Как силы трения, сопротивление среды всегда направленно против движения. Сопротивление среды можно рассматривать как один из видов трения.

Особенностью сил трения в жидкости или газе является отсутствие трения покоя. Твёрдое тело, лежащее на другом твёрдом теле, может быть сдвинуто с места, только если к нему приложена достаточно большая сила, превосходящая наибольшую силу трения покоя. При меньшей силе твёрдое тело с места не сдвинется, сколько бы времени эта сила ни действовала. Картина получается иной, если тело находится в жидкости. В этом случае, чтобы сдвинуть с места тело, достаточно сколь угодно малых сил: хотя и очень медленно, но всё же тело начнёт двигаться. Однако по мере увеличения скорости сопротивление среды сильно увеличивается, так что, сколько бы времени сила не действовала, она не сможет разогнать тело до большой скорости.

Важной характеристикой жидких и газообразных сред является вязкость. Вязкость — свойство текучих тел (жидкостей и газов) сопротивляться перемещению одной их части относительно другой под действием внешних сил. Количественно вязкость определяется величиной касательной силы, которая должна быть приложена к единице площади сдвигаемого слоя, чтобы поддерживать в этом слое ламинарное течение с постоянной скоростью относительно сдвига, равной единице.

Вязкость газов и жидкостей, согласно молекулярной кинетической теории, вызвана передачей импульса от молекул более быстро движущегося слоя к молекулам более медленного слоя, которая происходит при перемешивании молекул соседних слоёв вследствие теплового движения.

Силы внутреннего трения гораздо меньше сил трения скольжения. Поэтому для уменьшения трения между движущимися частями машин и механизмов используется смазка – слой вязкой жидкости, заполняющий пространство между трущимися поверхностями и оттесняющий их друг от друга. Это приводит к существенному уменьшению нагрева и износа деталей. Вместе с тем следует избегать попадания жидкости между фрикционными муфтами, ремнём и шкивом в ременной передаче, ведущими колесами локомотива и рельсом и т.п., ибо во всех этих случаях именно сила трения служит для передачи движения.

С увеличением температуры вязкость газов возрастает, а жидкостей (за некоторым исключением) резко падает. Это связано с различиями в характере движения молекул в жидкости и газе. При понижении температуры вязкость некоторых жидкостей настолько возрастает, что они теряют характерную для них способность течь, превращаясь в аморфные твёрдые тела.

### **Сопrotивление воздуха.**

При движении твёрдого тела в воздухе на тело действует сила сопротивления воздуха, направленная противоположно движению тела. Такая же сила возникает, если на неподвижное тело набегаёт пучок воздуха; она направлена, конечно, по движению потока.

Сила сопротивления вызывается, во-первых, трением воздуха о поверхность тела и, во-вторых, изменением движения потока, вызванным телом. В воздушном потоке, изменённом присутствием тела, давление на передней стороне тела растёт, а на задней – понижается по сравнению с давлением в невозмущённом потоке. Таким образом, создаётся разность давлений, тормозящая движущееся тело или увлекающая тело, погружённое в поток. Движение воздуха позади тела принимает беспорядочный вихревой характер.

Сила сопротивления зависит от скорости потока, от размеров и формы тела.

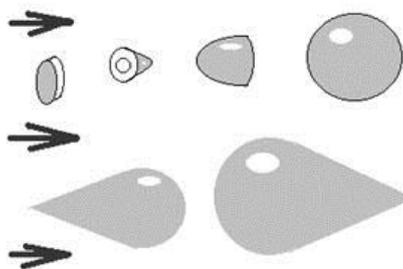


Рис.7

Для всех тел, изображенных на рис.7, сопротивление движению одинаково, несмотря на весьма разные размеры тел.

«Обтекаемое» тело почти не нарушает правильности потока; поэтому давление на заднюю часть тела лишь немного понижено по сравнению с передней частью и сопротивление не велико.

Различные обтекатели, устанавливаемые на выдающихся частях самолёта, как раз имеют своим назначением устранять завихрения потока выступающими частями конструкции. Вообще же конструкторы стремятся оставлять на поверхности возможно меньшее количество выдающихся частей и неровностей, могущих создавать завихрения.

Влияние сопротивления воздуха сильно сказывается и для наземных средств передвижения: с увеличением скорости автомобилей на преодоление сопротивления воздуха затрачивается всё большая часть мощности мотора. Поэтому современным автомобилям также придают по возможности обтекаемую форму.

Для уменьшения трения при сверхзвуковой скорости нужно заострить переднюю часть движущегося тела, в то время как при меньших скоростях наибольшее значение имеет «обтекаемость».

### **Сопротивление воды.**

При движении тел в воде также возникают силы сопротивления, направленные противоположно движению тела. Если тело движется под водой, то сопротивление теми же обстоятельствами, что и при движении в воздухе: трение воды о поверхность тела и изменением потока, создающим дополнительное сопротивление. Быстро плавающие рыбы и китообразные имеют «обтекаемую» форму тела, уменьшающую сопротивление воды при их движении. Обтекаемую форму придают и подводным лодкам. Вследствие большой плотности воды по сравнению с плотностью воздуха, сопротивление движению данного тела в воде много больше сопротивления в воздухе при той же скорости движения.

Для обычных судов, идущих на поверхности воды, есть ещё дополнительное волновое сопротивление: от идущего судна на поверхности воды расходятся волны, на создание которых непроизводительно затрачивается часть работы судовой машины.

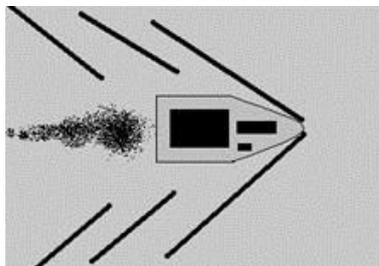


Рис.8

Для уменьшения волнового сопротивления, которое для быстроходных судов может составлять  $3/4$  полного сопротивления, корпусу судна придают специальную форму. Нос судна в подводной части иногда делают «бульбообразной» формы (рис.8); при этом образование волн на поверхности воды уменьшается, а значит, уменьшается и сопротивление.