

МЕТОД ОЦЕНКИ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ КОЛЕС АВТОМОБИЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО НЕРОВНОЙ ДОРОГЕ С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЙ ЕГО МАСС

На основе кинематики качения колеса предлагается методика определения коэффициента сопротивления качению для расчетов тяговой динамики автомобиля при движении по неровной дороге.

Ключевые слова: топливная экономичность, сопротивление качению, кинематика качения колеса.

Основными эксплуатационными свойствами автомобиля являются тягово-скоростные, тормозные, топливная экономичность, управляемость и плавность хода. Необходимо признать, что в современной теории эксплуатационных свойств автомобиля расчет оценочных параметров производится при рассмотрении движения по ровной дороге. Движение же по неровным дорогам, которые занимают значительную часть общей сети дорог Российской Федерации, практически не рассматривается. Однако движение по неровной дороге сопровождается значительными затратами мощности на колебания поддрессоренных и неподдрессоренных масс автомобиля и преодоление неровностей.

В существующих методиках расчета оценочных параметров эксплуатационных свойств автомобиля влияния неровностей дороги учитывается эмпирическим изменением коэффициента сопротивления качению f_k колес по опорной поверхности [1]. При этом не учитывается динамическое перераспределение нормальных реакций в контакте колес с дорогой вследствие колебаний поддрессоренных и неподдрессоренных масс автомобиля. Предварительное рассмотрение показывает, что изменение нормальных реакций в контакте колес также существенно влияет на величину формируемой силы сопротивления качению, правильный учет которой позволяет более точно рассчитывать оценочные параметры эксплуатационных свойств автомобиля.

При равномерном движении автомобиля рассматривают следующее уравнение силового баланса:

$$P_T = P_B + P_K + P_{\Pi}, \quad (1)$$

где P_T – тяговая сила; P_B – сила сопротивления воздуха; P_K – сила сопротивления качению колес автомобиля; P_{Π} – сила сопротивления подъёму.

Силу сопротивления качению колес представляют как произведение коэффициента сопротивления качению и нормальной реакции в контакте колес с дорогой, изменяющейся вследствие возникающих колебаний поддрессоренных и неподдрессоренных масс:

$$P_K = \sum_{i=0}^k f_{ki} R_{Zi}, \quad (2)$$

где f_{ki} – коэффициент сопротивления качению i -го колеса; R_{Zi} – нормальная реакция в контакте i -го

колеса с опорной поверхностью; k – количество колес автомобиля.

В работе [2] предлагается коэффициент сопротивления качению колеса определять исходя из кинематического и динамического представления движения ведомого и ведущего колес по неровной дороге.

При качении ведомого колеса (рис. 1, а) к его оси приложены толкающая сила P_T и вертикальная нагрузка P_{Z1} . Под действием силы P_T шина деформируется таким образом, что центр оси колеса смещается вперед по ходу движения на величину $c_1 = O_1O'_1$. Если представлять опорную поверхность несжимаемой, то есть считать деформацию грунта незначительной по сравнению с деформацией шины, то в пятне контакта шины с опорной поверхностью возникают реакции от сил P_T и P_{Z1} и соответственно R'_{X1} и R'_{Z1} .

Из-за неровности опорной поверхности реакция R'_{Z1} направлена под углом и пересекает вертикальную ось колеса в точке O''_1 . Проекция сил на горизонтальную и вертикальную ось дает выражение

$$R_{X1} = P_T; R_{Z1} = P_{Z1},$$

где R_{X1} – продольная реакция в контакте шин с дорогой.

Снос вертикальной реакции R_{Z1} для ведомого колеса определяется по рекомендации профессора В.А. Петрушева [3, 4], как

$$c_1 = \frac{R_{X1}}{P_{Z1}}(r_{\kappa 01} - r_{A1}); \quad a_{01} = \frac{R_{X1}}{P_{Z1}}r_{\kappa 01},$$

где c_1 – величина сноса вертикальной реакции на ведомом колесе, вызванного приложением толкающей силы P_T ; $r_{\kappa 01}$ – радиус качения ведомого колеса; a_{01} – величина сноса вертикальной реакции на ведомом колесе, вызванного несимметричностью эпюры давлений в зоне контакта шины с дорогой.

Плечо приложения вертикальной реакции определяется для ведомого колеса следующим выражением:

$$b_1 = a_{01} - c_1.$$

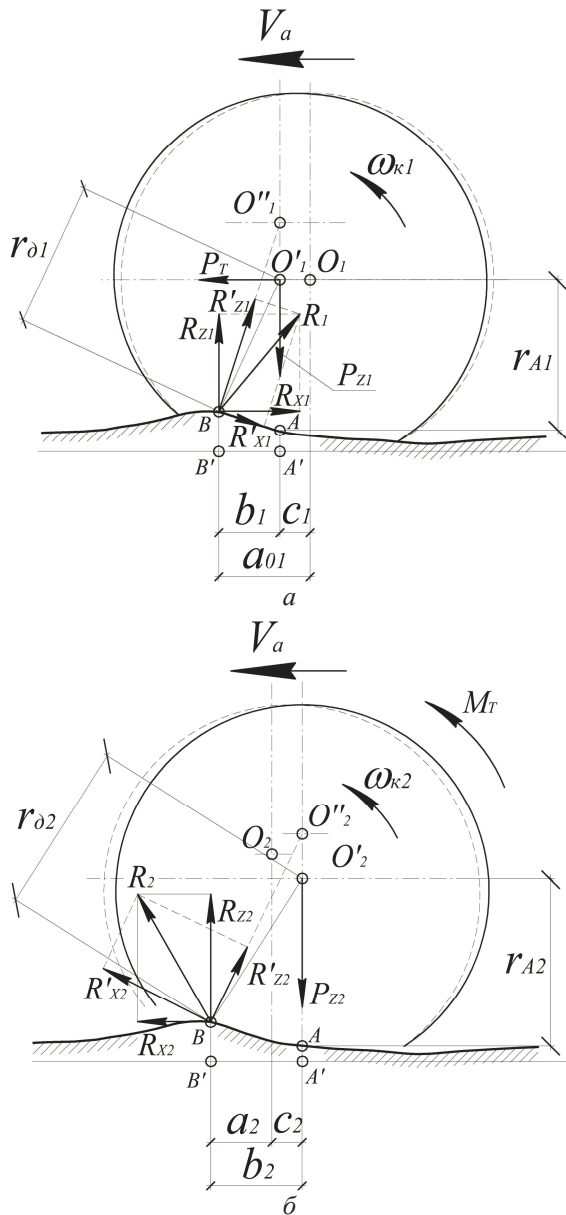


Рис. 1. Схема сил, действующих на ведомое (а) и ведущее (б) колеса автомобиля при качении по неровной опорной поверхности

При качении ведущего колеса (рис. 1, б) под действием тягового момента M_T шина деформируется так, что центр оси колеса смещается на расстояние $O_2O'_2$. Тяговая сила распределена по пятну контакта и равна горизонтальной реакции R_{x2} . Поэтому составляющие сноса вертикальной реакции R_{z2} для ведущего колеса будут определяться так:

$$c_2 = \frac{R_{x2}}{P_{z2}}(r_{\kappa02} - r_{A2}); \quad a_2 = a_{02} + \frac{M_T}{P_{z2}} \left(1 - \frac{r_{\kappa2}}{r_{\kappa02}}\right),$$

где c_2 – величина сноса вертикальной реакции на ведущем колесе, вызванного приложением тягового момента M_T ; $r_{\kappa2}$ – радиус качения ведущего колеса; a_2 – величина сноса вертикальной реакции на ведущем колесе, вызванного несимметричностью эпюры давлений в зоне контакта шины с до-

рогой; $r_{\kappa02}$ – радиус качения колеса, являющегося ведущим, в случае качения его в ведомом режиме; a_{02} – величина сноса вертикальной реакции на колесе, являющегося ведущим, в случае качения его в ведомом режиме. При этом величина a_{02} определяется по выражению

$$a_{02} = \frac{R_{x2}}{P_{z2}} r_{\kappa02}.$$

Плечо приложения вертикальной реакции для ведущего колеса рассчитывают как $b_2 = a_2 + c_2$, и тогда коэффициент сопротивления качению будет определяться по формуле

$$f_{\kappa i} = \frac{b_i}{r_{\text{дi}}},$$

где b_i – плечо приложения вертикальной реакции; $r_{\text{дi}}$ – динамический радиус колеса.

Величина r_{Ai} является геометрической разностью между координатой центра i -й неподдрессированной массы и текущей координатой микропрофиля дороги:

$$r_{Ai} = (\xi_i - q_i),$$

где ξ_i – вертикальные координаты неподдрессированных масс; q_i – ордината функции микропрофиля опорной поверхности.

Динамический радиус можно определить геометрически (рис. 1) через величины $A'A$, $B'B$, b , r_{Ai} :

$$r_{\text{дi}} = \sqrt{b_i^2 + (r_{Ai} - B'B + A'A)^2}.$$

Вторая же составляющая выражения (2), а именно нормальная реакция R_z , определяется с учетом возникающих при движении по неровной опорной поверхности колебаний поддрессированных и неподдрессированных масс автомобиля. Так, реакция в контакте передних колес будет равна

$$R_{z1} = c_{\text{ш1}}(\xi_1 - q_1) + \eta_{\text{ш1}}(\dot{\xi}_1 - \dot{q}_1),$$

а в контакте задних колес –

$$R_{z2} = c_{\text{ш2}}(\xi_2 - q_2) + \eta_{\text{ш2}}(\dot{\xi}_2 - \dot{q}_2),$$

где $c_{\text{ш1}}$, $c_{\text{ш2}}$ – коэффициенты нормальной жесткости шин; $\eta_{\text{ш1}}$, $\eta_{\text{ш2}}$ – коэффициенты неупругого сопротивления шин; $\dot{\xi}_i$ – скорость вертикальных перемещений неподдрессированных масс; \dot{q}_i – производная функции микропрофиля опорной поверхности по времени.

Также для расчетов необходимо знать радиус качения колеса автомобиля [5], который в общем случае определяется как:

$$r_{\kappa0i} = r_0 \frac{r_0 p_\omega + v_1 P_{zi}}{r_0 p_\omega + v_2 P_{zi}},$$

где $r_{\kappa0}$ – радиус качения, м; r_0 – свободный радиус колеса, м; p_ω – давление воздуха в шине, МПа; v_1, v_2 – константы, определяемые в зависимости от геометрических размеров шин.

Метод определения радиуса качения колеса автомобиля при движении по неровной дороге изложен в работе [6].

Таким образом, сила сопротивления качению, изменяющаяся во времени в зависимости от воздействия микропрофиля дороги, с учетом указанных теоретических представлений определится как

$$P_K = \sum_{i=0}^k [c_{шi}(\xi_i - q_i) + \eta_{шi}(\dot{\xi}_i - \dot{q}_i)] \frac{b_i}{\sqrt{b_i^2 + (r_{Ai} - B'B + A'A')^2}}.$$

$$\left. \begin{aligned} M \frac{(b^2 + \rho^2)}{L^2} \ddot{z}_1 + M \frac{(ab - \rho^2)}{L^2} \ddot{z}_2 + c_{p1}(z_1 - \xi_1) + \eta_1(\dot{z}_1 - \dot{\xi}_1) &= 0; \\ M \frac{(a^2 + \rho^2)}{L^2} \ddot{z}_2 + M \frac{(ab - \rho^2)}{L^2} \ddot{z}_1 + c_{p2}(z_2 - \xi_2) + \eta_2(\dot{z}_2 - \dot{\xi}_2) &= 0; \\ m_1 \ddot{\xi}_1 + c_{p1}(\xi_1 - z_1) + c_{ш1}(\xi_1 - q_1) + \eta_1(\dot{\xi}_1 - \dot{z}_1) + \eta_{ш1}(\dot{\xi}_1 - \dot{q}_1) &= 0; \\ m_2 \ddot{\xi}_2 + c_{p2}(\xi_2 - z_2) + c_{ш2}(\xi_2 - q_2) + \eta_2(\dot{\xi}_2 - \dot{z}_2) + \eta_{ш2}(\dot{\xi}_2 - \dot{q}_2) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Таким образом, задавая функцию микропрофиля дороги $q(S)$, возможно адекватно определить силу сопротивления качению колес по неровной дороге с учетом колебаний поддрессоренных и недрессоренных масс автомобиля. Используя рассмотренную методику расчета силы сопротивления качению, рассчитывают оценочные параметры тягово-скоростных свойств и топливной экономичности автомобиля при движении по неровной дороге.

Например, с учетом изложенной методики, определялась топливно-экономическая характеристика автомобиля при движении по неровной опорной поверхности [7].

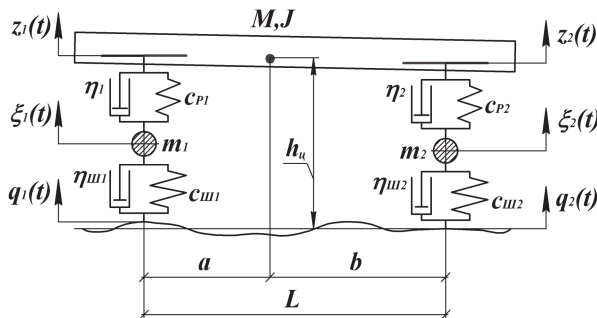


Рис. 2. Схема колебательной системы, эквивалентной автомобилю

Наиболее негативное влияние на топливную экономичность автомобиля оказывает движение по дорогам синусоидального профиля. Теоретические исследования проводились при моделировании движения автомобиля УАЗ-2206 по опорной

Для определения ξ_i и $\dot{\xi}_i$ используется колебательная система, эквивалентная автомобилю (рис. 2), система дифференциальных уравнений (3), описывающих вынужденные колебания поддрессоренных и недрессоренных масс автомобиля при движении по опорной поверхности заданного профиля, которые дают возможность определять нормальные реакции в контакте колес с дорогой, а также вертикальные перемещения, скорости и ускорения поддрессоренных и недрессоренных масс автомобиля:

поверхности синусоидального профиля, который характеризуется амплитудой q_0 и длиной волны l_p и определяется зависимостью

$$q = 0,5 q_0 \sin(2\pi t/l_p).$$

Расчетная топливно-экономическая характеристика установившегося движения автомобиля УАЗ-2206 приведена на рис. 3 и характеризуется минимальным расходом топлива 15,3 л / 100 км при скорости 78 км/ч.

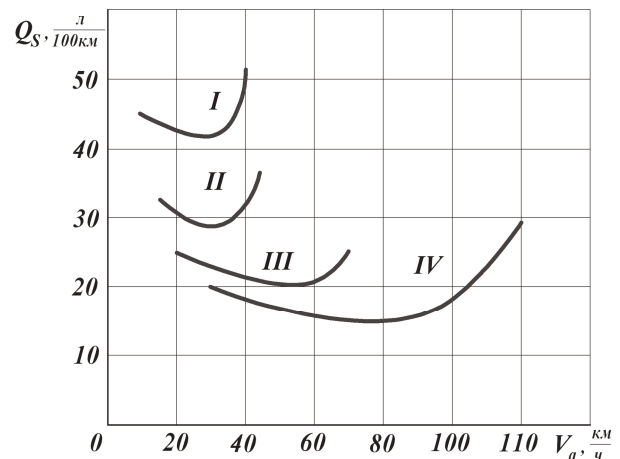


Рис. 3. Топливо-экономическая характеристика движения автомобиля УАЗ-2206 при движении по ровной дороге с асфальтобетонным покрытием

В качестве показателей, характеризующих топливную экономичность автомобиля используются минимальный путь расход топлива авто-

мобили $Q_{S\min}$ и скорость, при которой достигается этот расход, называемая экономичной V_3 .

Влияние высоты синусоидальных неровностей q_0 на расход топлива и оптимальную скорость движения отражено на рис. 4 и 5.

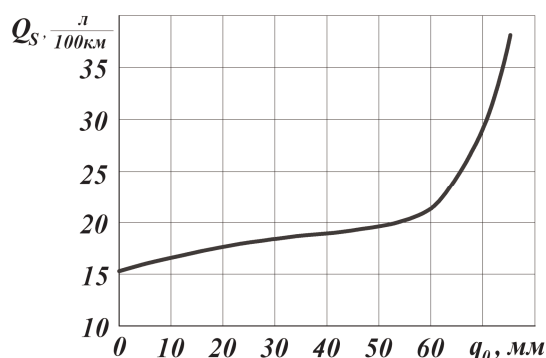


Рис. 4. Зависимость минимального путевого расхода топлива от высоты синусоидальных неровностей

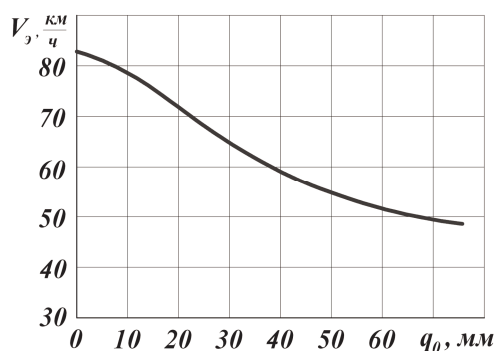


Рис. 5. Зависимость экономичной скорости движения от высоты синусоидальных неровностей

С увеличением высоты синусоидальных неровностей расход топлива увеличивается плавно до высоты неровностей 55 мм и $Q_S = 20$ л / 100 км. Затем расход топлива резко возрастает и при высоте неровностей 75 мм достигает 38 л / 100 км. Это объясняется значительной деформацией пневматических шин и подвески автомобиля, в результате чего увеличивается величина нормальных реакций в контакте колес с дорогой и, следовательно, сила сопротивления качению.

В зависимости от степени неровности дороги дополнительное увеличение коэффициента сопротивления качению колес может достигать 0,019, что превышает значение этого коэффициента на ровной дороге примерно в 1,7 раза. Увеличение коэффициента сопротивления качению колес на 10 % приводит к увеличению расхода топлива автомобиля с бензиновыми двигателями на 8...10 %, а с дизельными двигателями – на 6...7 %.

Рассмотренный метод оценки силы сопротивления качению колес автомобиля позволяет повысить точность расчетов оценочных параметров эксплуатационных свойств автомобиля при движении по неровной дороге.

Литература

- Иларионов, В.А. Эксплуатационные свойства автомобиля (теоретический анализ) / В.А. Иларионов. – М.: Машиностроение, 1966. – 280 с.
- Енаев, А.А. Определение топливно-экономической характеристики автомобиля при движении по неровной дороге: труды Братского государственного технического университета (Естественные и инженерные науки - развитию регионов) / А.А. Енаев, А.В. Желтышев. – Том 2. – Братск: ГОУ ВПО «БрГТУ», 2004. – 380 с.
- Петрушов, В.А. Мощностной баланс автомобиля / В.А. Петрушов, В.В. Московкин, А.Н. Евграфов. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.
- Петрушов, В.А. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В.А. Петрушов, С.А. Шуклин, В.В. Московкин. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
- Московкин, В.В. Система методов для исследования и расчета топливной экономичности и скоростных свойств автомобиля: диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.05.03. – М., 1999. – 338 с.
- Желтышев, А.В. Определение радиуса качения колеса автомобиля при движении по неровной дороге / А.В. Желтышев, А.А. Енаев // Естественные и инженерные науки – развитию регионов: Материалы межрегиональной научно-технической конференции. – Братск: БрГТУ, 2004. – 188 с.
- Желтышев, А.В. Теоретические и экспериментальные исследования топливной экономичности автомобиля при движении по неровной дороге: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2006. – 28 с.