



Валерий Михайлович Курносов

Учитель физики «Физтех-лицея» им. П.Л. Капицы,
Заслуженный учитель РФ

Некоторые особенности трения

При изучении раздела «Динамика» в курсе физики как 7, так и 9 класса изучают силу трения. Данная сила является весьма сложной уже по многообразию природы появления. Одно только перечисление видов сил трения нас в этом убеждает: сила трения покоя, сила трения скольжения (сухое трение), сила трения качения, сила вязкого трения (при малых и больших скоростях). И в каждом своем проявлении она имеет множество характерных особенностей. В этой статье мы попытаемся немного подробнее остановиться на силе трения покоя, качения, и на силе, возникающей при движении автомобильного колеса по дорожному покрытию.

В начале вспомним, что существует достаточно общая формулировка, определяющая эту силу.

Сила трения – сила механического сопротивления, возникающая в плоскости соприкосновения двух прижатых друг к другу тел при их относительном перемещении.

Принципиально важно, какие поверхности вступают во взаимодействие при относительном перемещении. Пары взаимодействующих поверхностей можно поделить на три основные группы: гибкая поверхность взаимодействует с гибкой

поверхностью, твердая поверхность с гибкой, и твердая с твердой.

В первом случае большую роль будет играть явление переноса, и связанное с ним вязкое трение. Рассматривать его в этой статье мы не будем. Рассмотрим два других случая.

Наиболее часто применяют пары трения (рабочий термин в триботехнике), состоящие из двух твердых поверхностей.

В процессе формообразования деталей на их поверхности появляется шероховатость – ряд чередующихся выступов и впадин сравнительно малых размеров. При наложении одной поверхности на другую площадь фактического контакта поверхностей будет состоять из множества дискретных малых, расположенных на различных высотах пятнах касания в местах наиболее полного сближения поверхностей. Между площадками касания тел имеются соединенные между собой или закрытые микрополости, заполненные воздухом или другой газовой средой, смазочным материалом, продуктами изнашивания и т.п.

Площадь контакта зависит от микро- и макрогеометрии поверхностей, волнистости, физико-механических свойств поверхностного слоя, а также от нагрузки.

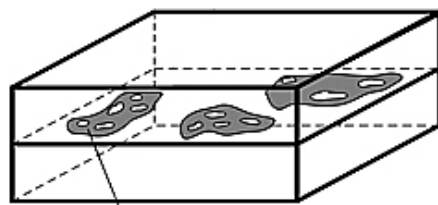
Площадь фактического контакта составляет от 0,0001 до 0,1 номинальной площади касания. Даже с учетом высоких нагрузок площадь фактического контакта не превышает 40 % номинальной площади.

Фактическая площадь контакта возрастает при увеличении нагрузки, и она несколько увеличивается при длительном действии нагрузки.

При увеличении упругих характеристик, предела текучести материала и высоты неровностей поверхностей фактическая площадь контакта уменьшается.

Вследствие волнистости контактирующих поверхностей фактические пятна контакта будут возникать преимущественно на вершинах волн. Сумма элементарных площадок, как отмечалось, и дает площадь фактического контакта (Рис. 1).

От размера пятен контакта зависят размер частиц износа, время взаимодействия на единичном контакте и температура, развиваемая при трении. Среднее расстояние между пятнами фактического контакта влияет на частоту взаимодействия пятен



Одна из элементарных площадок

Рис. 1

при трении. Фактическое давление на контакте очень велико. Это часто приводит к пластической деформации выступов, вследствие чего характеристики контакта во времени могут изменяться при неизменности прилагаемой внешней нагрузки. Эти свойства контакта особенно сильно проявляются с повышением температуры в зоне контакта. В результате частых взаимодействий пятен контактов на этих участках возникают так называемые наклепанные слои. Это участки поверхности с измененной кристаллической структурой металла. Глубину наклепанного слоя можно исследовать по изменению микротвердости, которая в поверхностных слоях всегда выше (Рис. 2).

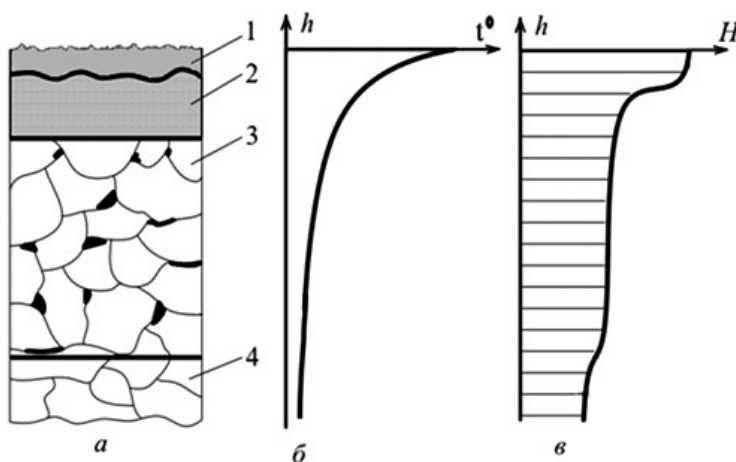


Рис. 2

На рисунке а) показана структура поверхностного слоя. На поверхности по глубине расположения можно выделить четыре характерных слоя:

1) граничный слой повышенной твердости, насыщенный веществами, продиффундировавшими в него;

2) наклепанный слой, сильно раздробленный металл с искаженной решеткой кристаллов;

3) деформированный (измененный) слой; состоит из сильно деформированных под действием давления монокристаллов, имеет увеличенное число дислокаций и вакансий (дефектов);

4) металл с исходной структурой.

На рисунке б) показана зависимость температуры t° в поверхностном слое от глубины h , и в) твердости H металла от глубины h при трении скольжения.

При относительном движении шероховатых поверхностей взаимодействие в отдельных зонах фактического контакта приводит к разрушению поверхностного слоя. Тогда оба вещества пары тел соединяются настолько близко, что вступают в действие огромные по величине силы молекулярного взаимодействия. Это приводит к ряду явлений: 1) скорость скольжения в зонах фактического контакта может изменяться скачком, 2) происходит вырывание участка поверхности одного из тел, 3) оторвавшиеся фрагменты начинают самостоятельное движение между поверхностями, 4) высвобождению энергии поверхностного слоя (энергии поверхностного натяжения).

Скачкообразное изменение относительной скорости порождает «дергание» при торможении, «визг» тормозов, вибрацию, нарушение

плавности работы медленно движущихся деталей, и др.

Если тело, которое скользит, прижать сильнее к телу, по которому происходит скольжение, то, вследствие деформации тел, площадь пятна соприкосновения (и сила трения) увеличится пропорционально прижимающей силе.

$$F_{тр} \sim F_{приж}$$

$F_{тр} = \mu N$ – сила трения скольжения (формула Кулона-Амонтона), где μ – коэффициент трения скольжения, N – сила реакции опоры, равная прижимающей силе (по 3-ему закону Ньютона).

Величина коэффициента трения скольжения различна для разных комбинаций трущихся веществ даже при одинаковом качестве их обработки (силы притяжения и упругие свойства зависят от рода вещества и множества иных факторов).

Если рассматривать мгновенные значения силы трения при прямолинейном скольжении, а она непрерывно меняется, то можем сделать вывод, что коэффициент трения меняется от точки к точке, и в таблицах приводятся некоторые средние значения для данных поверхностей и данных условий скольжения.

Коэффициент трения скольжения	
Пары трения	Коэффициент трения
Тазобедренный сустав	0,008
Подшипник скольжения	0,02 – 0,08
Сталь-бронза	0,15
Сталь – абразивный круг	0,9 – 1

Силой трения покоя F_n называют сдвиговое усилие, прикладываемое к контактирующим телам и не вызывающее их взаимного скольжения.

На приведенном ниже рисунке приводится график зависимости величины сдвигового усилия F от величины сдвига L (Рис. 3).

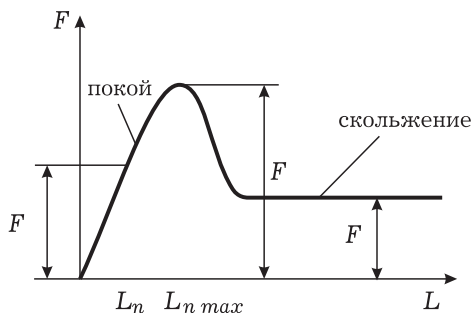


Рис. 3

Как только к телам прикладывается сдвиговое усилие, так появляется деформация выступов шероховатости в зоне контакта, т.е. появляется так называемое предварительное

смещение. Оно носит в основном упругий характер и исчезает при снятии сдвигового усилия.

Однако по мере роста сдвигающего усилия предварительное смещение приобретает пластический характер и становится частично необратимым. На рисунке предельному значению предварительного смещения L_{nmax} соответствует предельное значение силы трения покоя F_{cm} , которое называют статической силой трения F_{cm} . Так же различают и коэффициенты трения покоя (статический) и скольжения (кинетический) (см. табличные данные ниже).

Надо понимать, что если мы оставим уже скользящее тело и захотим вновь привести его в движение, то сдвиговое усилие снова будет расти подобно приведенному графику, но угол наклона и максимальное значение усилия (а, значит, и предварительного сдвига) скорее всего окажутся немного иными, т.к. зона контакта в новом месте будет другой

Коэффициент трения покоя и скольжения

Пары трения	Коэффициент трения покоя	Коэффициент трения скольжения
Бронза по бронзе	0,99	0,20
Дерево по дереву (в среднем)	0,65	0,33
Железо по бронзе	0,19	0,18
Железо по чугуну	0,19	0,18
Железо по железу	0,15	0,14
Сталь по стали	0,15-0,25	0,09 ($V=3$ м/с)
	0,15-0,25	0,03 ($V=27$ м/с)
Чугун по стали	0,33	0,13 ($V=20$ м/с)
Олово по свинцу	2,25	
Алюминий по алюминию	0,94	
Медь по чугуну	0,27	
Канат пеньковый по дереву	0,40	
Канат пеньковый по железу	0,25	

(другие выступы и шероховатости как по высоте, так и по форме).

Сила трения качения возникает при движении (качении) твердого цилиндра (шара) по твердой упругой поверхности. Упругая опора продавливается и перед катящимся телом возникнет вал (наплыв). Цилиндру (шару) приходится все время выкатываться из углубления, продавленного им самим. При этом цилиндр (шар) будет оказывать действие на опору не точно под центром тяжести, а в точке, смещенной в сторону движения. Сила реакции опоры перпендикулярна опоре, а значит проходит через центр цилиндра (шара) (Рис. 4).

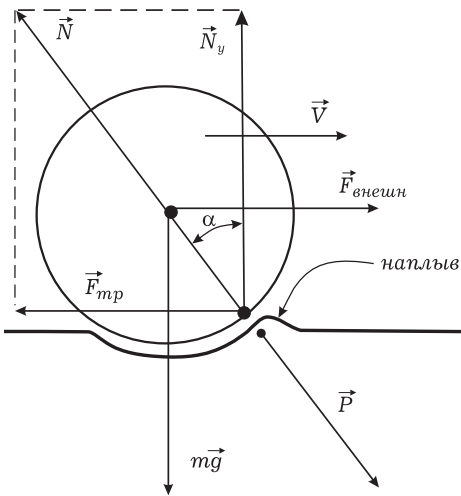


Рис. 4

Полную силу реакции опоры можно разложить на компоненты: вертикальный и горизонтальный. Вертикальный компонент полной силы называют силой нормального (перпендикулярного) давления, горизонтальный компонент и есть сила трения качения. Заметим, что внешняя сила приложена к оси колеса, и

относительно этой оси момент этой силы равен нулю. (Крутящий момент, создаваемый двигателем, берем равным нулю. Неактивное колесо). Значит, должен быть равен нулю и момент результирующей силы реакции опоры. Следовательно, эта сила проходит через центр колеса.

Из рисунка видно, что эта сила тем больше, чем больше угол наклона α и чем больше полная сила реакции (а значит и сила нормального давления). Вертикальный компонент полной силы реакции всегда компенсирует силу тяжести (прижимающую силу). При равномерном движении катящегося тела сила трения качения всегда компенсирована внешней силой, вызывающей движение.

Аналитически можно записать следующие закономерности:

1) $F_{\text{качения}} \sim N_y$ – чем тяжелее катящееся тело (или больше прижимающая сила), тем больше сила N , тем больше сила трения качения.

2) $F_{\text{качения}} \sim \alpha$ или $F_{\text{качения}} \sim \frac{1}{R}$ – чем больше угол наклона полной силы реакции опоры к вертикали (или меньше радиус R цилиндра (шара)), тем больше сила трения качения.

3) $F_{\text{качения}} \sim k$ – сила трения качения зависит от рода веществ (упругих свойств), из которых изготовлены цилиндр и опора, а также от качества их обработки. Коэффициент k называют коэффициентом трения качения.

Обобщая закономерности, получим:

$$F_{\text{качения}} = k \frac{N_y}{R}$$

– сила трения качения (ее впервые так же записал Кулон).

Характерными примерами проявления силы трения качения можно назвать качение железнодорожного колеса вагона по рельсу, стального шара в подшипнике качения.

Из приведенного рассмотрения можно понять, что сталь, применяемая для изготовления рельсов, должна быть очень твердой. Да и для изготовления колес вагонов тоже. (Для колес тепловоза сталь должна быть мягче, чтобы обеспечить большую силу трения.) Причем различают рельсы для портовых кранов, равнинных участков дорог, высокоскоростных участков. Видимо, подобная классификация нужна и для колес вагонов и локомотивов. Любопытно, что основным показателем качества рельсовой стали является износостойкость.

Коэффициент трения качения	
Пары трения	Коэффициент трения
Стальной шарик – сталь	0,001
Чугун – чугун	0,005
Стальное колесо – рельс	0,05

Теперь рассмотрим движение автомобильного колеса по асфальтированной дороге.

Двигается упругое достаточно легко деформируемое тело по твердой поверхности асфальта. При таком движении наплыв не возникает, следовательно, сила трения качения, в привычном понимании, не появится.

Если колесо находится в статическом состоянии, то деформация покрышки будет симметричной относительно вертикальной оси, проходящей через ось колеса (Рис. 5). Сила упругости распределена по пятну контакта. Если это сила реакции опоры (Рис. 5а) или реакции опоры и веса (Рис. 5б). Суммарную силу упругости, действующую на колесо, называют силой реакции опоры и изображают одним вектором. Суммарную силу упругости, действующую на опору, которая тоже распределена по пятну контакта, называют весом и изображают так же одним вектором. (Рис. 5 в) Деформация покрышки зависит от давления в камере покрышки и может быть весьма заметной. (Рис. 5 г)

Если колесо приходит во вращательное движение, а потом и в посту-

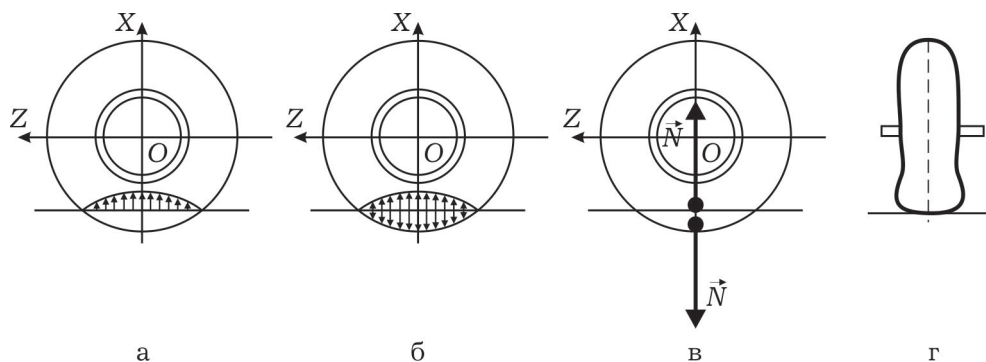


Рис. 5

пательное движение, то появляется ряд новых деформаций.

Вращательное движение колесу сообщает ось колеса, приводимая во вращение двигателем автомобиля с помощью трансмиссий. В первые мгновения вращательного движения оси колеса само колесо неподвижно, т.к. между поверхностью резинового протектора и связанными между собой частицами асфальта существует сцепление. Ось вместе с диском колеса поворачивается, деформируя среднюю (вдоль радиуса) часть покрышки. Если вращение происходит против часовой стрелки, то поворот внутренней и средней части резиновой покрышки приводит к сжатию части резины, расположенной слева от вертикальной оси, проходящей через центр колеса. Одновременно справа от этой оси будет появляться растяжение резины (или уменьшение сжатия, в зависимости от величины прилагаемого крутящего момента сил) (Рис.6а). Симметрия в распределении силы реакции опоры и силы давления (веса) нарушится. Точки приложения суммарных сил сместятся влево (Рис.6б). Т.к. ни вращения, ни поступательно-

го движения колеса не появилось, то появится сила трения покоя, направленная влево. Именно эту силу принято называть силой тяги автомобиля (Рис. 6б).

Деформированная резина обладает энергией. И если в данный момент заблокировать ось вращения колеса, не давая ему повернуться, то автомобиль все равно сдвинется. Пятно касания останется на месте, но сила упругости совершит работу над автомобилем, смещая его центр масс вдоль силы трения покоя. Возникнут затухающие колебания, и энергия силы упругости превратится в тепло. Деформация резины станет симметричной.

Величина деформаций резины зависит от мощности двигателя (крутящего момента), жесткости резины, размера колеса и массы автомобиля. Глазу эти деформации наблюдать трудно из-за скоротечности процессов. Однако при экстремальных заездах их можно увидеть и зафиксировать (Рис. 6в).

При торможении автомобиля с блокировкой колес возникнет сила трения скольжения резины по асфальту. При таком движении де-

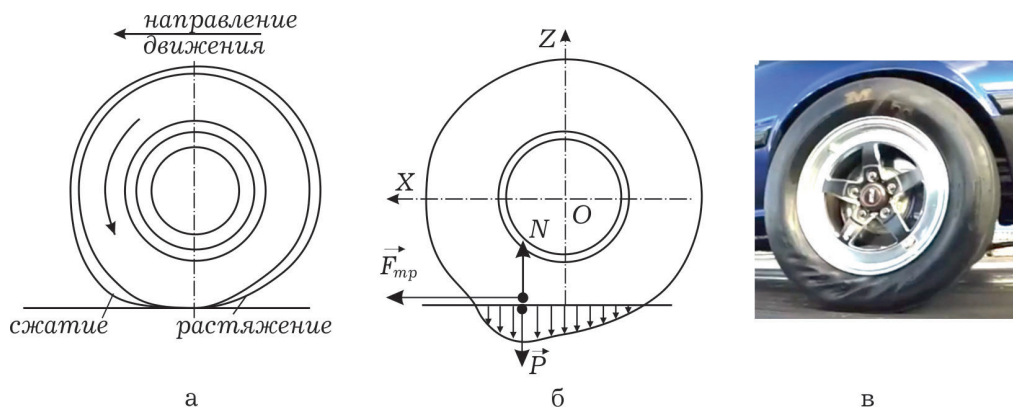


Рис. 6

формация резины будет совершенно другой. Теперь слева от вертикальной оси наблюдается растяжение, а справа от оси – сжатие резины (Рис. 7). Если блокировки колес не происходит, то деформации имеют такой же характер, но только менее выраженный, и сила трения еще не достигла значения силы трения скольжения (хотя может быть и большей величины (см. Рис. 3)).

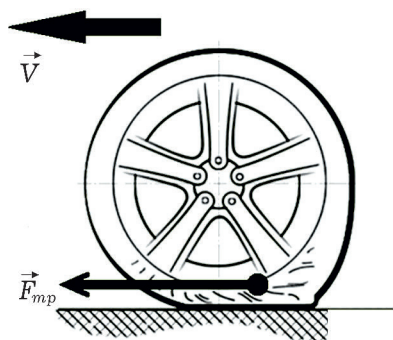


Рис. 7

При попадании колеса на неровность в виде камня или выступа на дороге резина в месте контакта деформируется, порождая силу реакции опоры, не проходящую через ось колеса (Рис. 8).

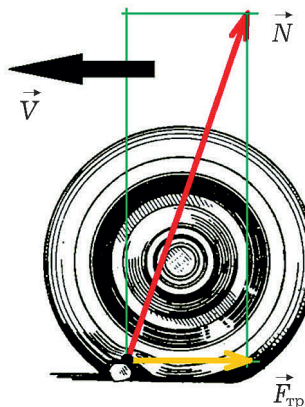


Рис. 8

Горизонтальная составляющая этой силы и называется силой сопротивления качению. Как видим, природа появления силы сопротивления качению хоть и похожая, но совсем другая, нежели силы трения качения. Поэтому и называется иначе. Подобных неровностей на асфальтированной дороге великое множество.

Кроме этого, при качении колеса при активном крутящем моменте \vec{M} суммарная сила реакции \vec{R} опоры не проходит через ось колеса, а ее точка приложения смещена в сторону движения колеса (Рис. 6б). Таким образом, момент силы реакции \vec{R} противоположен крутящему моменту \vec{M} , приводящему автомобиль в движение, что тоже можно назвать проявлением силы сопротивления качению.

Приходим к выводу что при прямолинейном движении разные колеса автомобиля испытывают действия разных сил. Те колеса, к которым

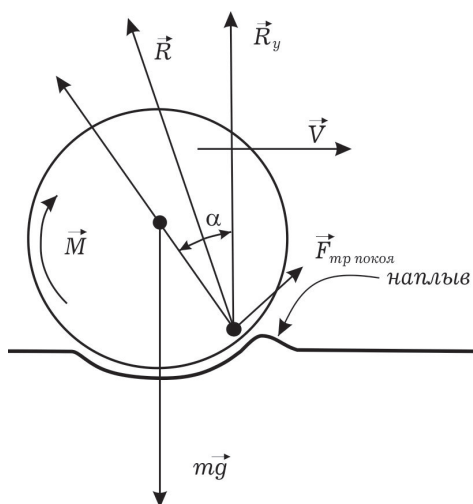


Рис. 9

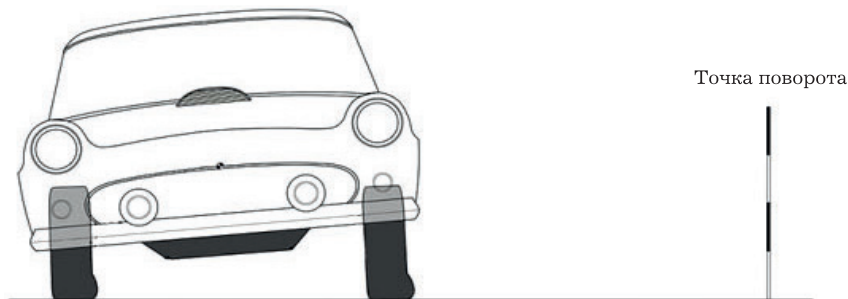


Рис. 9а

подводится вращающий момент от двигателя, при активном движении порождают силу трения покоя. Эта сила трения покоя не позволяет колесу проскальзывать. А неоднородная сила упругости в покрышке колеса (в основном в нижней ее части) непрерывно совершает работу над автомобилем (над центральной частью колеса с диском и осью), приводя его в поступательное движение. Одновременно, все колеса испытывают действие силы сопротивления качению. Последняя, в свою очередь, может оказаться нелинейно зависящей от массы автомобиля и других параметров.

Теперь рассмотрим движение колеса на повороте.

Самое сложное здесь – понять, что автомобиль и колесо движутся в разных направлениях.

На рисунке (Рис. 10) показано в проекции «сверху», что скорость автомобиля V_A вертикальна (вдоль оси y), а скорость качения колеса V_K под углом вправо (вдоль оси x).

Водитель поворачивает руль управления вправо, и колеса поворачивают туда же. Это означает, что колеса начинают катиться вправо. Но инертность автомобиля велика, и он не может мгновенно «откликаться» на команды колеса. За небольшой

интервал времени колесо прокатится под углом вправо, при этом передняя часть пятна контакта с асфальтом (закрашено штриховкой) останется на месте, в то время как сам автомобиль сместится вдоль OY . В результате в нижней, контактирующей с дорогой, части покрышки возникнут дополнительные деформации.

Пятно контакта сместится относительно центра колеса. Точнее центр колеса сместится относительно асфальта (пятна контакта) в сторону от центра закругления дороги (Рис. 11).

Однако это еще не все! Внутри пятна контакта в резине возникают деформации растяжения, причем разные в разных местах пятна. Рассмотрим этот процесс немного под-

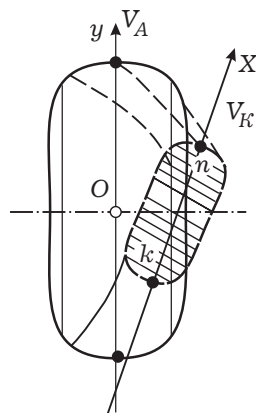


Рис. 10

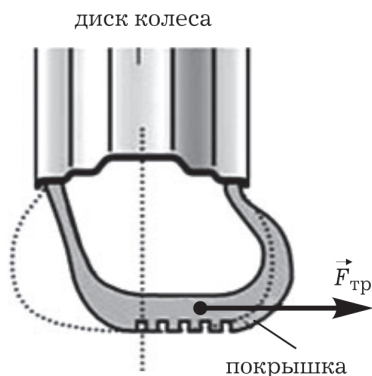


Рис. 11

робнее: (Рис. 12) пусть в какой-то момент времени некоторая часть покрышки начинает взаимодействовать с асфальтом.

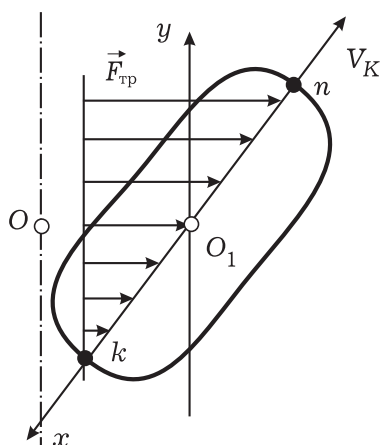


Рис. 12

Значит, она находится в начале пятна контакта – точка n на рисунке, и максимально смещена от продольной оси колеса. Далее колесо некоторое время катится в направлении качения колеса V_K , и выбранная нами точка переходит в точку k на рисунке. Колесо на этом рисунке находится над пятном контакта, т.е. над плоскостью рисунка, и катится против

оси OX . Относительно центра колеса точки пятна движутся вдоль оси OX , оставаясь неподвижными относительно асфальта. В этой точке k величина деформации, направленной перпендикулярно скорости автомобиля (оси OY), станет меньше. Возникают силы упругости. Силы трения равны силам упругости. Равенство этих сил обеспечивает отсутствие скольжения колеса по асфальту.

Можно заметить, что точка приложения суммарной силы трения (или силы упругости) не совпадает с вертикальной проекцией центра колеса. Она смещена в сторону движения колеса. Это означает, что если водитель отпустит руль и не будет прилагать усилий для его удержания в повернутом положении, то момент суммарной силы упругости повернет его в состояние движения, когда скорости автомобиля и колеса совпадут по направлению.

Мы уже отмечали, что в каждом своем проявлении сила трения имеет множество характерных особенностей. Некоторые из них мы рассмотрели, но, конечно же, не все. Можно двигаться дальше, но изучая уже специальную литературу.

Подводя итоги, можем отметить, что при скольжении случайным образом могут соединяться освобожденные от оксидных пленок и загрязнений участки поверхностей пар трения, порождая очень большие силы трения (силы молекулярного взаимодействия), приводящие к заметным внешним проявлениям. Отметим, что при качении автомобильного колеса возникает сила сопротивления качению колеса. Что сила тяги автомобиля – это сила трения покоя или скольжения (если есть пробуксовка активного колеса), которая, в свою очередь, является силой упругости.