

Зависимости сопротивления качению пневматических шин

© В.В. Ларин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлен анализ широко используемых зависимостей сопротивления качению пневматических шин от вертикальной нагрузки и давления воздуха в шине, отмечены их достоинства и недостатки. Предложены пути повышения точности рассматриваемых зависимостей.

Ключевые слова: транспортное средство, опорная поверхность, эластичный колесный движитель, пневматическая шина, вертикальная деформация, вертикальная нагрузка, давление воздуха, сопротивление качению.

Для расчета подвижности колесных транспортных средств (КТС) помимо вертикальной деформации h_z колесного движителя (КД) под действием нормальной нагрузки P_z необходимо знать его коэффициент сопротивления качению $f_{ш}$. Кроме того, с учетом упругого и непосредственного скольжения КД сопротивление качению оценивают коэффициентом мощности сопротивления качению [1]

$$f_{Nf} = N_c / P_z v_{кx},$$

где N_c — мощность сопротивления качению; P_z — вертикальная нагрузка; $v_{кx}$ — продольная составляющая скорости оси КД.

Исходным параметром при расчете f_{Nf} является коэффициент сопротивления качению в ведомом режиме $f_{шв}$ (при отсутствии крутящего момента M_k на оси) на ровной опорной поверхности (ОП) с учетом температуры шины, оказывающей значительное влияние на его значение. После определения $f_{шв}$ по различным методикам учитывают шероховатость ОП, скорость $v_{кx}$, подведенный момент M_k , продольную скорость скольжения для расчета f_{Nf} .

Для вычисления $f_{шв}$ наиболее надежным до сих пор является экспериментальный метод. Однако в любом случае $f_{шв}$ определяют в зависимости, как минимум, от вертикальной нагрузки P_z и давления воздуха в шине p_w . На рис. 1 представлены зависимости $f_{шв}(P_z, p_w)$.

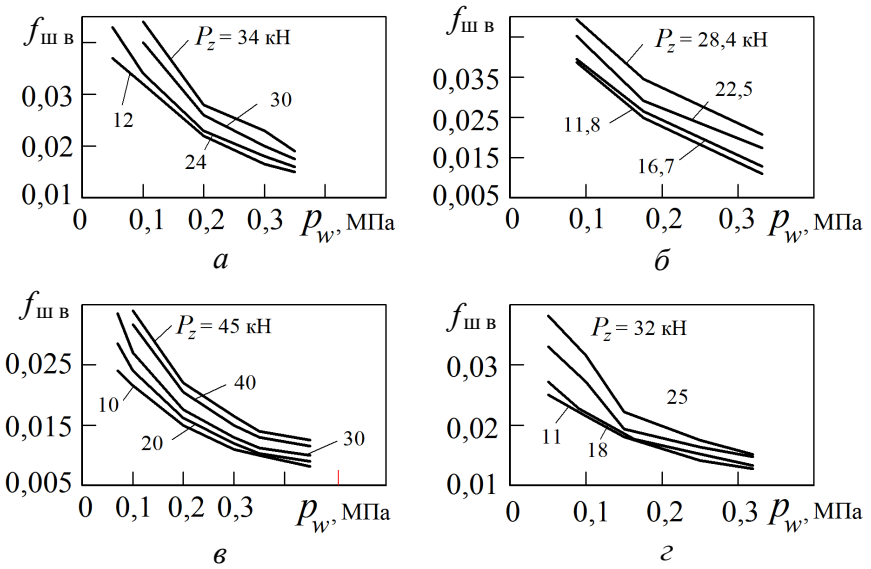


Рис. 1. Экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления качению в ведомом режиме для шин 1200×500–508 мод. И-247 (а), 14.00–20 мод. ОИ-25 (б), 1300×530–533 мод. ВИ-3 (в) и 16.00–20 мод. И-159 (г) от вертикальной нагрузки и давления воздуха

Приведенные данные можно использовать при оценке подвижности КТС, однако пользоваться ими не всегда удобно. Поэтому многие исследователи КТС стремятся получить эмпирические зависимости $f_{ш в}(P_z, p_w)$, позволяющие с приемлемой точностью учитывать изменения нагрузки P_z и давления p_w в широком диапазоне эксплуатационных режимов КТС.

Остановимся на наиболее распространенных соотношениях.

Формула Я.С. Агейкина предлагает рассчитывать коэффициент $f_{ш в}$ по формуле [2]

$$f_{ш в} = \frac{P_{f_{ш1}} + P_{f_{ш2}}}{P_z}. \quad (1)$$

Здесь $P_{f_{ш1}}$, $P_{f_{ш2}}$ — силы сопротивления качению, обусловленные соответственно деформацией оболочки шины и циклическим сжатием резины протектора:

$$P_{f_{ш1}} = 0,5 \cdot 10^6 \psi_1 p_{ш0} c'_{ш} h_z^2 \left(0,5 - \frac{h_z}{3b_{б.д}} \right); \quad c'_{ш} = \frac{B_{ш}}{H_{ш}} + \frac{1,5H_{ш}}{B_{ш}};$$

$$P_{f_{ш2}} = 0,5 \cdot 10^6 \psi_2 b_{б.д} h_{прот} \frac{(p_w + p_{ш0})^2}{E_{рез} k_{грз}};$$

ψ_1 и ψ_2 — коэффициенты гистерезисных потерь соответственно в оболочке шины и резине протектора; $p_{ш0}$ — давление шины на ОП при $p_w = 0$, МПа; h_z — вертикальное перемещение оси колеса, м; $b_{б.д}$ — ширина беговой дорожки шины, м; $B_{ш}, H_{ш}$ — соответственно ширина и высота профиля шины, м; $h_{прот}$ — толщина протектора, м; p_w — давление воздуха в шине, МПа; $E_{рез}$ — модуль деформации резины, МПа; $k_{трз}$ — коэффициент насыщенности протектора.

Нормальную нагрузку и среднее давление в контакте колеса с ОП рассчитывают при этом соответственно по формулам

$$P_z = \bar{p}_z F_{ш} \cdot 10^6; \quad \bar{p}_z = 0,5c'_{ш} (p_w + p_{ш0}) \frac{\pi h_z}{b_{б.д}} \left(1 - \frac{h_z}{b_{б.д}} \right),$$

где P_z — в Н; \bar{p}_z — в МПа; $F_{ш}$ — площадь контакта, м².

Следовательно, вычислить $f_{ш в}$ можно только при задании перемещения h_z , что усложняет определение искомого параметра. Однако необходимо отметить, что формулы были получены для оценки подвижности КТС на деформируемых ОП, в методиках расчета которых в связи с деформируемостью шины и ОП приходится в качестве аргумента использовать их деформации h_z и h_T .

В НАМИ предложено следующее выражение [3]:

$$f_{ш в} = \frac{\alpha_{f_{ш}} + \beta_{f_{ш}} (0,1P_z)^2}{1 + 10p_w}, \quad (2)$$

где $\alpha_{f_{ш}}, \beta_{f_{ш}}$ — коэффициенты, постоянные для данной шины и зависящие от ее конструктивных параметров, МПа, МПа/Н²:

$$\alpha_{f_{ш}} = 0,082 - 7,8 \cdot 10^{-7} n_{сл} (10B_{ш})^{1,5} r_{св}^2 / H_{ш},$$

$$\beta_{f_{ш}} = H_{ш} n_{сл} (10B_{ш})^{1,5} r_{св}^2 - 9,75 \cdot 10^{-10},$$

где $n_{сл}$ — число слоев корда в оболочке шины; $r_{св}$ — свободный радиус колеса.

При малой скорости движения ($v_{кx} \approx 0$) можно использовать формулу Антонова [4]

$$f_{ш в 0} = \left(1 - \frac{k_{изн}}{3} \right) \frac{k_{карк}}{40} \left[1 + 0,1(n_{сл} + 5) \left(1 - \frac{p_w}{p'_{ш0} + p_w \text{ ном}} \right)^2 \right] \times \\ \times \sqrt[4]{\frac{H_{ш} (r_{св} - H_{ш})}{B_{ш} r_{св}} \left(\frac{n_{сл} + 30}{100} \right) \left(\frac{P_z + P_z \text{ ном}}{P_z \text{ ном}} \right)}, \quad (3)$$

где $k_{\text{изн}}$ — степень износа высоты грунтозацепа, $k_{\text{изн}} = 1 - h_{\text{грз}i} / h_{\text{грз}0}$; $k_{\text{карк}}$ — коэффициент каркаса, равный 1 для диагональных и 0,95...0,002 $v_{\text{кк}}$ — для радиальных шин; $P_{z \text{ ном}}$, $p_{w \text{ ном}}$ — номинальные вертикальная нагрузка и давление воздуха в шине соответственно.

При этом увеличение потерь с ростом скорости движения можно оценивать с помощью выражения

$$f_{\text{ш в}}'' = f_{\text{ш в}0} \left[1 + \left(\frac{k_{\text{карк}} v_{\text{кк}}}{30} \right)^3 \sqrt{\frac{p'_{\text{ш}0}}{p_w + p'_{\text{ш}0}}} \right].$$

Достоинством выражений (2) и (3) является отсутствие деформации h_z шины, значительно упрощающее расчеты при движении по твердым (недеформируемым) ОП.

Определим неизвестные параметры в представленных формулах методом наименьшей суммы квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений $f_{\text{ш в} \varnothing} = f(p_w, P_z)$, причем отдельно при постоянных значениях p_w и P_z . Значения величин в формулах, полученные при различных давлениях p_w в некотором диапазоне P_z и, наоборот, при постоянном давлении p_w отличаются, что указывает на возможные ошибки при использовании данных зависимостей. В таблице для различных шин представлены средние значения параметров, входящих в формулы (1)–(3).

Таблица

Значения параметров в формулах для расчета коэффициента сопротивления качению шин

| Параметры | 1200×500–508 мод. И-247 | 14.00–20 мод. ОИ-25 | 16.00–20 мод. И-159 | 1300×530–533 мод. ВИ-3 |
|---------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| $P_{z \text{ ном}}$, кН | 33,0 | 27,9 | 25,0 | 45,0 |
| $p_{w \text{ ном}}$, МПа | 0,35 | 0,37 | 0,32 | 0,35 |
| $p_{\text{ш}0}$, МПа | 0,1242 | 0,1480 | 0,0695 | 0,1770 |
| $p'_{\text{ш}0}$, МПа | 0,1392 | 0,2000 | 0,2617 | –0,0680 |
| ψ_1 | 2,3913 | 3,0000 | 2,9908 | 1,7451 |
| ψ_2 | 1,1361 | 1,0000 | 3,3676 | 0,2825 |
| $\alpha_{f_{\text{ш}}}$ | 0,0630 | 0,0176 | 0,0539 | 0,0545 |
| $\beta_{f_{\text{ш}}}$ | 0,0017 | 0,0100 | 0,0025 | 0,0001 |
| ψ'_1 | 0,1302 | 0,1068 | 0,1051 | 0,1159 |
| ψ'_2 | $7,10 \cdot 10^{-5}$ | $16,0 \cdot 10^{-5}$ | $6,37 \cdot 10^{-5}$ | $6,30 \cdot 10^{-5}$ |
| k'_z , м·МПа/Н ^{3/4} | $7,66 \cdot 10^{-4}$ | $7,50 \cdot 10^{-4}$ | $8,39 \cdot 10^{-4}$ | $6,74 \cdot 10^{-4}$ |

На рис. 2 представлены относительные погрешности определения коэффициента сопротивления качению $\tilde{f}_{шв} = \frac{f_{шв \text{ экс}} - f_{шв \text{ расч}}}{f_{шв \text{ экс}}}$ для одной из шин при изменении P_z и p_w . В качестве базовых при расчете приняты средние значения параметров, полученные при фиксированных значениях P_z и p_w (см. таблицу).

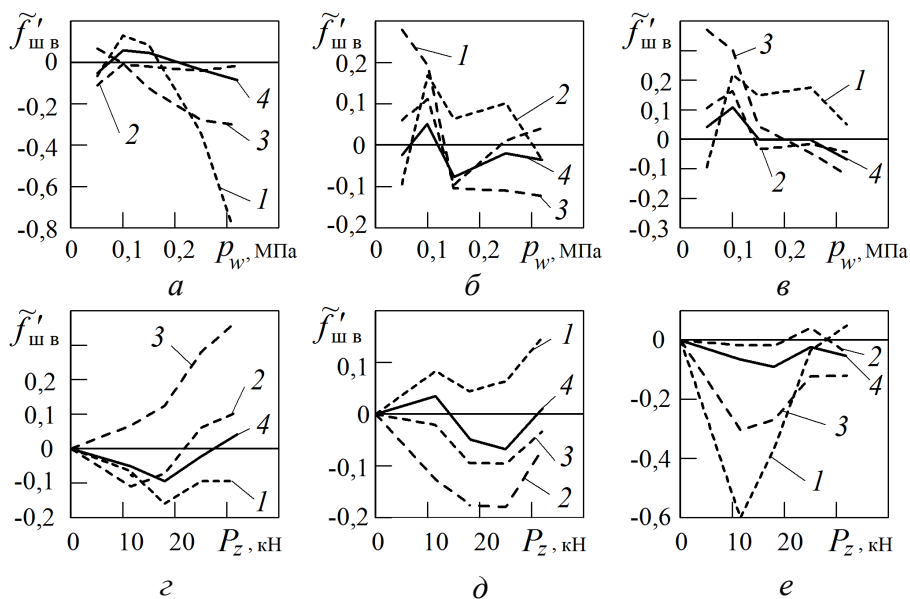


Рис. 2. Относительные погрешности определения коэффициента сопротивления качению в ведомом режиме для шины 16.00–20 мод. И-159 при $P_z = 11,5$ (а), 25 (б), 32 кН (в) и $p_w = 0,05$ (г), 0,15 (д), 0,32 МПа (е): 1–4 — расчет по формулам (1)–(4) соответственно

Анализ этих зависимостей показывает значительное расхождение экспериментальных и расчетных значений $f_{шв}$ в некоторых диапазонах P_z и p_w . Наибольшие погрешности наблюдаются при использовании формул (1) и (3).

Для повышения точности расчета предложены следующие выражения:

$$f_{шв} = \frac{P'_{fш1} + P'_{fш2}}{P_z}; \quad (4)$$

$$P'_{fш1} = 0,5 \cdot 10^6 \psi'_1 h_z^2; \quad P'_{fш2} = 0,5 \cdot 10^6 \psi'_2 b_{б,д} h_{прот} E_{рез} \frac{P_z}{P_z \text{ ном} k_{ГРЗ}}.$$

Вертикальная деформация при этом

$$h_z = \frac{k'_z (0,1P_z)^{3/4}}{1+10p_w} \sqrt{\frac{p_{w \text{ ном}} + p_w}{4p_{w \text{ ном}}}},$$

где k'_z — коэффициент, постоянный для данной шины, м·МПа/Н^{3/4}.

Как видно на рис. 2, относительные погрешности при расчете по формуле (4) достаточно стабильны и незначительны (не более 10 %) во всех диапазонах изменения p_w и P_z .

Имея приемлемые выражения для определения $f_{шв}$ и h_z , можно переходить к более сложным моделям, описывающим взаимодействие КД с ОП. Представленные на рис. 3 расчетные зависимости коэффициента мощности сопротивления качению f_{Nf} от коэффициента тяги $k_{\text{тяги}} = P_x/P_z$ учитывают распределение нормальных и касательных напряжений по длине контакта шины с ОП. Для твердой ОП кривые построены при различной относительной деформации колеса $\tilde{h}_{zк} = h_z/r_{св}$ (см. рис. 3, а) [5], а для деформируемой ОП — от относительной деформации грунта $\tilde{h}_{гк} = h_r/r_{св}$ (см. рис. 3, б) [1].

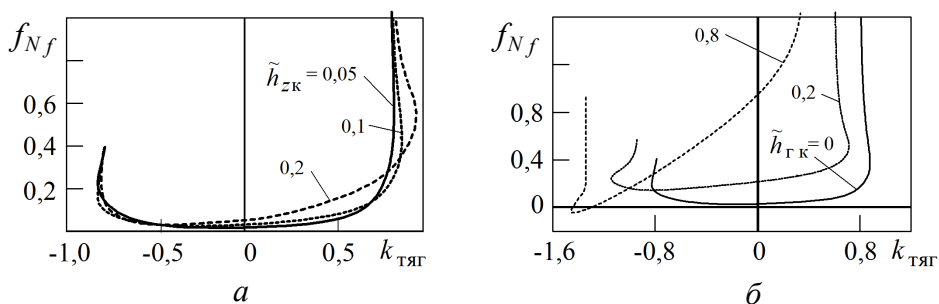


Рис. 3. Зависимости коэффициента мощности сопротивления качению КД с шиной 1600×600-685 при $P_z = 75$ кН от коэффициента тяги и относительной деформации колеса на твердой ОП (а) и на деформируемой ОП грунта (б)

Таким образом, предлагаемые зависимости позволяют повысить точность расчета $f_{шв}$ КД при изменяемых значениях эксплуатационных параметров P_z и p_w , а тем самым параметров подвижности и загруженности систем КТС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ларин В.В. *Теория движения полноприводных колесных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 391 с.
- [2] Агейкин Я.С. *Проектируемость автомобилей*. Москва, Машиностроение, 1981, 232 с.

- [3] Петрушов В.А., Московкин В.В., Евграфов А.Н. *Мощностной баланс автомобиля*. Москва, Машиностроение, 1984, 160 с.
- [4] Беспалов С.И., Антонов Д.А., Лазаренко В.П., Маковеев В.С., Тимофеев В.Д., Шишкин В.А. *Теория движения боевых колесных машин*. Москва, Изд-во Министерства обороны, 1993, 385 с.
- [5] Ларин В.В. Оценка параметров прямолинейного качения колесного движителя по твердой опорной поверхности. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 2, с. 59–69.

Статья поступила в редакцию 11.10.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ларин В.В. Зависимости сопротивления качению пневматических шин. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1034.html>

Ларин Василий Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области проходимости колесных машин. e-mail: larin.lv20946@yandex.ru