

Шаршембиев Ж.С.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ВНЕШНИХ СИЛ
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ
НА ПОДЪЕМАХ ГОРНЫХ ДОРОГ

Zh.S. Sharshembiev

THE ANALYSIS OF INFLUENCING EXTERNAL FORCES
OF RESISTANCE TO MOVEMENT OF THE WHEEL MACHINE
ON RISE OF MOUNTAIN ROADS

УДК: 629.114.4

В статье проведен анализ действующих внешних сил сопротивления движению колесной машины на подъеме горных дорог. Рассмотрены сила сопротивления подъему, сила сопротивления качению, сила инерции, сила тяжести колесной машины.

In clause the analysis of influencing external forces of resistance to movement of the wheel machine on rise of mountain roads is carried out. Are considered force of resistance to rise, force to resistance качению, force of inertia, force of weight of the wheel machine.

Оценка тягово-динамических свойств колесной машины осуществляется в процессе моделирования прямолинейного движения на подъеме горных дорог. При этом предполагаем, что центр масс колесной машины перемещается по прямой линии, расположенной в неподвижной вертикальной плоскости. В этом случае все силы воздействий внешней среды на колесную машину расположены в этой плоскости, а векторы моментов внешних воздействий перпендикулярны плоскости.

При составлении модели системы внешних сил и моментов, действующих на колесную машину при прямолинейном движении на подъеме горных дорог, установим следующие допущения:

- в качестве колесной машины принимаем одиночный двухосный автомобиль с задними ведущими колесами;
- сила сопротивления воздуха пренебрегаем - $F_e=0$, так как, движение на подъеме скорость колесной машины очень низкая;
- левые и правые колеса передних и задних мостов имеют одинаковые нагрузки и находятся в одинаковых дорожных условиях;
- упругие свойства подвески не учитываются и колебания кузова не происходят.

При движении на подъем колесную машину действует система сил и моментов, разных по направлению и величине. Эти силы подразделяются на две группы: тяговая сила и внешние воздействующие силы сопротивлению движению (рис.1).

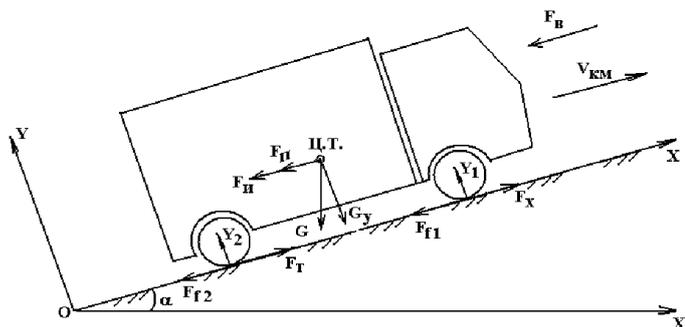


Рис. 1. Силы действующие на колесную машину при движении на подъем:
 F_T – сила тяги на ведущих колесах, F_{f1} , F_{f2} – силы сопротивлению качению,
 F_x – сила свободного качения ведомых колес, F_e – сила сопротивления воздуха,
 F_u – сила инерции или сопротивления разгону, F_n – сила сопротивления подъему,
 Y_1 , Y_2 – нормальные реакции дороги, G – сила тяжести колесной машины,
 α – угол подъема.

Силы сопротивлению движению колесной машины на подъеме горных дорог формируются – опорной поверхностью, т.е. дорогой, а также силой гравитационного тяготения Земли – силой тяжести, которая в нашем

случае имеет двух составляющих.

Рассмотрим внешние воздействующие силы сопротивлению движению колесной машины на подъемах горных дорог по отдельности и установим их зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров колесной машины и дорожных, природно-климатических параметров окружающей среды.

Сила тяжести колесной машины обусловлена массой колесной машины и уклоном горной дороги. Вектор силы тяжести колесной машины $G_{км}$ приложен в центре тяжести колесной машины (точка $Ц.Т.$ рис.1) и направление действия всегда направлена перпендикулярно по оси OX' , числовое значение которого определяется по известной формуле [1,2,3]:

$$G_{км} = m_{км}g, \quad (1)$$

где $m_{км}$ – масса колесной машины, кг; g – ускорения свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$. Как видно из рис.1, силу тяжести колесной машины при движении на подъем разложим на две составляющие силы:

$$G_{км} = G_X + G_Y, \quad (2)$$

Составляющая G_X , параллельная поверхности дороги, обычно называют силой сопротивления подъему и обозначаем F_n , числовое значение этой силы определим по формуле:

$$F_n = G_{км} \sin \alpha = m_{км}g \sin \alpha, \quad (3)$$

где α – угол продольного уклона дороги.

Составляющая сила тяжести G_Y , направленная перпендикулярно поверхности дороги, непосредственного воздействия на движение колесной машины не оказывает, так как ее вектор перпендикулярен вектору скорости $V_{км}$. Однако, она определяет нормальные реакции дороги и, следовательно, влияет на сопротивление качению и сцепление колес с дорогой.

Числовое значение этой силы определим по формуле:

$$G_Y = G_{км} \cos \alpha = m_{км}g \cos \alpha, \quad (4)$$

Следует отметить, что при движении на подъем, колесная машина не всегда может использовать максимальный развиваемый двигателем крутящий момент, так как тяговая сила на ведущих колесах не может превышать силу сцепления колес с дорогой. Тогда числовое значение силы сцепления:

$$F_{сц} = G_{Y2} \cdot \varphi_x = m_{км} \cdot K_{сц} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \varphi_x, \quad (5)$$

где G_{Y2} - сила тяжести колесной машины приходящаяся на ведущую колесу, $K_{сц}$ – коэффициент сцепной массы колесной машины,

$$K_{сц} = m_{\phi} / m_{км} \quad (6)$$

где m_{ϕ} – масса колесной машины приходящаяся на ведущую ось, т.е. сцепная масса, $m_{км}$ – полная масса колесной машины, φ_x – коэффициент сцепления шин колес с дорогой, табл.1 [1,2,3].

Таблица 1.

Средние значения коэффициентов продольного сцепления шин с дорогой

Тип и состояние дорожного покрытия	φ_x
Асфальтобетон, сухой	0,8 – 0,9
Асфальтобетон, мокрый	0,5 – 0,7
Гравий	0,55 – 0,65
Грунтовая дорога, сухая	0,65 – 0,7
Грунтовая дорога, мокрая	0,5 – 0,55
Уплотненный снег	0,15 – 0,2
Лед	0,1

На дорогах с твердым покрытием большее влияние на коэффициент сцепления φ_x оказывают шероховатость и влажность ее поверхности, наличие пыли и грязи. На мокрых дорогах при толщине водяной пленки около 0,2 мм ее наличие приводит к снижению коэффициента сцепления φ_x . При больших значениях толщины водяной пленки на части поверхности шины начинает действовать подъемная гидродинамическая сила и непо-

средственно с поверхностью дороги взаимодействует лишь часть поверхности контакта, следовательно, коэффициент сцепления φ_x уменьшается. Если на поверхности дороги имеется пленка грязи, то в связи с более высокой ее плотностью по сравнению с водой подъемная сила увеличивается и коэффициент сцепления φ_x уменьшается еще в большей степени.

Очень большое влияние на коэффициент сцепления φ_x оказывает скорость движения. На мокрых дорогах причиной влияния скорости движения на коэффициент сцепления φ_x является возникновение подъемной силы, пропорциональной квадрату скорости. Значительное влияние на коэффициент сцепления φ_x оказывает износ шин, так как с уменьшением сечения канавок, образуемых рисунком протектора, затрудняется отвод влаги. При износе более чем 50% интенсивно уменьшается коэффициент сцепления φ_x , при полном износе рисунка протектора на мокрых дорогах с недостаточной шероховатостью коэффициент сцепления φ_x может снизиться до $\varphi_x = 0,2 - 0,15$.

На сухих и чистых дорогах с твердым покрытием увеличение давления воздуха в шинах приводит к некоторому уменьшению коэффициента сцепления φ_x . На мокрых и грязных дорогах с твердым покрытием при увеличении давления воздуха в шинах в некоторых пределах увеличивается коэффициент сцепления φ_x , поскольку повышение удельной нагрузки в области контакта способствует выдавливанию влаги или грязи.

Из конструктивных параметров на коэффициент сцепления φ_x наибольшее влияние оказывают размеры колеса и рисунок протектора.

Суммарная сила сопротивления качению колесной машины определяется суммированием сил сопротивления качению всех колес:

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} = Y_1 \cdot f_1 + Y_2 \cdot f_2, \quad (7)$$

где f_1 и f_2 – коэффициенты сопротивления качения ведомых и ведущих колес.

Как видно из рис.1, при движении колесной машины на подъем:

$$Y_1 = G_{Y1} = m_{км} \cdot (1 - K_{сц}) \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

$$Y_2 = G_{Y2} = m_{км} \cdot K_{сц} \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (9)$$

Тогда, поставив значения Y_1 и Y_2 в формулу (7) получим:

$$\begin{aligned} F_f &= m_{км} \cdot (1 - K_{сц}) \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f_1 + m_{км} \cdot K_{сц} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f_2 = \\ &= m_{км} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f_1 - m_{км} \cdot K_{сц} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f_1 + m_{км} \cdot K_{сц} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f_2 = \\ &= m_{км} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot (f_1 - K_{сц} \cdot f_1 + f_2). \\ F_f &= m_{км} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot (f_1 - K_{сц} \cdot f_1 + f_2) \end{aligned} \quad (10)$$

Значение коэффициента сопротивления качению определяют экспериментально путем прокатывания ведомого колеса по горизонтальному участку дороги при номинальной нагрузке G_{Y1} , измеряя при этом силу F_x необходимую для равномерного качения:

$$f_1 = F_x / G_{Y1} \quad (11)$$

Для ведомого колеса из условия равновесия моментов получаем

$$F_x \cdot r_d = Y_1 \cdot a_{ш}, \quad (12)$$

где r_d – динамический радиус колеса, расстояние от центра катящегося колеса до опорной поверхности дороги, $a_{ш}$ – расстояние смещения нормальной реакции дороги. Величина $a_{ш}$ зависит от параметров шины и действующей на нее системы сил. Для ее вычисления не существует надежных методов, а измерение в эксперименте представляют значительные трудности. Поэтому вместо $a_{ш}$ используют более удобный, безразмерный параметр – коэффициент сопротивления качению.

Коэффициент сопротивления качению ведомого колеса соответствует соотношению

$$f_1 = r_d / a_{ш} \quad (13)$$

При скорости движения 30-50 км/ч коэффициент сопротивления качению ведомых колес f_1 можно считать постоянным и его значения приведены в табл.2 [1,2,3].

Потери на качение ведущего колеса могут быть существенно больше, чем у ведомого. У ведущего колеса кроме радиальной деформации шины возникает окружная деформация, которая может значительно увеличить потери на качение. Коэффициент сопротивления качению ведущего колеса:

$$f_2 = F_T / G_{Y2} \quad (14)$$

Используя формулу (9), найдем

$$f_2 = F_T / m_{км} \cdot K_{цз} \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

Таблица 2.

Коэффициенты сопротивления качению ведомых колес

Тип и состояние дороги	f ₁
Асфальтобетонная дорога: в хорошем состоянии	0,007-0,015
в удовлетворенном состоянии	0,015-0,020
Гравийная дорога в хорошем состоянии	0,020-0,025
Бульжная дорога в хорошем состоянии	0,025-0,030
Грунтовая дорога: сухая укатанная	0,025-0,030
после дождя	0,05-0,15
в период распутицы	0,10-0,25
Песок: сухой	0,10-0,30
сырой	0,06-0,15
Суглинистая и глинистая целина: сухая	0,04-0,06
в пластическом состоянии	0,10-0,20
Обледеленая дорога	0,015-0,030
Укатанная снежная дорога	0,03-0,05
Рыхлый снег	0,10-0,30

При движении колесной машины по неровностям дороги возникают колебания мостов и кузова, что приводит к изменению нормальных реакций и к увеличению гистерезисных (внутренних – из-за упругой деформации шины) потерь в шинах. Кроме того, необходимо учитывать потери в амортизаторах подвески кузова колесной машины. Эти дополнительные потери принято учитывать соответствующим увеличением коэффициентов сопротивления качению. При средних скоростях движения на изношенной асфальтной дороге значение коэффициентов сопротивления качению увеличиваются на 5-10%, на ровном бульжном покрытии – на 30-50%, на профилированной грунтовой дороге – на 10-30%. Кроме того, сопротивление качению зависит от конструктивных параметров шин: количества слоев и расположения нитей корда, толщины и состояния протектора. Уменьшение количества слоев корда, толщины протектора, увеличение наружного диаметра шины, применение синтетических материалов с малыми гистерезисными потерями способствуют снижению сопротивления качению. С увеличением степени изношенности шины значение коэффициента сопротивления качению уменьшается.

Сила инерции или сопротивления разгону возникает при неравномерном движении колесной машины за счет поступательно движущихся масс и инерционные моменты масс, совершающих относительные вращательные движения. При ускоренном движении колесной машины на подъемах горных дорог эти силы и моменты создают дополнительное сопротивление движению и требуют увеличения затраты энергии на этом режиме движения.

Сила инерции поступательно движущейся массы колесной машины на подъеме горных дорог:

$$F_u = - m_{км} a \sin \alpha = - m_{км} \sin \alpha (dV_{км}/dt) \quad (16)$$

где a – ускорение, $V_{км}$ – скорость движения, t – время движения колесной машины.

Список литературы:

1. Чудаков Е.А. Теория автомобиля. – М.: Машгиз, 1950. -343 с.
2. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория. – Мн.: Высшая школа, 1986. – 208 с.
3. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. – М.: Машиностроение, 1989. -240 с.

Рецензент: к.т.н., профессор Бекетаев О.Б.