

## КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА. НОВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ И ОЦЕНКЕ

*Предлагается новый метод оценки коэффициента сопротивления качению, базирующийся на эллиптической модели описания гистерезисных потерь в шине; выведены соотношения для количественного расчета коэффициента сопротивления качению*

**Ключевые слова:** коэффициент сопротивления качению; колесо с пневматической шиной; эллиптически-степенная модель; поглощающая способность.

Условную количественную характеристику, равную отношению силы сопротивления качению автомобильного колеса к нормальной реакции опорной поверхности, называют коэффициентом сопротивления качению колеса.

Согласно исследованиям А.С. Литвинова [1], коэффициент сопротивления качению шины при движении колеса по недеформируемой поверхности включает две составляющие. Первая характеризует силовые потери, связанные с гистерезисным трением при радиальной деформации элементов шины, вторая – кинематические потери, связанные с проскальзыванием элементов шины относительно опоры. Хотя причины возникновения потерь на сопротивление качению колеса хорошо изучены, достаточно точных формул для определения коэффициента сопротивления и его составляющих нет. Поэтому в теории используют значения коэффициента сопротивления качению, полученные опытным путем, обычно – в ведомом режиме качения колеса, т. е. силовую составляющую коэффициента.

Существует несколько экспериментальных методов определения коэффициента сопротивления качению [2]. К ним относятся испытания на выбег автомобиля, на топливную экономичность с помощью динамометрической тележки или барабанного стенда. Наиболее распространенный метод определения коэффициента заключается в измерении крутящего момента, необходимого для вращения стального барабана при качении по нему испытуемой шины, либо продольной силы, действующей на ось катящегося по барабану колеса.

Однако, всем этим методам присущи определенные недостатки, которые связаны либо с необходимостью измерения малых сил сопротивления качению в условиях действия на колесо больших нагрузок, либо со сложностью вычле-

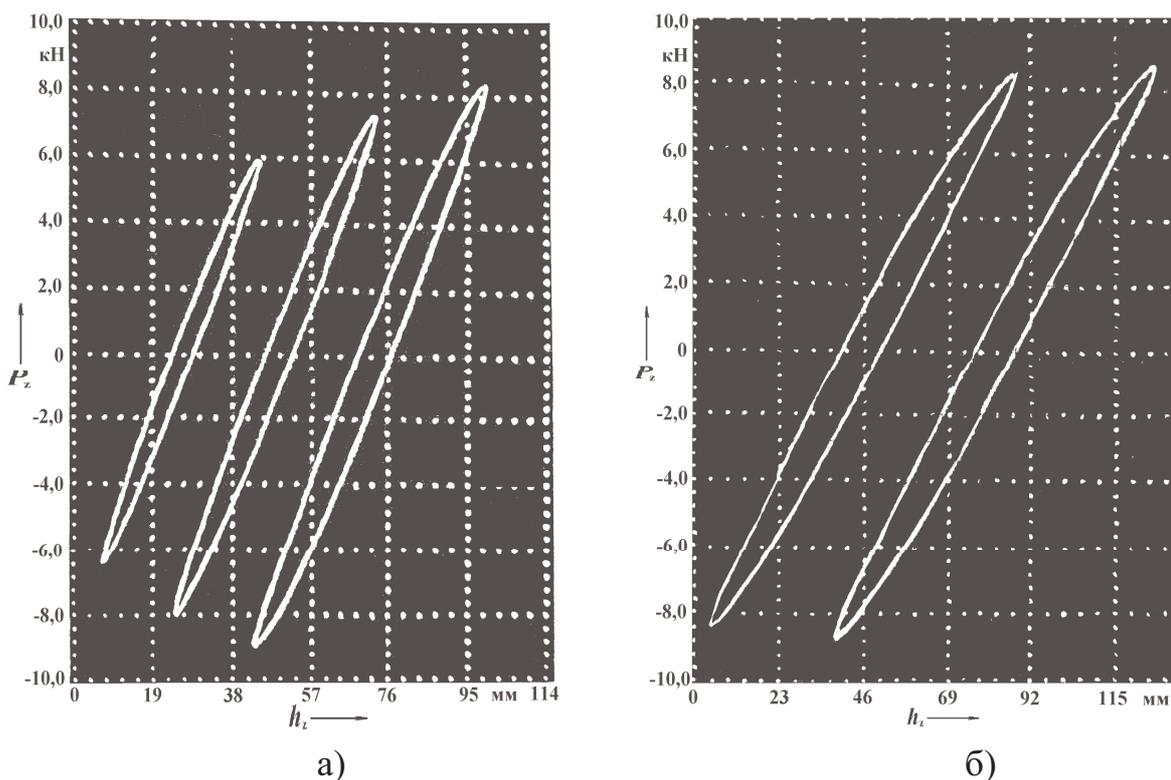
нения потерь на качение колеса из общих потерь при движении автомобиля, либо с несоответствием условий нагружения шины реальным условиям ее работы, что приводит к значительным погрешностям результатов испытаний.

В данной статье рассматривается новый метод оценки коэффициента сопротивления качению, базирующийся на эллиптически-степенной модели поглощающей способности шины [3]. Эта модель, в отличие, например, от модели вязкого трения, строится не из априорного признания какой-либо гипотезы о физической природе сил неупругого сопротивления, а путем математического описания экспериментальных характеристик нормальной жесткости. Характеристика жесткости представляет собой графическое изображение в координатах «сила – деформация» функциональной зависимости нормальной нагрузки, действующей на колесо, от вызванного ею нормального прогиба шины при изменении нагрузки как в ходе нагружения колеса, так и в ходе его разгрузки. Характеристика в явном виде, в виде площади замкнутой петли, отражает энергию, теряемую при деформации шины от действия сил неупругого сопротивления (гистерезисные потери), а наклон средней линии характеристики отражает упругие свойства шины.

Характер изменения характеристик жесткости шин, особенно получаемых в динамическом режиме нагружения колеса (рис. 1 [4]), дает основание аппроксимировать их уравнением эллипса вида

$$F = \pm F_a \sqrt{1 - (h_z / h_{za})^2}, \quad (1)$$

где  $F$ ,  $F_a$  – текущее и амплитудное значения силы неупругого сопротивления в шине;  $h_z$ ,  $h_{za}$  – текущее и амплитудное значения нормального прогиба шины.

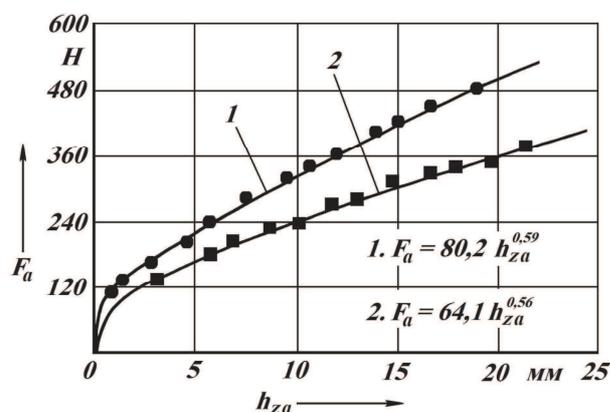


**Рис. 1.** Диаграммы с экспериментальными характеристиками радиальной упругости шин, полученными в динамическом, без вращения (а) и с вращением (б) колеса, режиме нагружения: а – 245/70HR16 И-241 ( $P_{zn} = 9,00 \text{ кН}$ ,  $p_{вн} = 0,24 \text{ МПа}$ ,  $p = 18 \text{ рад/с}$ ), б – LR70-15 GL ( $P_{zn} = 9,00 \text{ кН}$ ,  $p_{вн} = 0,24 \text{ МПа}$ ,  $p = 18 \text{ рад/с}$ ,  $\omega_k = 172 \text{ мин}^{-1}$  – для левой кривой)

Другим экспериментально подтвержденным фактом является функциональная зависимость амплитудных значений силы неупругого сопротивления от амплитудных значений радиальной деформации шины (рис. 2), которая в самом общем виде может быть выражена степенной функцией:

$$F_a = H_{ш} h_{za}^n, \quad (2)$$

где коэффициент пропорциональности  $H_{ш}$  и показатель степени  $n$  являются параметрами модели и отражают степень проявления поглощающих свойств шины.



**Рис. 2.** Результаты обработки характеристик нормальной жесткости шин, построенных при различных размахах нагрузки:

1 – шина 8.40-15 модели Я-245,  $P_{zn} = 5,95 \text{ кН}$ ,  $p_{вн} = 0,20 \text{ МПа}$ ; 2 – шина 7.00-15 модели И-89,  $P_{zn} = 6,15 \text{ кН}$ ,  $p_{вн} = 0,22 \text{ МПа}$

Таким образом, математическое описание эллиптическо-степенной модели поглощающей способности может быть определено следующим уравнением:

$$F = H_{ш} h_{za}^n \sqrt{1 - (h_z / h_{za})^2} \text{sign } \dot{h}_z, \quad (3)$$

где  $\text{sign } \dot{h}_z$  - функция «знак  $\dot{h}_z$ ».

Параметры эллиптическо-степенной модели (3) являются константами для конкретной шины, т. е. не зависят от внутреннего давления воздуха, уровня статической нагрузки, температуры покрышки, частоты изменения вертикальной нагрузки, скорости качения колеса, догружения крутящим моментом и боковой силой. А конструктивные особенности шин (норма слойности, материал корда, степень износа протектора) оказывают влияние только на коэффициент пропорциональности  $H_{ш}$ .

Суть метода оценки коэффициента сопротивления качению автомобильного колеса заключается в аппроксимации реальной эпюры нормальной нагрузки на колесо для конкретного сечения



## I. Проблемы механики и машиноведения

Размер и модель шины, тип дороги	Параметры шины					
	$P_z$ , Н	$h_{z\max}$ , мм	$k_l$	$H_{ш}$ , Н/мм <sup>n</sup>	n	$r_d$ , мм
1. 7,35 ИД-195 сухой асфальт	4350	23,5	4,1	301,2	0,48	310
Скорость качения колеса $V_k \approx 30$ км/ч						
2. LR78-15 SUPER ARAMID RADIAL сухой асфальт	9000	38,1	5,0	271,0	0,43	370
Скорость качения колеса $V_k \approx 30$ км/ч						

$$f_c = \frac{2^{1-n} k_l H_{ш} h_{z\max}^{1+n}}{3\pi r_d P_z}, \quad (8)$$

где  $k_l$  – коэффициент пропорциональности между длиной пятна контакта и нормальным прогибом шины;  $h_{z\max}$  – полный прогиб шины в радиальном направлении.

Необходимо подчеркнуть, что в полученных формулах (7) и (8) для заданного эксплуатационного состояния шины и режима нагружения колеса все входящие в выражения величины (кроме  $h_{z\max}$ ,  $r_d$  и  $P_z$ ) определяются в предварительном эксперименте, как при исследовании поглощающей способности, и при изменении этих условий остаются неизменными, т. е. константами. Величина  $P_z$  задается как исходная, а величины  $h_{z\max}$  и  $r_d$  легко определяются из простейшего эксперимента по обжатию шины либо берутся из справочной литературы.

В качестве проверки полученных соотношений вычислим значения  $a_{ш}$  и  $f_c$  для двух шин, параметры которых приведены в таблице. Результаты вычислений:

Шина № 1

$$a_{ш} = 4,67 \text{ мм}; \quad f_c = 0,015$$

Шина № 2

$$a_{ш} = 4,31 \text{ мм}; \quad f_c = 0,012$$

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приводимыми в литературных источниках по испытанию шин, например, в бюллетене «Информ-Простор».

Таким образом, предложенный метод и выведенные соотношения позволяют оценивать коэффициент сопротивления качению колеса с

пневматической шиной по характеристикам нормальной жесткости, построение которых в различных режимах нагружения колеса и оценка параметров гистерезисных потерь намного более отработаны и достоверны, чем применение экспериментальных методов прямого измерения сил (моментов) сопротивления качению.

#### Литература

1. Литвинов, А. С. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Хиллард, Д. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями: пер. с англ. / Д. Хиллард, Дж. Спрингер. – М.: Машиностроение, 1988. – 520 с.
3. Рыков, С. П. Моделирование и оценка поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин в расчетах подвески, плавности хода и поддресоривания автомобиля: моногр. / С. П. Рыков; Брат. гос. техн. ун-т. – Братск, 2004. – 124 с.
4. Рыков, С. П. Экспериментальные исследования поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин: испытательный комплекс, методики проведения экспериментов и обработки результатов: моногр. / С. П. Рыков; Брат. гос. техн. ун-т. – Братск, 2004. – 322 с.
5. Пат. 2327968 (RU) C2, МПК G01M17/02. Способ определения коэффициента сопротивления качению колеса с пневматической шиной и устройство для его осуществления / Рыков С.П., Тарасюк В.Н. (RU); заявитель и патентообладатель Брат. гос. ун-т. – № 2006116090; заяв. 10.05.06; опубл. 27.06.08, Бюл. № 18.