

## 2 ОСНОВЫ РАСЧЕТОВ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ ПО ДОРОГАМ

- 2.1 Движение автомобиля по дороге
- 2.2 Сопротивление движению автомобиля
  - 2.2.1 Сопротивление движению на подъем
  - 2.2.2 Сопротивление трения
  - 2.2.3 Сопротивление воздуха
  - 2.2.4 Сопротивление инерционных сил автомобиля
- 2.3 Движение колеса и тяговое усилие
- 2.4 Уравнение движения автомобиля
- 2.5 Динамический фактор и динамическая характеристика
- 2.6 Сцепление шин с поверхностью дороги
- 2.7 Расход топлива в зависимости от дорожных условий и износ шин

### 2.1 Движение автомобиля по дороге

Требования к отдельным элементам дороги устанавливаются из условия движения по дороге одиночного автомобиля.

Фактический режим движения автомобиля по дороге определяется тремя факторами:

- эксплуатационными свойствами автомобиля;
- дорожными условиями;
- индивидуальными особенностями водителей.

Автомобиль движется в результате взаимодействия двух видов сил: движущих сил автомобиля и сил, оказывающих сопротивление его движению.

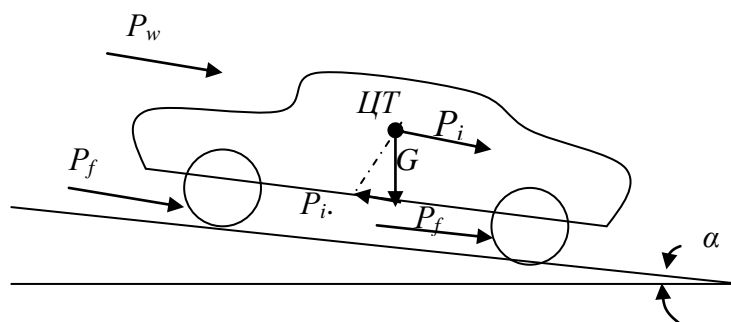
Основной движущей силой является сила тяги, приложенная к ведущим колесам. Она возникает в результате работы двигателя и взаимодействия ведущих колес с дорогой.

Сначала рассмотрим силы сопротивления, действующие на автомобиль.

### 2.2 Сопротивление движению автомобиля

Сила тяги расходуется на преодоление сил сопротивления движению. В общем случае при движении на автомобиль действуют следующие силы сопротивления:

- сопротивление движению на подъем  $P_i$ ;
- сила сопротивления движущемуся колесу  $P_f$ ;
- сопротивление воздуха  $P_w$ ;
- инерционные силы самого автомобиля  $P_j$ .



#### 2.2.1 Сопротивление движению на подъем

На автомобильной дороге часто встречаются уклоны – подъемы и спуски. Крутизну подъемов характеризуют уклоном  $i = h/L$ . Для перемещения автомобиля по участку подъема длиной  $L$  на высоту  $h$  должна быть выполнена работа на преодоление силы тяжести.

$$P_i = G \cdot \sin \alpha,$$

где  $G$  – вес автомобиля, кН.

Для малых углов  $\alpha$  менее  $10^\circ$  ( $\cos \alpha \approx 1$ ).

$$i = \frac{h}{L} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \approx \sin \alpha .$$

Тогда

$$P_i = G \cdot i . \quad (2.1)$$

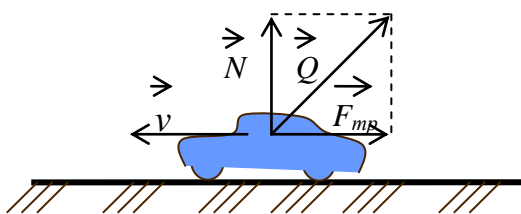
Таким образом, коэффициент сопротивления движению на подъем равен значению продольного уклона в тысячных долях. В случае спуска сила сопротивления движению на подъем  $P_i$  вызывает ускорение движения автомобиля. При  $i=0$ ,  $P_i=0$ .

### 2.2.2 Сопротивление трения

Различают два вида трения:

- трение скольжения;
- трение качения.

Сила трения скольжения  $\vec{P}_{тр ск}$  возникает при скольжении по дороге заторможенного колеса.



Она направлена вдоль поверхности соприкосновения колес с дорожным покрытием. Модуль силы

$$P_{тр ск} = f_{тр ск} \cdot N ,$$

где  $\vec{N}$  – нормальная составляющая силы реакции дороги,  $N$  – её модуль.

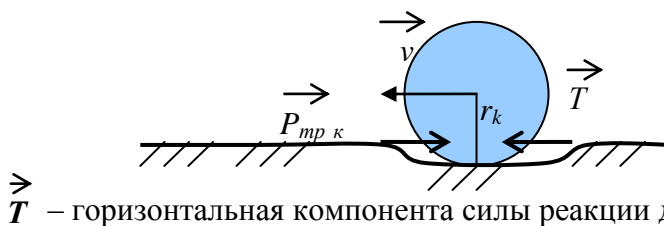
Коэффициент трения  $f_{тр ск}$  зависит от рода соприкасающихся поверхностей и степени их обработки. Он не зависит от площади соприкосновения и слабо зависит от скорости. (Этой зависимостью обычно пренебрегают). Трение скольжения всегда связано с превращением механической энергии во внутреннюю теплоту.

Сила трения качения  $P_{тр к}$  возникает при качении колеса по поверхности дороги. Она обратно пропорциональна радиусу катящегося колеса  $r_k$

$$P_{тр к} = \frac{f_{тр к}}{r_k} mg ,$$

где  $f_{тр к}$  – коэффициент трения качения,  $m$  – масса тела,  $g$  – ускорение свободного падения.

Трение качения возникает из-за деформации дорожной одежды перед катящимся колесом и деформации самих шин. На ровных цементно-бетонных и асфальтобетонных покрытиях основной фактор – это обжатие шин. На менее ровных покрытиях добавляются наезды колес на неровности покрытия. На грунтовых дорогах добавляются затраты энергии на образование колеи.



$\vec{T}$  – горизонтальная компонента силы реакции дороги.

Сделав, некоторые преобразования, учитывая распределение масс автомобиля на колёса, запишем формулу для силы трения качения

$$P_k = G \cdot f, \quad (2.2)$$

где  $G$  – вес автомобиля,  $f$  – коэффициент сопротивления.

Коэффициент сопротивления зависит от ровности покрытия, скорости автомобиля и эластичности шины. При скоростях движения ниже 50 км/ч его можно считать практически постоянным:

Цементно-бетонное и асфальтобетонное покрытие –  $f = 0,01 \div 0,02$ ;

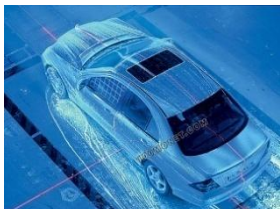
Снежные дороги –  $f = 0,1$ ;

Песок –  $f = 0,15 \div 0,3$ .

При скорости движения более 50 км/ч для дорог с ровной твердой поверхностью можно принимать коэффициент  $f$ , равным

$$f_v = f \left( 1 + \frac{v^2}{20000} \right).$$

### 2.2.3 Сопротивление воздуха



Сопротивление воздуха состоит:

- из лобового сопротивления;
- трения воздуха о боковые поверхности автомобиля;
- завихрения воздуха около колес и под кузовом.

Суммарная сила сопротивления воздуха движению автомобиля выражается формулой аэродинамики:

$$P_w = \frac{K_e \cdot F \cdot v}{13}, \quad (2.3)$$

где  $K_e$  – коэффициент сопротивления среды, зависящий от формы автомобиля и качества отделки поверхности,  $F$  – лобовая площадь автомобиля,  $v$  – скорость движения автомобиля.

Коэффициент сопротивления среды  $K_e$  получают опытным путем, продувая модель автомобиля в аэродинамической трубе.

Лобовая площадь определяется по зависимости:

$$F = 0,8 B \cdot H,$$

где  $B$  и  $H$  габаритные ширина и высота автомобиля.

При скорости до 40 км/ч доля силы сопротивления воздуха движению автомобиля в общем балансе сил сопротивления дви-

жению незначительна.

### 2.2.4 Сопротивление инерционных сил автомобиля

Сопротивление инерционных сил автомобиля возникает при изменении его скорости. Оно складывается из сил инерции поступательного движения и инерционных элементов вращающихся масс автомобиля (колес, маховиков, механизмов трансмиссии).

При массе автомобиля равной  $m = G/g$  и скорости  $v$  (м/с) инерционная сила поступательного движения:

$$P_{инер} = m \frac{dv}{dt} = \frac{G}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = G \cdot j,$$

где  $j$  - относительное ускорение:

$$j = \frac{1}{g} \cdot \frac{dv}{dt}.$$

Инерцию вращающихся частей автомобиля учитывают с помощью поправочного коэффициента  $\delta_{вр}$ . Поэтому выражение для инерционной силы автомобиля имеет вид:

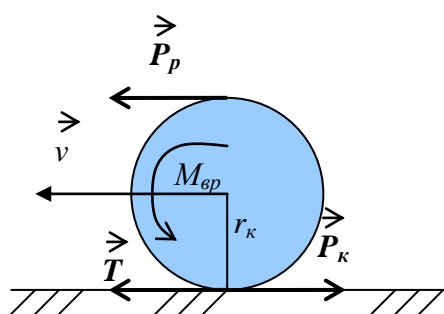
$$P_j = \delta_{вр} \cdot G_j. \quad (2.4)$$

Чем больше передаточное число коробки передач, тем выше значение коэффициента  $\delta_{вр}$  (1,03÷1,07).

### 2.3 Движение колеса и тяговое усилие

Сопротивления на пути движения автомобиля преодолеваются за счет мощности двигателя. Сила тяги, развиваемая двигателем, передается на ведущие колеса через трансмиссию.

Вращающий момент колеса  $M_{вр}$  вызывает появление пары сил  $\vec{P}_p$  и  $\vec{P}_k$ , равных по модулю и противоположных по направлению ( $\vec{P}_p = -\vec{P}_k$ ).



$\vec{P}_p$  – тяговое усилие, передаваемое через ведущий мост и рессоры на раму автомобиля.

$\vec{P}_k$  – окружная сила, приложенная к площадке контакта шины с покрытием. Она направлена в сторону, противоположную движению.

Горизонтальная сила реакции дороги  $\vec{T}$  направлена в противоположную сторону силе  $\vec{P}_k$ , т.е.  $\vec{T} \uparrow \downarrow \vec{P}_k$  и  $|\vec{T}| = |\vec{P}_k|$ . Сложим векторы  $\vec{P}_1 - \vec{P}_2 + \vec{T} = \vec{P}$ .

Таким образом, благодаря наличию горизонтальной реакции дороги возникает поступательное движение автомобиля.

Радиус качения соотносится с радиусом колеса зависимостью

$$r_k = \lambda r_o,$$

где  $\lambda$  – коэффициент деформации шины (0,95÷0,93),

$r_o$  – радиус колеса,

$r_k$  – радиус качения ведущих колес с учетом обжатия шины в зоне контакта с покрытием.

Тяговое усилие определяется по зависимости

$$P_p = \frac{M_{вр}}{r_k}.$$

Вращающий момент на ведущих колесах может быть выражен следующим образом:

$$M_{вр} = M_e \cdot i_k \cdot i_o \cdot \eta,$$

где  $M_e$  – эффективный крутящий момент двигателя;

$i_k, i_o$  – соответственно передаточное число коробки передач и главной передачи;

$\eta$  – механический К.П.Д. трансмиссии автомобиля.

Эффективный крутящий момент выражается зависимостью

$$M_e = 716,2 \frac{N_e}{n_e},$$

где  $N_e$  – мощность двигателя (л.с.);

$n_e$  – частота вращения коленчатого вала (об/мин);

716,2 – коэффициент перехода от [л.с.] к [Вт].

Тогда, подставляя данное выражение в зависимость для тягового усилия (5), получим выражение для тягового усилия:

$$P_p = 716,2 \frac{N_e \cdot i_k \cdot i_0}{n_e \cdot r_k} \cdot \eta . \quad (2.5)$$

Каждой частоте вращения коленчатого вала соответствует строго определенная скорость движения автомобиля:

$$v = \frac{2\pi \cdot r_k \cdot n_e}{60 \cdot i_k \cdot i_0} \quad [\text{м/с}] \quad \text{или} \quad v = 0,377 \cdot \frac{r_k \cdot n_e}{i_k \cdot i_0} \quad [\text{км/ч}].$$

## 2.4 Уравнение движения автомобиля

Уравнение движения автомобиля представляет собой условие равенства внешних и внутренних сил. Т.е. при движении автомобиля сумма всех внешних сил, действующих на автомобиль, должна уравниваться силами инерции. В проекции на плоскость (направление) движения данное условие может быть выражено зависимостью:

$$P_p = P_f \pm P_i + P_w \pm P_j ,$$

где  $P_f, P_i, P_w, P_j$  – силы сопротивления, определяемые по формулам (2.1) - (2.4),

$P_p$  – тяговое усилие, которое передается через ведущий мост и рессоры на раму автомобиля и вызывает его движение.

Знак «+» перед уклоном соответствует движению на подъем, знак «-» соответствует движению на спуск.

Соберем слева от знака равенства силы, не зависящие от дорожных условий, т.е. тяговое усилие и силу сопротивления воздуха:

$$P_p - P_w = P_f \pm P_i \pm P_j$$

и подставим выражения для сил сопротивления  $P_i, P_f, P_j$  из (2.1), (2.2), (2.4).

$$P_p - P_w = G \cdot f \pm G \cdot i \pm \delta_{ep} \cdot G \cdot j .$$

Разделим на  $G$ :

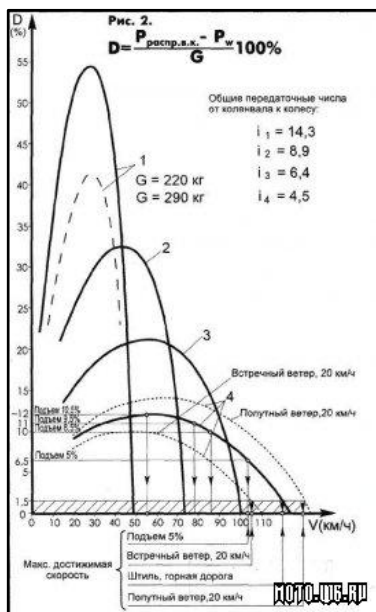
$$\frac{P_p - P_w}{G} = f \pm i \pm \delta_{ep} \cdot j .$$

Левую часть уравнения обозначим как  $D = \frac{P_p - P_w}{G}$ .

Данный параметр называется динамическим фактором. *Динамический фактор* – это разница между полной силой тяги на ведущих колесах и сопротивлением воздушной среды, отнесенная к единице веса автомобиля.

Тогда *уравнение движения автомобиля* примет окончательный вид:

$$D = f \pm i \pm \delta_{ep} \cdot j . \quad (2.6)$$



Как сила тяги, так и сопротивление воздуха, зависят от скорости движения. График зависимости динамического фактора от скорости движения при полной нагрузке на автомобиль называется *динамической характеристикой*. Данный график используется в нашей стране как основной показатель тяговых качеств автомобиля.

## 2.5 Сцепление шин с поверхностью дороги

Тяговое усилие на колесах автомобиля может быть развито лишь в том случае, если между ведущими колесами и дорогой имеется достаточное сцепление. Коэффициент сцепления определяется по зависимости

$$\varphi = \frac{P_{\kappa}^{\max}}{G_{\kappa}},$$

где  $P_{\kappa}^{\max}$  – максимально допустимое без пробуксовывания тяговое усилие на колесе,  $G_{\kappa}$  – вертикальная нагрузка на покрытие. При

$P_{\kappa} > P_{\kappa}^{\max}$  начинается пробуксовывание ведущего колеса или проскальзывание заторможенного колеса.

В зависимости от направления сдвигающей силы, действующей на колесо, различают 2 вида коэффициента сцепления:

*Коэффициент продольного сцепления* ( $\varphi_{np}$ ), соответствующий началу проскальзывания заторможенного колеса или началу пробуксовывания движущегося колеса (при качении или торможении) без действия на колесо боковой силы. Этот коэффициент используют при вычислении тормозного пути автомобиля и оценки возможности трогания автомобиля с места.

*Коэффициент поперечного сцепления* ( $\varphi_{non}$ ), возникающий в тот момент, когда колесо одновременно и вращается, и скользит в боковом направлении. Он характеризует устойчивость автомобиля при проезде кривых малых радиусов.

Коэффициент сцепления зависит:

- от типа и состояния покрытия,
- конструкции и материала шин,
- давления в них воздуха,
- нагрузок на колесо,
- скоростей движения,
- температурных условий.

Самым главным фактором является состояние покрытия. На сухом шероховатом покрытии коэффициент сцепления имеет высокое значение. На мокром и грязном покрытии оно значительно уменьшается из-за наличия тонкой пленки воды.

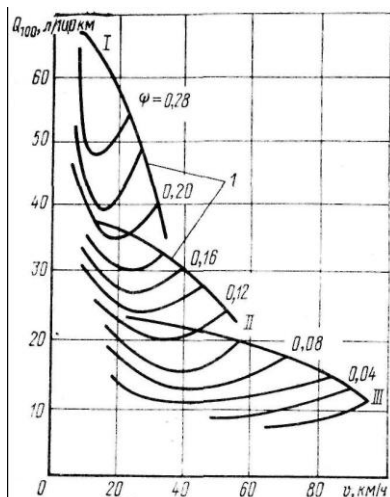
Чем ответственнее назначение дороги, тем более высокие требования предъявляются к коэффициенту сцепления. В нашей стране при обосновании геометрических элементов трассы исходят из значения продольного коэффициента сцепления, принимаемого при сухом и чистом покрытии и скорости движения автомобиля 60 км/ч, равном  $\varphi_{np} = 0,6$ .

Коэффициент поперечного сцепления принимают равным  $\varphi_{non} = (0,5 \div 0,85) \varphi_{np}$ .

## 2.7 Расход топлива в зависимости от дорожных условий и износ шин

Стоимость топлива составляет 10-15 % всех затрат на перевозки. Для оценки расхода топлива в зависимости от дорожных условий и скорости движения строят график топливной экономичности автомобиля. График строят для разных передач (см. рис. ниже).





I – III – группы кривых, относящихся к случаям движения на I – III передачах; 1 – кривые максимальных расходов топлива при движении с разными скоростями (цифры на кривых характеризуют дорожные сопротивления  $\Psi = f + i$ )

По графику определяют коэффициент дорожного сопротивления  $\Psi = f + i$ .

Износ шин зависит от скорости автомобиля на отдельных участках (нагревание шин, сила ударов о неровности) и от типа покрытия. Примем пробег шин (долговечность) на дорогах с ровным твердым покрытием (а/б или ц/б) за 100%. Тогда на дорогах с менее ровными покрытиями (щебеночные, гравийные, булыжная мостовая) долговечность снижается на 25-30 %, на дорогах с большим количеством выбоин – на 50 %.

## Литература

1. Федотов Г.А., Пospelов П.И. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. В 2 кн. Кн.1: Учебник. – М.: Высш. шк., 2009. – 646 с.
2. Жуков В.И., Гавриленко Т.В. Проектирование автомобильных дорог. Основы: учебное пособие. – Красноярск: Сиб. Федер. ун-т, 2014. – 144 с. (в печати).
3. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85\* / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2013. – 139 с.
4. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики [Текст] : учеб. для вузов / С. М. Тарг. – 11-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 1995. – 416 с.