

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ НА МАЛЫХ СКОРОСТЯХ

*доктор технических наук Волков В.П.,
кандидаты технических наук Рабинович Э.Х., Белогуров Е.А.,
магистры Руденко Е.Е., Никитин Д.В.*

На швидкостях ниже 20 км/год опоры руху легкових автомобілів різко зменшуються. Можливо, це викликають сили інерції деформованої частини шини в зоні контакту. Запропоновано емпіричні формули для розрахунку поправок до коефіцієнта опоры коченню.

At speeds below 20 km/h resistance to motion of passenger cars are sharply reduced. Perhaps this is caused with the force of inertia of the deformable part of the tire contact area. Empirical formulae for calculating the corrections to the coefficient of rolling resistance were proposed.

Введение. Создатели автомобилей и шин постоянно борются за снижение сопротивлений движению. При этом основное внимание уделяется средним и высоким скоростям движения: аэродинамические характеристики измеряют продувкой в аэродинамических трубах на высоких скоростях (например, в Дмитрове – 144 км/ч, в НТЦ АвтоВАЗ – 216 км/ч, аэродинамическая труба BMW в Мюнхене – до 300 км/ч), шины на стендах испытывают при скоростях 80...90 км/ч (максимум 170...300, минимум – 10...16 км/ч). Между тем реальные скорости заметно меньше (у нас – до 130 км/ч), а при работе в городе намного ниже: сейчас в Киеве средняя скорость 13 км/ч и ее мечтают повысить до 20 км/ч; в Москве 15 км/ч, в Подмоскowie 30 км/ч. Это необходимо учитывать и конструкторам, и эксплуатационникам, например, при расчете норм расхода топлива для автобусов и такси. Кроме того, следует уточнить методы расчета диагностического параметра «путь выбега с 50 км/ч»: в технических характеристиках легковых автомобилей традиционно записывают «не менее 500 м», а испытания показывают значения до 1000 м. Поэтому вопрос расчета сопротивлений движению на малых скоростях вполне актуален.

Анализ публикаций. Анализ показателей выбега седана Ford Mondeo [1] показал, что на скорости ниже 20 км/ч сопротивление движению быстро падает почти до нуля.

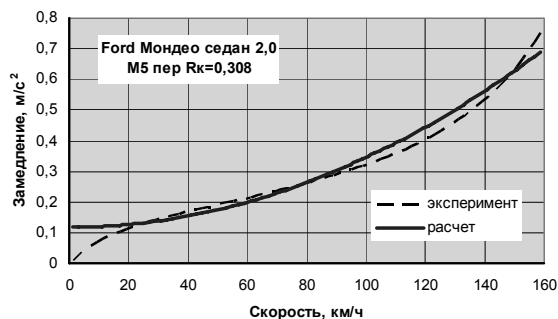


Рис. 1. Зависимость замедления выбега седана Ford Mondeo от скорости [1]

Изучение результатов полигонных испытаний, а также экспериментов ХНАДУ [2, 3] подтвердило, что это явление характерно, по-видимому, для всех автомобилей. Однако шинные фирмы такого падения не показывают (см., например, рис. 2 [4]) – возможно, из-за отмеченного выше ограничения минимальной скорости испытательных стендов.

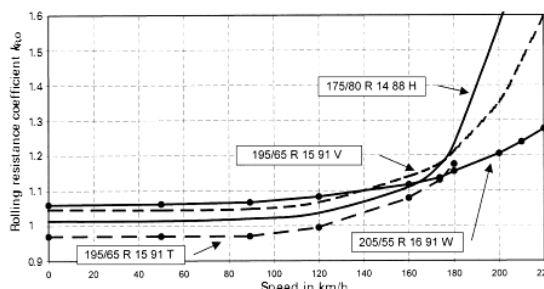


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления качению от скорости (фирма Continental) [4]

Ранее д.т.н. В.И. Кнороз описал некоторое снижение сопротивлений качению, правда, не до полной остановки и не такое заметное (рис. 3, [5]).

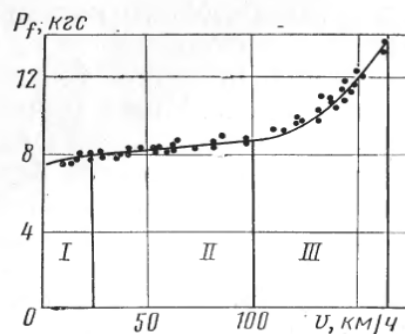


Рис. 3. Зависимость сопротивления качению от скорости (радиальная шина 6,45-13P модели M-130A на барабанном стенде) [5]

Наконец, в работе [6] идет речь о падении сопротивлений почти до нуля – но для массивных шин (гусматиков) и на скоростях намного меньше 0,6 м/с.

Цель и постановка задачи. Цель исследования – повышение точности тягово-скоростных расчетов за счет совершенствования математических моделей сил сопротивления движению автомобиля на малых скоростях. Для этого следует решить следующие задачи:

- 1) проверить, не является ли описанная зависимость результатом некорректных математических преобразований при обработке данных эксперимента;
- 2) попытаться оценить возможные объяснения причин описанного падения;
- 3) вывести эмпирические формулы для практических расчетов сил сопротивления движению автомобиля на малых скоростях.

Экспериментальная проверка сопротивлений движению на малой скорости. Чтобы убедиться в реальности рассматриваемого явления, проведен ряд экспериментов с регистрацией параметров выбега различными способами: видеозаписью движения стрелки проградуированного спидометра, записью трека приемником GPS и видеозаписью проезда вдоль дорожной разметки. Все три способа надежно подтвердили факт прогрессирующего падения сопротивлений по мере снижения скорости (рис.4-6).

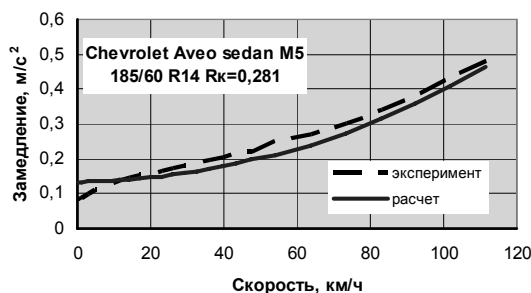


Рис. 4. Зависимость $j(V)$, построенная по видеозаписи движения стрелки спидометра [6]

В сочетании с описанными в [2] результатами обработки чужих экспериментов это позволяет считать рассматриваемое падение сопротивлений надежно установленным фактом.

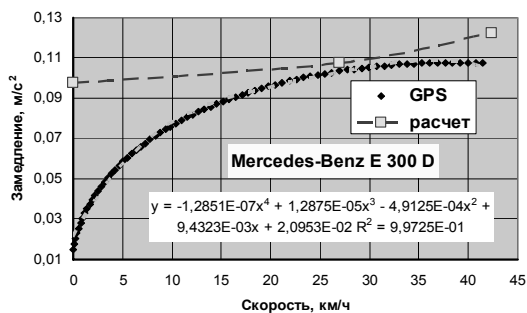


Рис. 5. Зависимость $j(V)$, построенная по треку GPS [7]

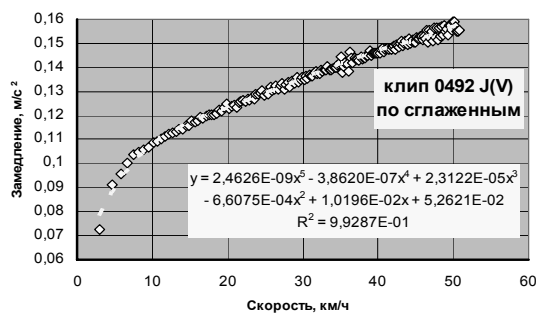


Рис. 6. Зависимость $j(V)$, построенная по видеозаписи проезда автомобиля Chevrolet Evanda вдоль разметки [7]

Влияние инерции элементов шины в контакте с дорогой. На скорости 20 км/ч современный легковой автомобиль ($m=1500$ кг, $C_x=0,3$, $F=2$ м²) испытывает общее сопротивление движению около 160 Н. Сопротивление воздуха составляет около 7 Н, потери в трансмиссии – менее 30 Н. Следовательно, основную роль играет сопротивление качению. Анализируя возможные причины его падения на малой скорости, мы обратили внимание на силы инерции элементов шины, перемещаемых в радиальном направлении в зоне контакта с дорогой (рис. 7).

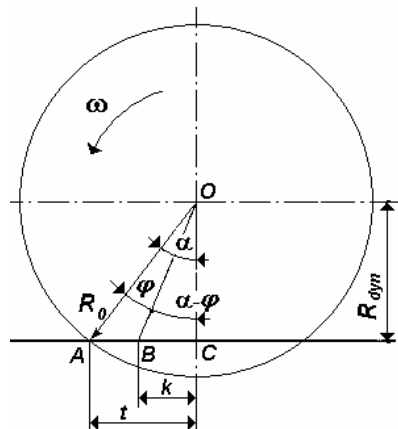


Рис. 7. Расчетная схема

Чтобы оценить реальность такой гипотезы, мы провели упрощенный расчет сил инерции, приняв следующие допущения:

- 1) до входа в контакт и после выхода из контакта шина не деформируется;
- 2) поперечная кривизна шины в контакте нулевая;
- 3) изменение динамического радиуса при снижении скорости пренебрежимо мало;
- 4) силы инерции в передней и задней половинах контакта одинаковы по модулю;
- 5) в передней половине контакта силы инерции преодолеваются толкающим усилием, движущим колесо; в задней половине контакта силы инерции преодолеваются силами упругости релаксирующей шины и уменьшают давление в контакте, т.е. также увеличивают сопротивление качению.

Расчет выполнен на примере шины 175/70 R13 (свободный радиус $R_0=0,295$ м, динамический $R_{dyn}=0,281$ м). Рассматриваем элемент беговой дорожки в виде поперечной полоски шириной 0,01 м. По нашим измерениям в статике ширина беговой дорожки около 0,14 м; по данным В.А. Зуева, толщина покрышки с протектором около 0,015 м, средняя плотность шины с металлокордом около 1250 кг/м³. Масса элемента

$$m = 0,14 \cdot 0,015 \cdot 0,010 \cdot 1250 \approx 0,026 \text{ кг.}$$

Угол поворота колеса на пути 0,01 м по окружности радиусом $R_0=0,295$ м:

$$\Delta\varphi = 0,01 / 0,295 = 0,034 \text{ радиана.}$$

Выразим угловую скорость через линейную:

$$\omega = \frac{v_a}{3,6 \cdot R_{dyn}} = \frac{v_a}{3,6 \cdot 0,281} = 0,99 v_a \approx v_a, \text{ c}^{-1}.$$

Время поворота колеса на угол φ :

$$t = \varphi / \omega = \varphi / v_a.$$

Будем анализировать процесс отдельными шагами, каждый из которых характеризуется углом поворота $\Delta\varphi = 0,034$ радиана.

У современных легковых радиальных шин при движении по прямой пятно контакта имеет форму прямоугольника со слегка скругленными углами. Длина и ширина прямоугольника

отличаются мало (хотя у некоторых низкопрофильных шин длина может быть меньше ширины). Примем, что у массовой шины в нашем примере длина пятна контакта $2t=0,14$ м. При динамическом радиусе шины $R_{dyn}=0,281$ м угол входа беговой дорожки шины в контакт

$$\alpha = \text{Arctg} \frac{t}{R_{dyn}} = \text{Arctg} \frac{0,07}{0,281} \approx 14^\circ.$$

Путь точки А по радиусу за время поворота колеса на угол φ :

$$\Delta S = AO - BO = R_0 - R_{dyn} / \text{Cos} (\alpha - \varphi).$$

Средняя радиальная скорость точки А на этом пути

$$v = \Delta S / \Delta t.$$

Среднее радиальное ускорение на i -том участке процесса:

$$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t}.$$

Сила инерции элементарного участка шины

$$P_i = m \cdot a_i,$$

в том числе ее вертикальная составляющая

$$P_i = m \cdot a_i \cdot \text{Cos} (\alpha - \varphi_i).$$

Суммарный момент преодолеваемых сил инерции участка шины в контакте:

$$M_j = 2 \cdot \sum_{i=1}^n P_{iV} \cdot k_i = 2m \cdot R_{dyn} \sum_{i=1}^n a_i \cdot \text{tg} (\alpha - \varphi_i).$$

Суммарная сила сопротивления качению, создаваемая силами инерции в контакте:

$$P_j = M_j / R_{dyn} = 2m \sum_{i=1}^n a_i \cdot \text{tg} (\alpha - \varphi_i).$$

Результаты расчета примера приведены на рис. 8.

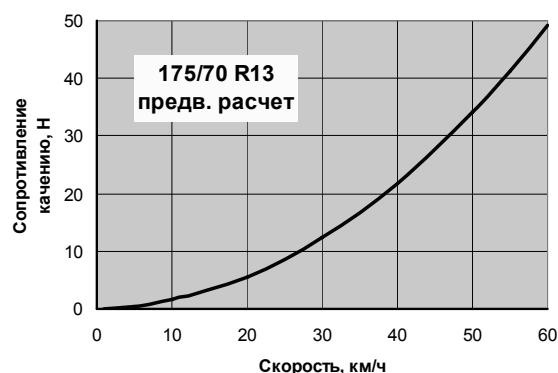


Рис. 8. Расчетная зависимость доли сопротивления качению, создаваемой инерцией в контакте, от скорости

Вероятно, полученные значения завышены: полное сопротивление качению на гладкой дороге при скорости 60 км/ч и нагрузке на шину 3500 Н составляет 40...50 Н. Это можно объяснить принятыми допущениями и примитивностью расчетной модели.

Независимо от нас аналогичное исследование выполнили к.т.н. А.А Ларин и Ю.В. Арефин [8], которые использовали более сложную математическую модель.

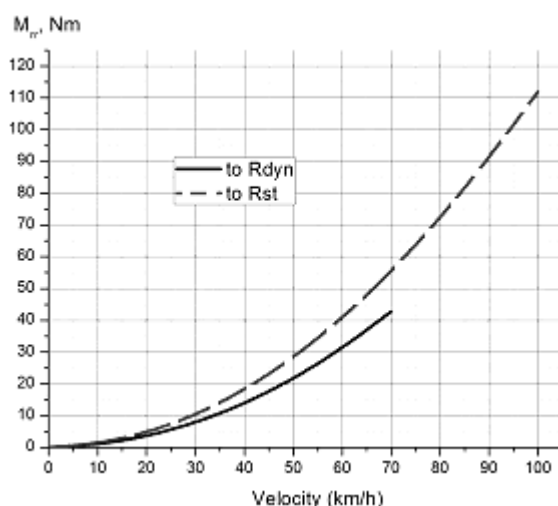


Рис. 9. Расчетная зависимость момента сопротивления качению от скорости [8]

Полученная ими картина (рис. 9) весьма сходна с нашей: так же показывает существенное падение сопротивления качению с уменьшением скорости и так же отличается от экспериментальных зависимостей знаком кривизны.

Эмпирические формулы сил сопротивления движению на малой скорости. Итак, расчеты подтвердили, что сопротивление качению падает с уменьшением скорости, но не дали хорошего приближения к эксперименту. Однако нужды практики заставляют искать способы расчета сопротивлений движению хотя бы на чисто эмпирическом уровне.

Обработывая данные полигонных испытаний по методике [1], построены диаграммы выбега $j(V)$, подобные показанной на рис. 1, а затем пересчитывали их в относительные единицы на участке от 27 км/ч до остановки, получая поправку к коэффициенту сопротивления качению [2]. Усредненные данные по всем 84 автомобилям аппроксимированы полиномом третьей степени (табл. 1, нижняя строка «Все»). В массиве не наблюдалось тенденции к объединению в группы по типу кузова или привода. Однако напрашивалось предположение, что шины кроссоверов и внедорожников могут вести себя иначе, чем шины дорожных легковых автомобилей. Весь массив разделили на эти две группы – кроссоверы и дорожные легковые автомобили (рис. 10).

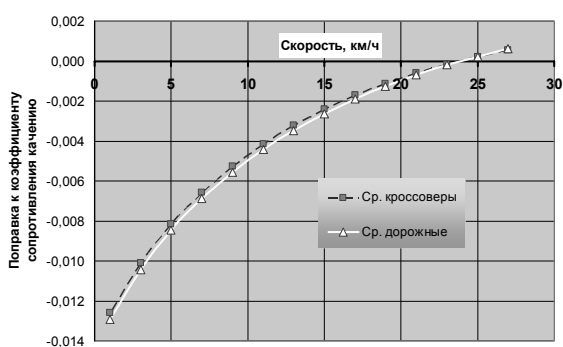


Рис. 10. Сравнение поправок к коэффициенту сопротивления качению для шин дорожных автомобилей и кроссоверов

Существенной разницы между кроссоверами и дорожными автомобилями не выявилось. Видимо, дело в том, что современные кроссоверы используются преимущественно в городе и на дорогах с хорошим покрытием и лишь изредка выезжают на плохую дорогу, поэтому их шины мало отличаются от шин дорожных автомобилей.

Более заметное различие дало деление шин по коэффициенту профильности (табл. 1).

Таблица 1. Формулы для расчета поправки к коэффициенту сопротивления качению при разных коэффициентах профильности шины (КПр)

КПр	Формула аппроксимации средних значений
40	$\Delta f = 8,3777 \cdot 10^{-7} V^3 - 5,4961 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,3969 \cdot 10^{-3} V - 0,013570$
45	$\Delta f = 8,1858 \cdot 10^{-7} V^3 - 5,4766 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,4697 \cdot 10^{-3} V - 0,015217$
50	$\Delta f = 6,4538 \cdot 10^{-7} V^3 - 4,5962 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,3340 \cdot 10^{-3} V - 0,014033$
55	$\Delta f = 5,3018 \cdot 10^{-7} V^3 - 3,9205 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,2148 \cdot 10^{-3} V - 0,013960$
60	$\Delta f = 4,8065 \cdot 10^{-7} V^3 - 3,7010 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,2039 \cdot 10^{-3} V - 0,014048$
65	$\Delta f = 3,4114 \cdot 10^{-7} V^3 - 2,8714 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,0476 \cdot 10^{-3} V - 0,013509$
70	$\Delta f = 3,3771 \cdot 10^{-7} V^3 - 2,8832 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,0792 \cdot 10^{-3} V - 0,014189$
Все	$\Delta f = 6,0376 \cdot 10^{-7} V^3 - 4,3065 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,2691 \cdot 10^{-3} V - 0,014051$

Однако и здесь расхождение между средними значениями для данной группы и средними для всего массива составляет примерно $\pm 0,001$. Поэтому для расчетов сопротивления движению в особенно ответственных случаях, когда нужны наиболее точные данные, следует использовать формулу для соответствующей группы шин (табл. 1). А для менее ответственных расчетов можно пользоваться общей средней зависимостью $\Delta f(V)$.

Надо признать, что даже в пределах одной группы вариация довольно велика – больше $\pm 0,001$ (рис. 11), так что выбор формулы аппроксимации может не дать существенного приближения расчетных значений к экспериментальным.

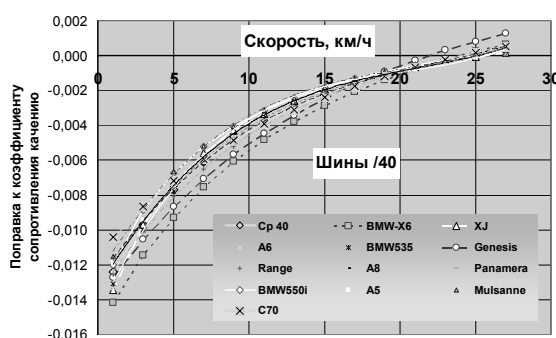


Рис. 11. Вариация диаграмм $\Delta f(V)$ в пределах одной группы шин (коэффициент профильности 40%)

Это не удивительно: шины одной размерности, изготовленные разными фирмами, часто различаются по свойствам очень серьезно. Так, у шин 205/55 R16 V [9] коэффициент сопротивления качению, измеренный на барабанном стенде, варьирует от 0,00969 (Michelin Primacy HP) до 0,01309 (Тоуо Proxes CF1) – расхождение в 1,35 раза.

Тем не менее, при отсутствии экспериментальных данных суммарные сопротивления движению легкового автомобиля на малой скорости ΣS можно рассчитывать по следующей формуле:

$$\Sigma S = 0,5 \cdot 1,07 \rho C_x F v^2 / 3,6^2 + G_a \cdot (f + \Delta f), \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 (в предварительных расчетах – $1,2 \text{ кг/м}^3$); C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления по литературным данным; F – лобовая площадь автомобиля, м^2 (при отсутствии данных можно считать $F=0,83 \cdot H \cdot B$, H , B – высота и ширина автомобиля, м); v – скорость автомобиля, км/ч; 1,07 – коэффициент перехода от аэродинамической трубы к дороге; G_a – вес автомобиля, Н; f – коэффициент сопротивления качению (например, по [1]); Δf – описанная здесь поправка.

Выводы.

1. По данным экспериментов с использованием разных методов измерений надежно установлено, что с уменьшением скорости движения автомобиля по дороге ниже 20 км/ч сопротивления движения резко падают.

2. Падение сопротивлений движению на малых скоростях отмечено у всех изученных автомобилей.

3. Одна из возможных причин этого падения – влияние сил инерции деформируемого в контакте участка шины. Эти силы резко снижаются с уменьшением скорости. Однако вопрос требует дополнительного исследования.

4. Предложены эмпирические формулы, позволяющие приближенно рассчитать силы сопротивления движению легкового автомобиля по его технической характеристике.

Литература

1. Рабинович Э.Х. Расчет коэффициентов сопротивлений движению автомобиля по пути выбега / [Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А.] / Вестник ХНАДУ. — 2009. — Вып. 44. — С.30–34.

2. Сопротивления движению легкового автомобиля при выбеге / [Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А. и др.] / Автомобильный транспорт. — 2010. — вып. 26 — С. 53-58.

3. Возможное влияние колебаний на сопротивление движению легкового автомобиля при выбеге / [Э.Х. Рабинович, А.В. Дитятев, В.П. Волков, Е.А. Белогуров] / Автомобильный транспорт. — Харьков, ХНАДУ. — 2010. — вып. 26. — с. 59-62.

4. Reimpell J. The Automotive Chassis: Engineering Principles / Reimpell J., Stoll H., Betzler J. Translated from the German. Second English Edition. – Butterworth-Heine-mann, 2001. Woburn MA (USA). 444 с.

5. Работа автомобильной шины / [Кнороз В.И., Кленников Е.В., Петров И.П. и др.] под ред. В.И. Кнороза.—М.: Транспорт. — 1976. — 239 с.

6. Определение сопротивлений движению автомобиля Chevrolet Aveo методом выбега / [Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А., Белошицкий В.В.] / Автомобильный транспорт. — 2010.— вып. 28. — с. 18-22.

7. Белогуров Е.А. Динамические методы диагностирования автомобиля в дорожных условиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Белогуров Евгений Александрович. — Харьков, 2011. — 200 с.

8. Ларин А.А., Арефин Ю.В. Исследование деформирования шины при ее стационарном прямолинейном качении по дороге / Вестник ХНАДУ. – 2009. – Вып. 44. – С.30–34.

Мёллер-Зоннтаг Д., Клип Х. Разыскивается лучшая шина на лето / Сравнительный тест: летние шины 205/55 R16 V Autobild Украина №6, 2007.