

Е. В. Балакина, Д. Н. Илюшин, Е. А. Салыкин, Е. А. Федянов

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИУСА КАЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ШИНЫ
ПО ДАННЫМ ЕЕ ИСПЫТАНИЙ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

balakina@vstu.ru; Ilyushin@vstu.ru; e_salykin@vstu.ru; fedyanov@vstu.ru

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Николаевич Илюшин, Ilyushin@vstu.ru

Проанализированы известные методы априорного определения радиуса качения автомобильного колеса. Отмечено, что известные формулы для вычисления радиуса качения на основе известных значений свободного радиуса шины и ее деформации под действием статической нагрузки или дают существенное расхождение с экспериментальными данными, или требуют введения поправочных коэффициентов, значения которых для различных типов шин могут быть найдены только экспериментально. Предложена новая формула для определения радиуса качения автомобильной шины при различных значениях ее относительной деформации под действием вертикальной нагрузки на ось колеса. Изложены условия, принятые при выводе формулы. Приведено сравнение результатов расчета радиуса качения по предлагаемой формуле с известными экспериментальными данными. Показано, что расхождение значений радиуса качения, найденных расчетом и экспериментально, не превышает 1,5 %.

Ключевые слова: автомобильная шина, радиус качения, новая методика расчета

E. K. Balakina, D. N. Iyushin, E. A. Salykin, E. A. Fedyanov

**PREDICTION OF THE ROLLING RADIUS
OF A CAR TIRE BASED ON ITS STATIC LOAD TEST DATA**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Known methods for a priori determination of the rolling radius of automobile wheels are analyzed. It is noted that existing formulas for calculating the rolling radius based on known values of the tire's free radius and its deformation under a static load either yield significant discrepancies with experimental data or require the introduction of correction factors whose values for different tire types can only be found experimentally. A new formula for determining the rolling radius of an automobile tire for various values of its relative deformation under a vertical load on the wheel axle is proposed. The conditions adopted in deriving the formula are presented. A comparison of the rolling radius calculation results using the proposed formula with known experimental data is provided. It is shown that the discrepancy between the rolling radius values found by calculation and experiment does not exceed 1.5%.

Keywords: car tire, rolling radius, new calculation method

При решении ряда задач на основе моделирования движения автомобиля требуется знать радиус качения колеса [1]. Величина этого радиуса определяет пройденный автомобилем путь и, тем самым, косвенно влияет на величину эксплуатационного расхода топлива. Погрешность априорного определения радиуса качения должна обеспечивать требуемую ГОС-Том Р41.84-99 точность измерения пути, пройденного автомобилем за время испытаний, а именно 0,3 %.

Как известно [2; 3; 4], радиус качения колеса отличается от свободного радиуса на величину, значение которой определяется рядом факторов, среди которых вертикальная нагрузка на колесо, жесткость каркаса коле-

са, высота и жесткость протектора.

Некоторые производители шин указывают в каталогах своей продукции для каждой модели шин значения радиуса качения, найденные экспериментально [5; 6; 7].

Известные формулы для вычисления радиуса качения колеса [2; 4] или дают результаты, сильно отличающиеся от экспериментальных данных, или включают величины, которые не могут быть с приемлемой точностью найдены априорно. Вместе с тем в этих формулах совершенно обосновано радиус качения колеса представлен как функция от величины деформации колеса под статической нагрузкой. Например, формула, предложенная Е. В. Балакиной [4], имеет вид

$$r_r = r_0 \cdot \left[1 - \frac{\arcsin\left(\sqrt{\bar{\Delta}_r} \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)\right)}{\pi} + \frac{\sqrt{\bar{\Delta}_r} \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)}{\pi} \right], \quad (1)$$

где r_0 – свободный радиус колеса, а $\bar{\Delta}_r$ – относительная деформация шины под статической нагрузкой. Последняя величина, в свою очередь, зависит от радиальной жесткости шины:

$$\bar{\Delta}_r = \frac{\Delta_r}{r_0} = \frac{P_z}{C_r \cdot r_0}, \quad (2)$$

где Δ_r – абсолютная величина деформации шины в направлении вертикальной оси в зоне пятна контакта, P_z – вертикальная статическая нагрузка на колесо, C_r – радиальная жесткость шины, r_0 – свободный радиус шины.

У современных радиальных шин величина C_r лежит в пределах 200...1200 Н/мм.

В формуле Н. Ж. Расејка [2], радиус качения выражен через известный свободный радиус

колеса и параметры деформации колеса и его протектора под нагрузкой:

$$r_r = r_0 - \varepsilon \cdot d_t - \eta \cdot \rho, \quad (3)$$

где d_t – высота протектора, ε – коэффициент, учитывающий деформацию протектора, ρ – абсолютная статическая деформация каркаса шины под действием вертикальной нагрузки, η – коэффициент, учитывающий изменение абсолютной деформации каркаса при качении шины.

В формуле (2) коэффициенты ε и η предполагается брать по экспериментальным данным. При этом из коэффициентов η и ε последний особенно вариативен по своим значениям. Первый меняется в более узких пределах, так как зависит, главным образом, от типа каркаса шины.

Формулу для определения радиуса качения колеса, отличную от приведенных выше, можно получить из следующих соображений. Длина $l_{\text{кт}}$ пятна контакта, образованного шиной, деформированной под действием вертикальной статической нагрузки, может быть связана со свободным радиусом r_0 шины и абсолютной вертикальной ее деформацией Δ_r (рис. 1). Без учета деформации участков шины, примыкающих к пятну контакта,

$$l_{\text{кт}} = 2 \cdot r_0 \cdot \sqrt{\bar{\Delta}_r \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)}, \quad (4)$$

где $\bar{\Delta}_r = \Delta_r / r_0$ – относительная величина вертикальной деформации.

С учетом указанной деформации протяженность пятна контакта при той же величине относительной вертикальной деформации оказывается меньше, чем это определено формулой (4):

$$l_{\text{кд}} = 2 \cdot K_{\text{деф}} \cdot r_0 \cdot \sqrt{\bar{\Delta}_r \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)}, \quad (5)$$

где $K_{\text{деф}}$ – коэффициент, учитывающий уменьшение длины пятна контакта вследствие деформации участков шины, примыкающих к пятну контакта.

Если пренебречь незначительным изменением величины Δ_r вследствие динамических эффектов, обусловленных качением шины, и влиянием на форму и размеры пятна контакта наличия не только вертикальной, но и продольной составляющей у силы, приложенной к оси колеса, то пятно контакта будет перемещаться на расстояние, равное $l_{\text{кд}}$, при повороте колеса на угол $2\alpha_d$ (рис. 1).

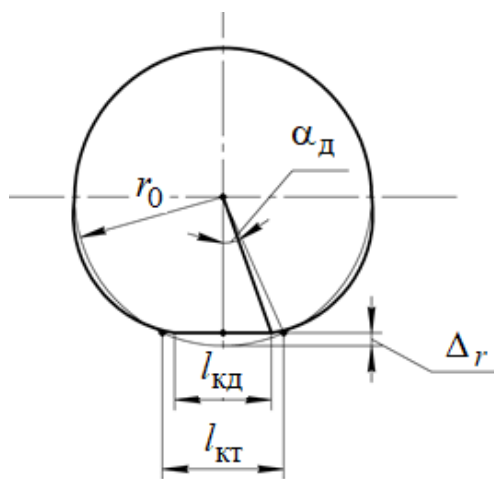


Рис. 1. Схема деформации колеса

Время $\Delta t_{2\alpha_d}$, за которое колесо повернется на угол $2\alpha_d$, зависит от угловой скорости ω вращения колеса: $\Delta t_{2\alpha_d} = 2\alpha_d / \omega$. Если при качении колеса скольжение отсутствует, то повороту колеса на угол $2\alpha_d$ будет соответствовать перемещение его оси в горизонтальном направлении на расстояние $l_{\text{кд}}$ со скоростью

$$V_x = \frac{l_{\text{кд}}}{\Delta t_{2\alpha_d}} = \frac{2 \cdot K_{\text{деф}} \cdot r_0 \cdot \sqrt{\bar{\Delta}_r \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)}}{2\alpha_d} \cdot \omega. \quad (4)$$

Выражая величину угла α_d через его тангенс: $\text{tg}(\alpha_d) = 0,5 \cdot l_{\text{кд}} / [r_0 \cdot (1 - \bar{\Delta}_r)]$, получаем

$$V_x = \frac{K_{\text{деф}} \cdot r_0 \cdot \sqrt{\bar{\Delta}_r \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)}}{\arctg(K_{\text{деф}} \cdot \frac{\sqrt{\bar{\Delta}_r \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)}}{1 - \bar{\Delta}_r})} \cdot \omega. \quad (6)$$

Скорость поступательного движения колеса связана с величиной радиуса качения очевидным образом: $V_x = r_r \cdot \omega$. С учетом последнего из равенства (6) следует

$$r_r = r_0 \cdot \frac{K_{\text{деф}} \cdot \sqrt{\bar{\Delta}_r \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)}}{\arctg(K_{\text{деф}} \cdot \frac{\sqrt{\bar{\Delta}_r \cdot (2 - \bar{\Delta}_r)}}{1 - \bar{\Delta}_r})}. \quad (7)$$

Значение коэффициента $K_{\text{деф}}$ можно оценить, используя экспериментально полученные значения радиусов качения для различных типов шин. Такие экспериментальные данные известны для шин «Continental», «Goodyear», «Michelin». Сопоставление результатов, выполненных по предлагаемой формуле вычисления радиусов качения шин при различных значениях $K_{\text{деф}}$ с экспериментальными данными, показывает, что в рабочем диапазоне значений относительной деформации $\bar{\Delta}_r$ от 0,01 до 0,12 значение $K_{\text{деф}}$ может быть принято равным 0,93.

На рис. 2 в качестве примера приведены полученные по формуле (7) графики зависимости относительного радиуса качения $\frac{r_r}{r_0}$ автомобильных шин от величины их относительной вертикальной деформации $\bar{\Delta}_r$. На этом же графике показаны значения $\frac{r_r}{r_0}$, экспериментально найденные для некоторых моделей шин.

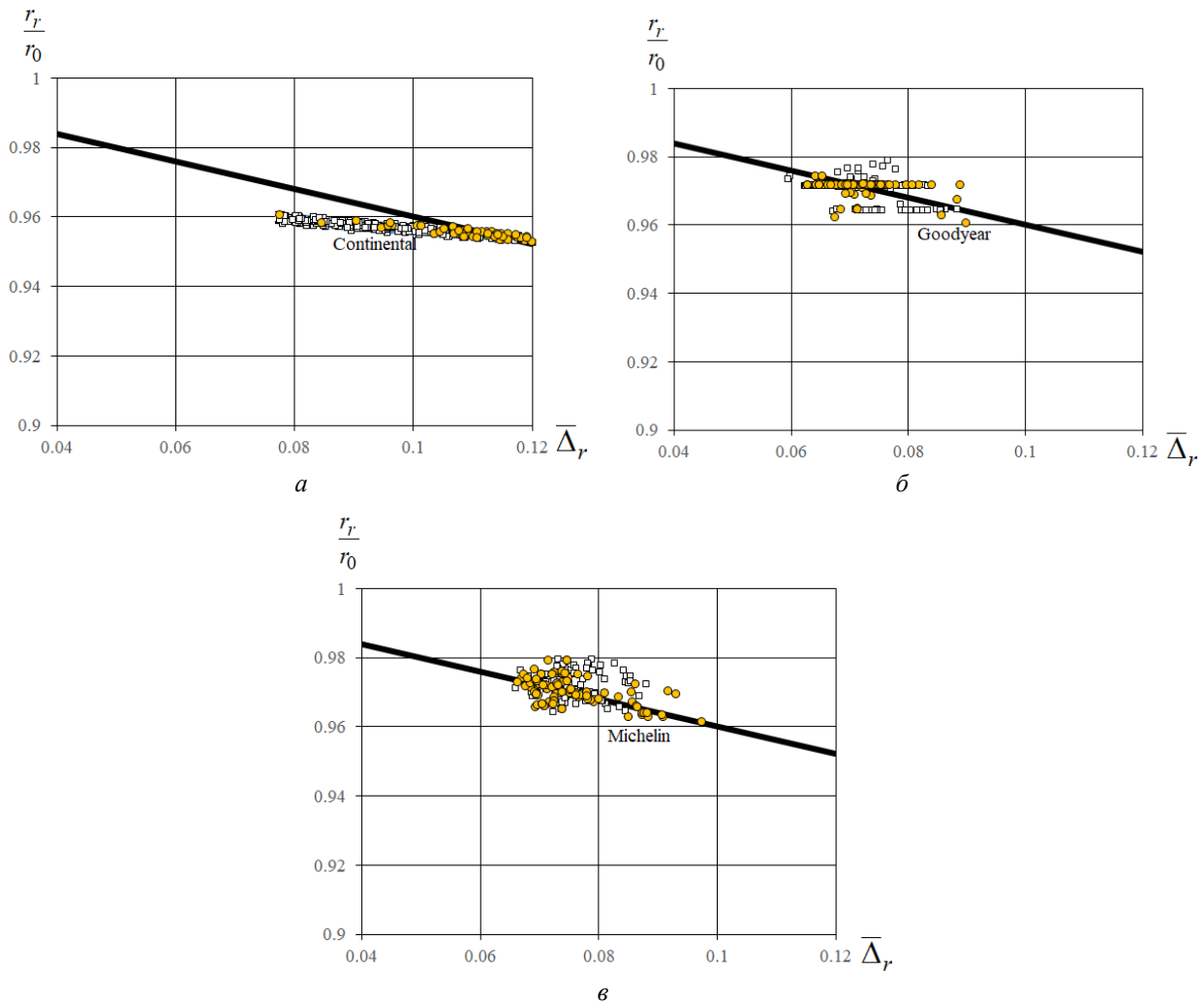


Рис. 2. Результаты расчета $\frac{r_r}{r_0} = f(\overline{\Delta_r})$ для разных шин:

a – Continental; b – Goodyear; v – Michelin;
 круги – обычный профиль; квадраты – низкий и сверхнизкий профиль

Сопоставление значений относительного радиуса качения автомобильных шин, полученных расчетом по предлагаемой формуле, с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о том, что максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 12,5 %, а среднее расхождение около 2 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балакина, Е. В. О видах расчетных радиусов колеса АТС, о необходимости и достаточности их применения в разных задачах / Е. В. Балакина, И. В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2024. – № 12. – С. 1–6. EDN: HJWSVF.
2. Pacejka, H. B. Tyre and Vehicle Dynamics. Second edition ed. AMSTERDAM, BOSTON, HEIDELBERG, LONDON, NEW YORK, OXFORD, PARIS, SAN DIEGO, SAN FRANCISCO, SINGAPORE, SYDNEY, TOKYO: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2006. – 657 pp.
3. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля / В. П. Тарасик. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
4. Balakina, E. V. Calculation of the Wheel Rolling Radius at Design Modeling of a Wheeled Vehicle [Электронный ресурс] / E. V. Balakina, A. I. Kislov, V. A. Malkov, D. V. Bruev // Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2022) (Sochi, Russia, 16-20 May, 2022) / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; Moscow Polytechnic University [et al.]. – Cham (Switzerland) : Springer, 2023. – P. 32–39. (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering : LNME).
5. Groupe Michelin [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.michelin.com/> (дата обращения: 13.11.2025 г.).
6. Goodyear Tires [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.goodyear.com/> (дата обращения: 13.11.2025 г.).
7. Continental [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.continental.com/en/> (дата обращения: 13.11.2025 г.).