

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Раздел 1. Теоретическая механика

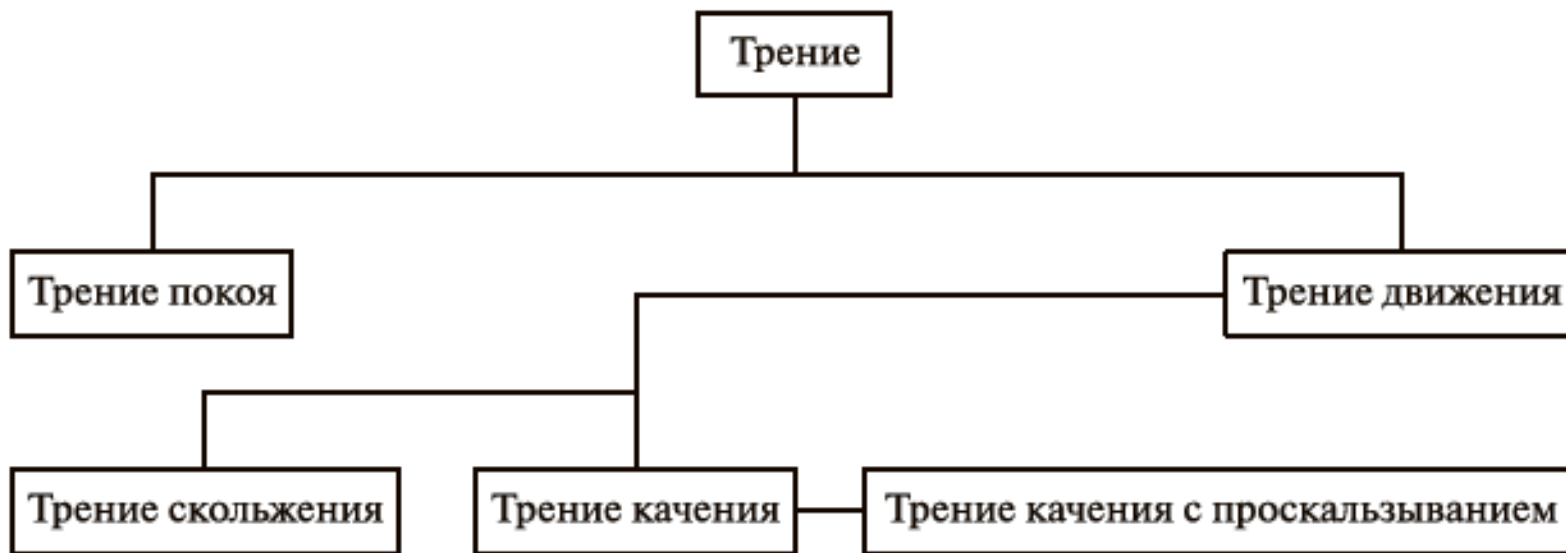
ТЕМА: «ТРЕНИЕ»

Преподаватель: Серeda П.О.

ГБПОУ РО Ростовский-на-Дону
автотранспортный колледж «РАТК»

Трение – явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательной к ним.

Классификации трения по наличию и характеру движения



Трением покоя называется трение двух тел при микросмещениях без макросмещения (т. е. при малом относительном перемещении тел в пределах перехода от покоя к относительному движению).

Трением движения называется трение двух тел, находящихся в относительном движении.

Трение скольжения

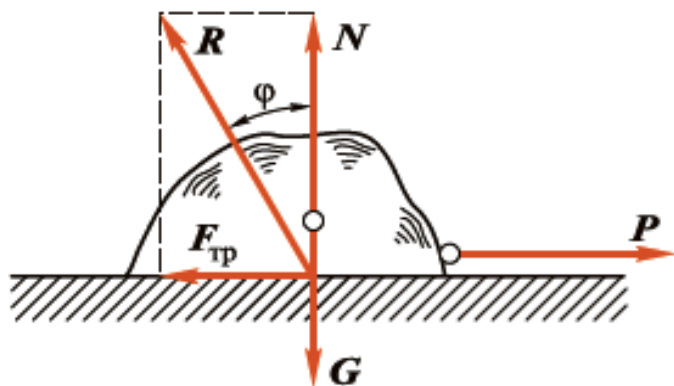
Трением скольжения называется трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению и (или) направлению.

Трение характеризуется силой трения.

Сила трения есть сила сопротивления относительно перемещению двух тел.

Если постепенно увеличивать сдвигающую силу P , то до определенного ее значения тело будет оставаться в покое; при дальнейшем увеличении силы P тело придет в движение.

Максимальное значение сила трения покоя имеет в момент начала относительного движения.



Сила трения всегда направлена в сторону, противоположную направлению относительного движения тела.

В XVIII в. французские ученые Г. Амонтон, а затем Ш. Кулон провели серьезные исследования в области трения и на основе их сформулировали три основных закона *трения скольжения*, обычно называемых **законами Кулона**:

1. **Сила трения не зависит от величины площади трущихся поверхностей.**

2. **Максимальная сила трения прямо пропорциональна нормальной составляющей внешних сил, действующих на поверхности тела.**

3. **Сила трения зависит от материала тел, состояния трущихся поверхностей, наличия и рода смазки.**

Первый закон можно подтвердить следующими соображениями. Если площадь трущихся поверхностей увеличится, то увеличится и количество сцепляющихся неровностей, но уменьшится давление (на единицу площади) и сопротивление относительно перемещению останется прежним.

Второй закон говорит о том, что если увеличится нормальная составляющая внешних сил, действующих на поверхности тела (иначе говоря, увеличится сила нормального давления или реакции), то во столько же раз возрастет максимальная сила трения.

Согласно третьему закону в зависимости от наличия между сопрягаемыми поверхностями слоя смазки трение подразделяется на два вида: *трение без смазочного материала* и **трение в условиях смазки**.

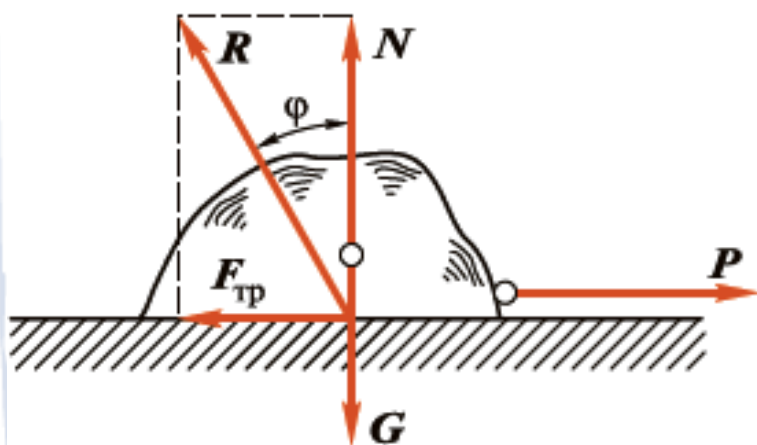
Отношение силы трения $F_{\text{тр}}$ к нормальной составляющей N внешних сил, действующих на поверхности тела, называется коэффициентом трения скольжения, и обозначается f (при наибольшей силе трения покоя это отношение называется *коэффициентом сцепления*).

$$f = \frac{F_{\text{тр}}}{N} \quad \text{или} \quad F_{\text{тр}} = fN.$$

В результате второй закон трения скольжения можно сформулировать так:
Сила трения равна коэффициенту трения скольжения, умноженному на силу нормального давления или реакции.

Очевидно, что коэффициент трения скольжения – величина безразмерная. Нормальная реакция N опорной поверхности и сила трения $F_{\text{тр}}$ дают равнодействующую R , которая называется *полной реакцией опорной поверхности*:

$$R = N + F_{\text{тр}}.$$



Полная реакция R составляет с нормалью к опорной поверхности какой-то угол. Максимальное значение этого угла (что будет в момент начала движения) называется *углом трения*.

$$F_{\text{тр}} = N \operatorname{tg} \varphi. \quad f = \operatorname{tg} \varphi,$$

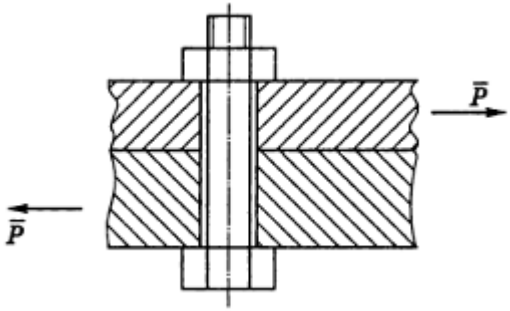
т. е. коэффициент трения скольжения равен тангенсу угла трения.

Коэффициент трения скольжения определяют опытным путем; значения его для различных условий приведены в справочниках.

Ориентировочные значения коэффициентов f трения скольжения (при покое):

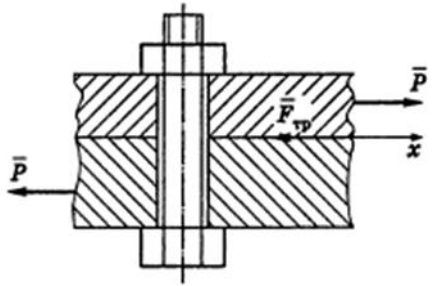
Металл по металлу без смазки	0,15 ... 0,30
То же, со смазкой	0,10 ... 0,18
Дерево по дереву без смазки.	0,40 ... 0,60
Кожа по чугуну без смазки	0,30 ... 0,50
То же, со смазкой	0,15
Сталь по льду	0,02

Определить необходимую силу затяжки болта, скрепляющего две стальные полосы, разрывааемые силой $P=2\text{кН}$. Болт поставлен с зазором и не должен работать на срез. Коэффициент трения между листами равен 0,2.



Решение

Так как болт поставлен с зазором и не должен работать на срез, то две силы величиной P должны уравниваться силой трения в стыке полос и на опорной поверхности болта и гайки.



Составим уравнение равновесия полосы:

$$- F_{тр} + P = 0,$$

где $F_{тр} = S \cdot f$ – максимальное значение силы трения, S – сила затяжки болта, f – коэффициент трения.

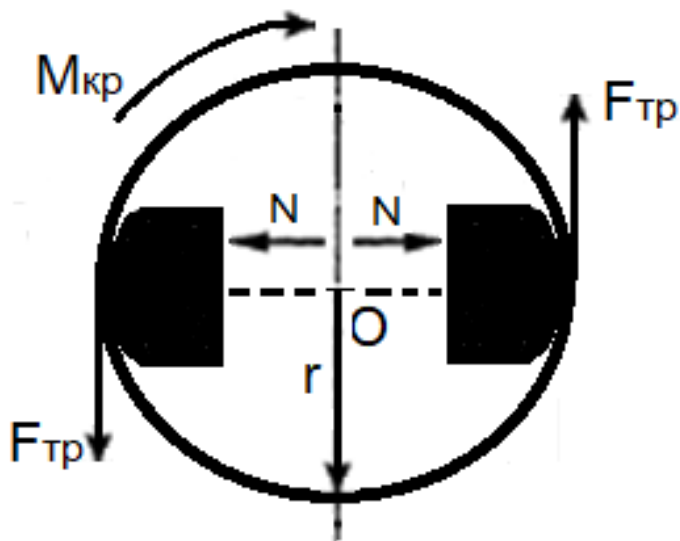
Тогда:

$$S = \frac{P}{f} = \frac{2}{0,2} = 10\text{кН}.$$

Вал вращается с моментом $M_{кр}=100 \text{ Н}\cdot\text{м}$. На валу заключен тормозной барабан, радиус r которого равен 25 см. Найти, с какой силой N надо прижимать к барабану тормозные колодки, чтобы колесо оставалось в покое, если коэффициент трения покоя f между колесом и колодками равен 0,25.

Решение

Изобразим силы, действующие на барабан:



Составим уравнение равновесия системы для моментов относительно точки O :

$$-F_{тр} \cdot 2r + M_{кр} = 0.$$

Тогда:

$$F_{тр} = \frac{M_{кр}}{2r} = \frac{100 \text{ Н} \cdot \text{м}}{2 \cdot 0,25 \text{ м}} = 200 \text{ Н}$$

Поскольку $F_{тр} = f \cdot N$,

то

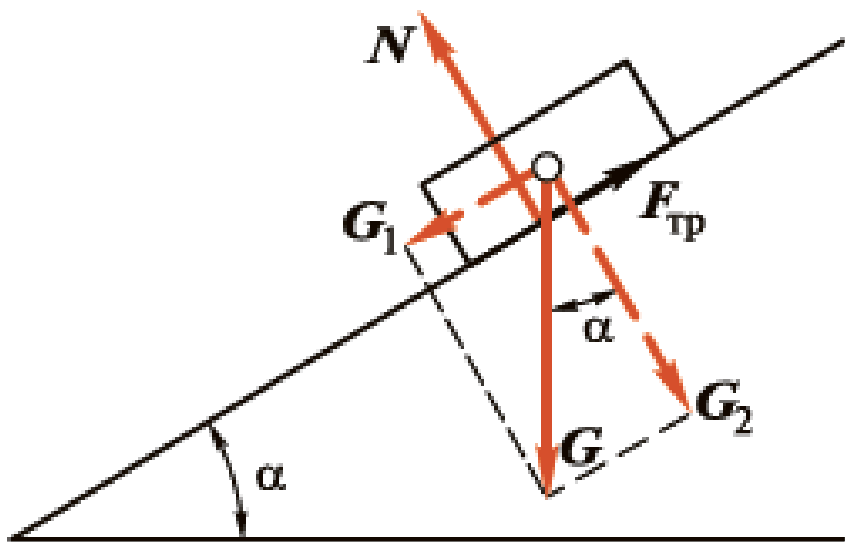
$$N = \frac{F_{тр}}{f} = \frac{200 \text{ Н}}{0,25} = 800 \text{ Н}.$$

Трение на наклонной плоскости

Рассмотрим тело, лежащее на шероховатой наклонной плоскости, составляющей угол α с горизонтальной плоскостью.

Разложим силу \mathbf{G} на составляющие \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 , параллельную и перпендикулярную наклонной плоскости. Модули этих составляющих определим по следующим формулам:

$$G_1 = G \sin \alpha; \quad G_2 = G \cos \alpha.$$



Составляющая \mathbf{G}_1 стремится сдвинуть тело вдоль наклонной плоскости. Полностью или частично эта составляющая уравновешивается силой трения; согласно второму закону трения скольжения, ее максимальное значение равно:

$$F_{\text{тр}} = fN = fG \cos \alpha,$$

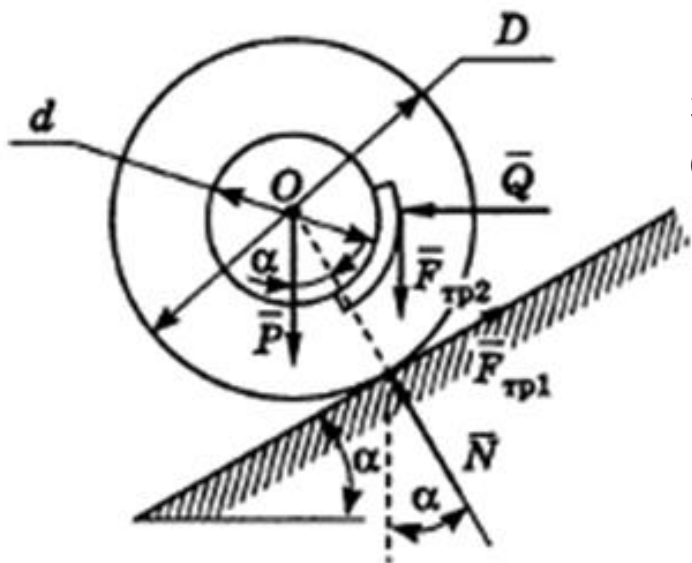
где f — коэффициент трения скольжения тела по наклонной плоскости.

Для того чтобы тело, лежащее на наклонной плоскости, находилось в равновесии, движущая сила \mathbf{G}_1 должна быть по модулю равна силе трения $\mathbf{F}_{\text{тр}}$.

Для того чтобы тело, лежащее на наклонной плоскости, заведомо не скользило вниз под действием собственной силы тяжести, должно быть соблюдено условие: $\mathbf{G}_1 < \mathbf{F}_{\text{тр}}$. Т.е. угол наклона плоскости должен быть меньше угла трения:

$$\alpha < \varphi.$$

Автомобиль удерживается с помощью тормозов на наклонной части дороги. При перемещении тормозной педали на 2 см тормозные колодки дисковых тормозов перемещаются на 0,2 мм. Диаметр рабочей части диска $d=220$ мм, нагруженный диаметр колеса $D=520$ мм, вес автомобиля 14 кН. Определить, с какой силой N водитель должен нажимать на педаль тормоза, если угол наклона дороги $\alpha=20^\circ$. Трением качения пренебречь. Коэффициент трения скольжения между тормозными колодками и диском $f=0,5$. Тормоза всех колес работают одинаково.



Решение

Запишем уравнение равновесия для моментов всех сил относительно центра O:

$$F_{mp1} \frac{D}{2} - F_{mp2} \frac{d}{2} = 0.$$

$$F_{mp1} = \frac{1}{4} P \sin \alpha, \quad F_{mp2} = \frac{1}{4} fN.$$

Следовательно:
$$N = \frac{DP \sin \alpha}{fd}.$$

Усилие, исходящее от водителя увеличивается в соотношении $n = \frac{2\text{см}}{0,2\text{мм}} = \frac{20\text{мм}}{0,2\text{мм}} = 100$

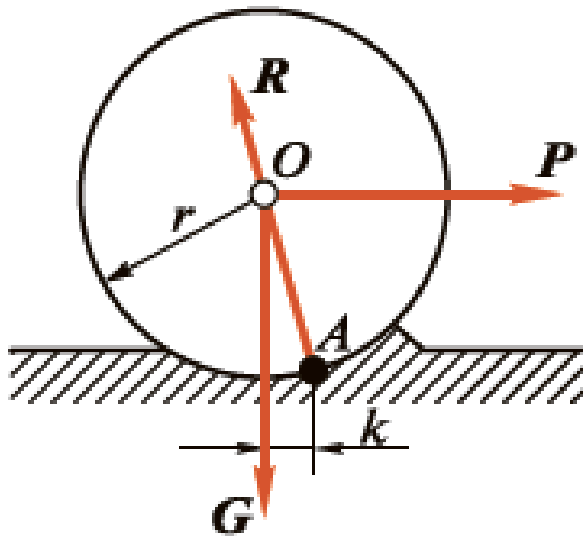
То сила нажима на педаль тормоза равна:
$$N = \frac{DP \sin \alpha}{nfd} = \frac{520 \cdot 14 \cdot \sin 20^\circ}{100 \cdot 0,5 \cdot 220} = 0,226 \text{ кН}.$$

Трение качения

Трением качения называется трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел в точках касания одинаковы по значению и направлению.

Если движение двух соприкасающихся тел происходит при одновременном качении и скольжении, то в этом случае возникает *трение качения с проскальзыванием*.

Если сила P не действует, то сила G будет уравновешиваться реакцией R опорной плоскости и цилиндр будет находиться в покое (реакция R будет вертикальна).



При действии силы P произойдет перераспределение давлений на опорную поверхность и полная реакция R пройдет через какую-то точку A и через точку O (согласно теореме о равновесии трех непараллельных сил).

При каком-то критическом значении силы P цилиндр придет в движение и будет равномерно перекатываться по опорной плоскости, а точка A займет крайнее правое положение.

Обозначим k максимальное значение плеча силы G относительно точки A . Тогда в случае равномерного перекатывания цилиндра (т. е. равновесия)

$$\sum M_A = 0$$

или

$$-Pr + Gk = 0,$$

причем плечо силы P вследствие незначительности деформаций тел считаем равным радиусу r цилиндра (сила P — горизонтальная). Из последнего равенства определим силу, необходимую для равномерного качения цилиндра:

$$P = \frac{kG}{r}.$$

Максимальное значение плеча k называется коэффициентом трения качения; он имеет размерность длины и выражается в сантиметрах или миллиметрах.

Из полученной формулы видно, что усилие, необходимое для перекатывания катка, прямо пропорционально его весу и обратно пропорционально радиусу катка.

Коэффициент трения качения определяется опытным путем, его значения для различных условий приводятся в справочниках.

Ориентировочные значения коэффициентов трения качения (в см):

Мягкая сталь по мягкой стали	0,005
Закаленная сталь по закаленной стали.	0,001
Чугун по чугуну	0,005
Дерево по стали	0,03...0,04
Дерево по дереву	0,05...0,08
Резиновая шина по шоссе.	0,24

Коэффициент трения качения практически не зависит от скорости движения тела.

Составим три уравнения равновесия катка:

$$\begin{aligned}\sum X &= 0; & P - F_{\text{тр}} &= 0; \\ \sum Y &= 0; & N - G &= 0; \\ \sum M_A &= 0; & -Pr + Gk &= 0.\end{aligned}$$

Из этих уравнений получаем

$$P = F_{\text{тр}}; \quad N = G; \quad Pr = Gk.$$

Введем обозначения $Pr = M$, $Gk = M_{\text{тр}}$, где M — момент качения, $M_{\text{тр}}$ — момент трения.

Возможны следующие частные случаи движения катка:

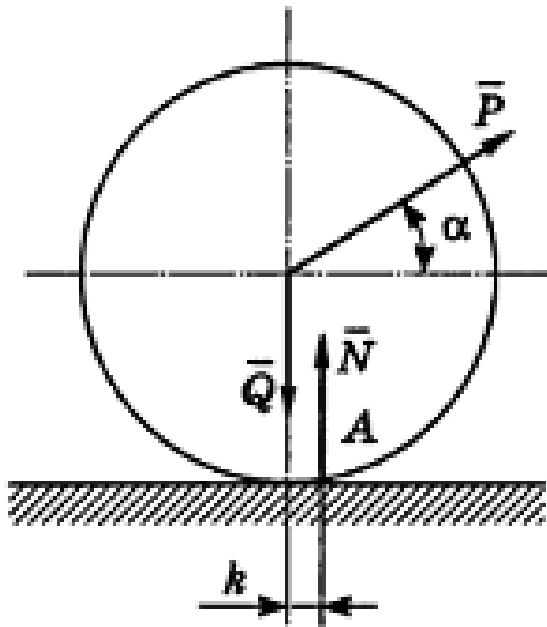
- а) $M \geq M_{\text{тр}}$, но $P < F_{\text{тр}}$ — только качение;
- б) $M < M_{\text{тр}}$, но $P > F_{\text{тр}}$ — только скольжение;
- в) $M > M_{\text{тр}}$, но $P > F_{\text{тр}}$ — качение с проскальзыванием;
- г) $M < M_{\text{тр}}$, но $P < F_{\text{тр}}$ — состояние покоя.

Трение качения в большинстве случаев меньше трения скольжения, поэтому вместо подшипников скольжения широко применяют шариковые и роликовые подшипники качения.

Определить силу P , необходимую для равномерного качения цилиндрического катка диаметра 60см и веса 300Н по горизонтальной плоскости, если коэффициент трения качения $k=0,5$ см, а угол, составляемый силой P с горизонтальной плоскостью, равен $\alpha=30^\circ$.

Решение

Изобразим на рисунке, действующие на каток силы.



Составим уравнение моментов относительно точки А.

$$(Q - P \cdot \sin \alpha)k - P \cdot r \cdot \cos \alpha = 0.$$

Отсюда найдем:

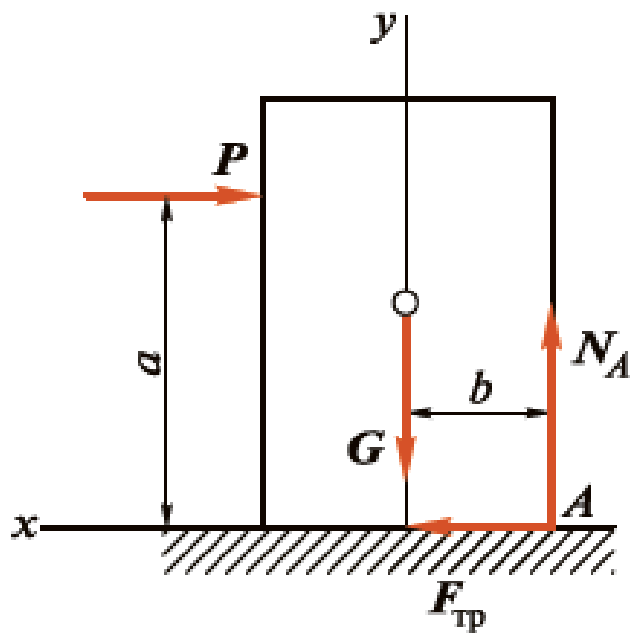
$$P = \frac{Qk}{r \cos \alpha + k \sin \alpha} = \frac{300 \cdot 0,5}{30 \cdot \cos 30^\circ + 0,5 \cdot \sin 30^\circ} = 5,72 \text{ Н}.$$

Устойчивость к опрокидыванию

Рассмотрим твердое тело весом G , опирающееся на плоскость и способное опрокидываться вокруг какого-то ребра под действием горизонтальной силы P . Допустим, что силы P и G лежат в одной плоскости, пересекающейся с ребром в точке A . В момент начала опрокидывания на тело будут действовать также нормальная реакция N_A и сила трения $F_{\text{тр}}$, приложенные в точке A , причем в случае равновесия системы всех четырех сил можно записать два уравнения равновесия:

$$\sum Y = 0; \quad N_A - G = 0, \text{ откуда } N_A = G;$$

$$\sum X = 0; \quad F_{\text{тр}} - P = 0, \text{ откуда } P = F_{\text{тр}}.$$



Произведение Gb равно моменту силы G относительно точки A и называется **моментом устойчивости**. Момент силы P относительно той же точки, равный произведению Pa , называется **опрокидывающим моментом**.

Условие устойчивости против опрокидывания можно записать в виде неравенства:

$$M_{\text{уст}} > M_{\text{опр}}$$

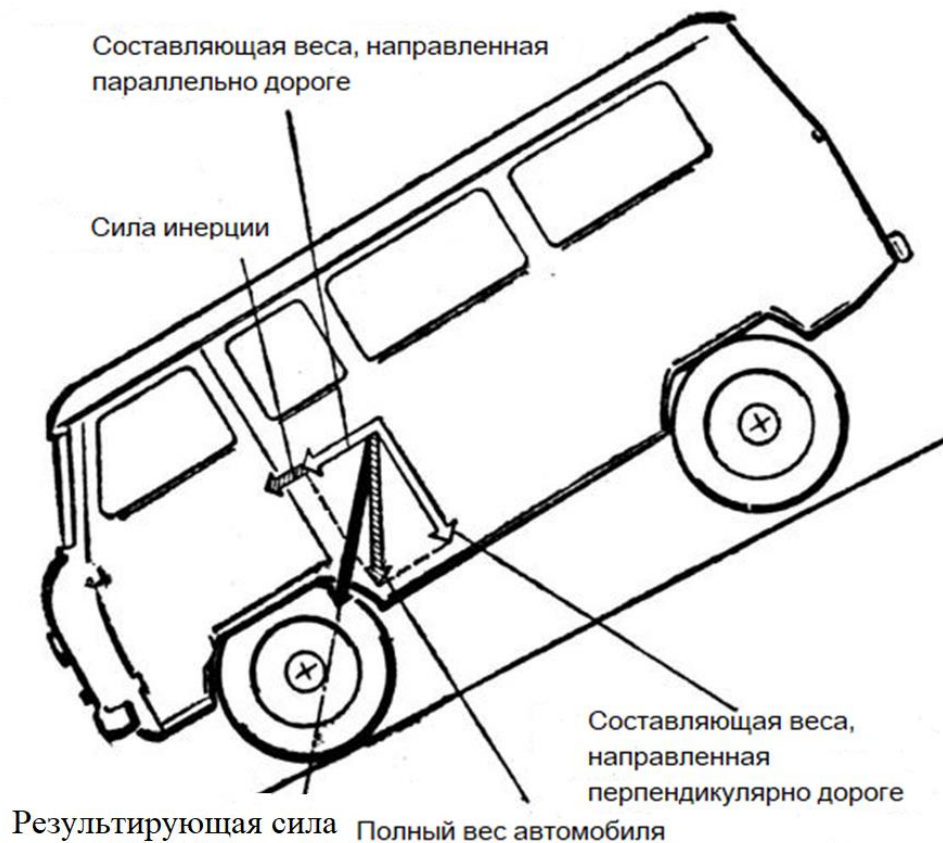
Отношение момента устойчивости к опрокидывающему моменту называется **коэффициентом устойчивости**:

$$\frac{M_{\text{уст}}}{M_{\text{опр}}} = k_{\text{уст}}.$$

Опрокидывание автомобиля может произойти как в продольной, так и в поперечной плоскости.

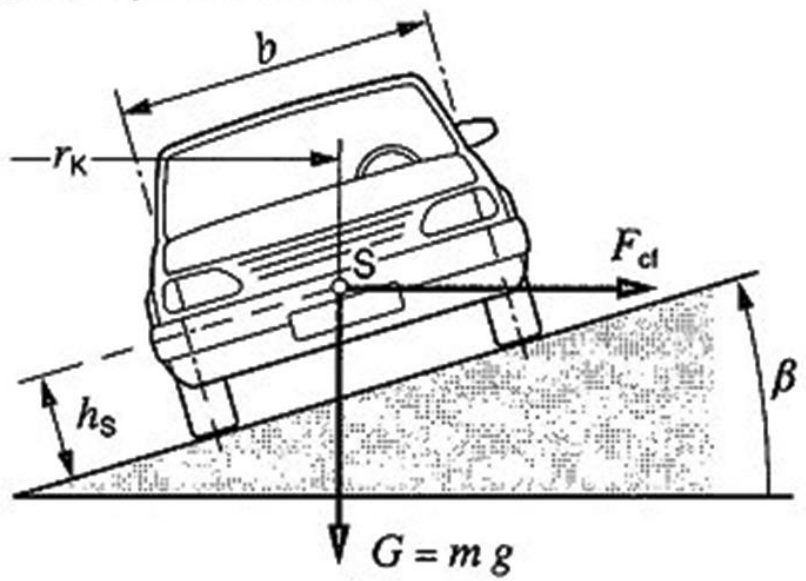
Опрокидывание в продольной плоскости.

При определенных условиях возможно переворачивание автомобиля вперед при резком торможении на крутом спуске, если автомобиль имеет короткую базу и высоко расположенный центр тяжести. В данном примере возникшая сила инерции складываясь с горизонтальной составляющей силы веса, дает результирующую силу, которая выходит за пределы опорной площади передней оси автомобиля.



Опрокидывание автомобиля в поперечной плоскости, т.е. вбок, может произойти под действием центробежной силы на повороте, при резком повороте рулевого колеса на большой скорости, сильном боковом наклоне и вследствие неправильного закрепления груза в кузове.

*b – ширина колеи, h_s – высота центра тяжести;
 r_k – радиус поворота/кривой; β – угол наклона;
 G – вес автомобиля S – центр тяжести;
 F_{cl} – центробежная сила*



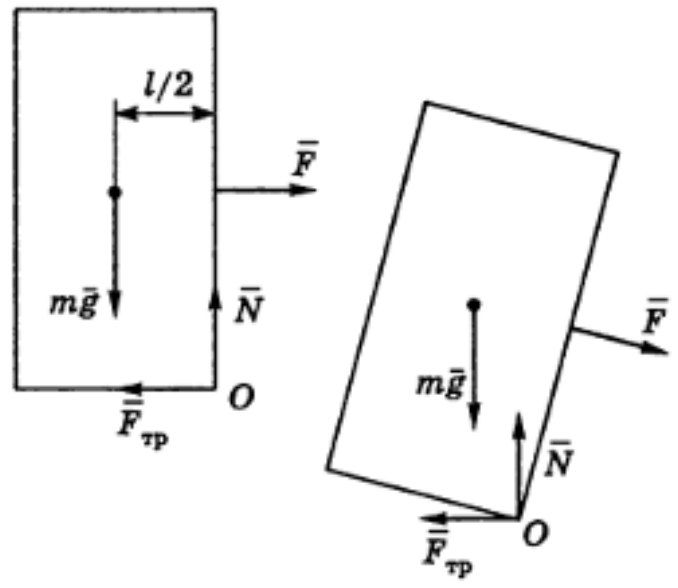
Чем выше расположен груз, тем больше высота расположения центра тяжести, следовательно, тем вероятнее опрокидывание грузового автомобиля.

Чем шире колея автомобиля, тем более устойчив автомобиль как при движении на повороте, так и при движении по дороге, имеющей поперечный уклон.

Неправильная укладка груза в кузове может значительно изменить положение центра тяжести, сместив его как вбок, так и вверх. Характерным примером может служить цистерна, не заполненная целиком жидким грузом. Под влиянием центробежной силы жидкий груз смещается к одной стороне цистерны, центр тяжести смещается вверх и в сторону, а сила тяжести, удерживающая автомобиль от опрокидывания, действует уже не по оси автомобиля, а смещается в сторону перемещения центра тяжести.

Дверь автобуса отодвигается с трением в нижнем пазу. Коэффициент трения f не более 0,5. Определить наибольшую высоту h , на которой можно поместить ручку двери, чтобы дверь при отодвигании не опрокидывалась. Ширина двери $l=0,8$ м; центр тяжести двери находится на ее вертикальной оси симметрии.

Решение



Составим уравнения равновесия двери (в проекциях на горизонтальную ось и для моментов относительно точки O).

$$F - F_{тр} = 0;$$
$$- Fh + mg \frac{l}{2} = 0.$$

Поскольку $F_{тр} = f \cdot mg$, то решив систему, получим:

$$h = \frac{l}{2f} = 0,8 \text{ м.}$$

Библиографический список:

1. Вереина Л.И. Основы технической механики: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Л.И. Вереина. – М.: Издательский центр «Академия», 2018. – с.22-25.

2. Серeda П.О. Техническая механика: электронное учебное пособие по теме «Трение». Ростов-на-Дону: ГБПОУ РО «РАТК», 2022. – 8,5 МБ.

3. Техническая механика : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Л.И. Вереина, М.М. Краснов. - М. : Издательский центр «Академия», 2018. – с. 23-26.

4. Техническая механика : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / А.А. Эрдеди, Н.А. Эрдеди. – М.: Издательский центр «Академия», 2019. – с. 45-56.

Домашнее задание:

1. Доработать конспект.
2. Повторить изученный материал с помощью электронного учебного пособия или другой рекомендованной литературы.
3. Дополнительное прохождение тестирования с целью повышения оценки (при необходимости).
4. Подготовиться к практическому занятию по изучаемой теме (раздел: «Задачи для самостоятельного решения» электронного учебного пособия).