

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЮ АВТОМОБИЛЯ МЕТОДОМ ДВУКРАТНОГО ВЫБЕГА

**Э.Х. Рабинович, доцент, к.т.н., В.А. Зуев, инженер,
Н.В. Воскобойников, студент, ХНАДУ**

***Аннотация.** Предложено измерить замедление свободного выбега автомобиля с полной и частичной нагрузкой, составить два уравнения (с учетом влияния загрузки) и найти два неизвестных – сопротивление качению и сопротивление воздуха.*

***Ключевые слова:** выбег двукратный, загрузка, сопротивление качению, сопротивление воздуха.*

Введение

Для решения ряда задач теории автомобиля надо знать силы сопротивления качению и сопротивления воздуха. Первое измеряют на стендах с беговыми барабанами большого диаметра, второе – в аэродинамических трубах. Эти дорогие методы точны, но они лишь имитируют реальное движение. На дороге сумму сопротивлений находят, например, по выбегу, но разделить их трудно. Известные методы требуют специального оборудования, сложны и трудоемки. А практика работы автотранспорта требует быстрого и простого определения сопротивлений, например, для расчета маршрутных, сезонных и т.п. норм расхода топлива. Привлекательно выглядит метод, использующий замедление свободного выбега в двух весовых состояниях автомобиля [1]. Он прост, не требует сложного оборудования и пригоден для всех реальных скоростей (в отличие, например, от метода однократного выбега, описанного в [2]). Цель настоящего исследования – проверить надежность этого метода и его доступность для рядового водителя.

Суть проверяемого метода

На интересующем исследователя участке дороги выполняют два выбега – с максимальной и с минимальной загрузкой нужного автомобиля (с массами m_1 и m_2). Регистрируют время падения скорости от одной оцифрованной точки на спидометре до дру-

гой. Для нужной средней скорости v (в м/с) составляют два уравнения с двумя неизвестными – коэффициентом суммарного дорожного сопротивления ψ и фактором обтекаемости kF ($k = \rho \cdot C_x / 2$, где ρ – плотность воздуха, кг/м³; $\rho = p / RT$, где p – атмосферное давление, Па; R – газовая постоянная, 287,14 м²/с²·К для воздуха; T – температура, К; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления; F – лобовая площадь автомобиля, м²); g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с²:

$$\begin{cases} m_1 \cdot g \cdot \psi + kF \cdot v^2 = m_1 \cdot j_1; \\ m_2 \cdot g \cdot \psi + kF \cdot v^2 = m_2 \cdot j_2, \end{cases} \quad (1)$$

Если допустить, что ψ и kF в обоих вариантах загрузки одинаковы, то

$$\begin{cases} m_1 \cdot g \cdot \psi + kF \cdot v^2 = m_1 \cdot j_1; \\ m_2 \cdot g \cdot \psi + kF \cdot v^2 = m_2 \cdot j_2, \end{cases}$$

$$\psi = \frac{m_1 \cdot j_1 - m_2 \cdot j_2}{(m_1 - m_2)g};$$

$$kF = \frac{m_1 \cdot m_2 \cdot (j_1 - j_2)}{v^2 \cdot (m_2 - m_1)}; \text{ или}$$

$$C_x = \frac{2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot (j_1 - j_2)}{\rho \cdot F \cdot v^2 \cdot (m_2 - m_1)}. \quad (2)$$

Заметим, что в рассматриваемых уравнениях сила сопротивления воздуха фактически включает в себя и потери холостого хода трансмиссии, которые не зависят от загрузки автомобиля, пропорциональны квадрату скорости и в общем невелики: порядка 30 Н при скорости 90 км/ч [1].

Экспериментальная проверка

Весной 2005 г. студент Воскобойников Н.В. провел эксперимент на автомобиле АЗЛК-2141 (табл. 1). Замеры выполнены на дороге с асфальтобетонным покрытием в хорошем состоянии, в безветренную погоду при температуре 10 °С и атмосферном давлении 750 мм рт. ст. Расчет по формулам (2) дал неудовлетворительные результаты, особенно по C_x . После этого мы отвергли допущение о независимости коэффициентов сопротивлений от загрузки.

Для легковых радиальных шин с металлокордом при неполной нагрузке на шину коэффициент сопротивления качению f меньше, чем приводимый в литературе коэффициент при полной нагрузке f [3]

$$f' = f \cdot \left(1,3 - 0,3 \cdot G_{\max} / G_{\text{факт}}\right) = f \cdot K_n, \quad (3)$$

где G_{\max} , $G_{\text{факт}}$ – соответственно максимально допустимая и фактическая нагрузка на шину, кг (при текстильном корде коэффициенты выражения в скобках 1,5 и 0,5 соответственно; для некоторых грузовых шин, по данным [1], 1,2 и 0,2).

Наш автомобиль имел шины 175/80 R14, допускающие при давлении 0,2 МПа нагрузку 485 кг, т.е. 970 кг на ось. При частичной загрузке автомобиля масса, приходящаяся на переднюю ось, составляла 735 кг, на заднюю – 485 кг; при полной – соответственно 790 и 705 кг.

Для частично загруженного автомобиля

$$K_{\text{н.пер.ч}} = 1,3 - 0,3 \cdot \frac{970}{735} = 0,904;$$

$$K_{\text{н.задн.ч}} = 1,3 - 0,3 \cdot \frac{970}{485} = 0,7;$$

$$K_{\text{н.ч}} = \frac{0,904 \cdot 735 + 0,7 \cdot 485}{1220} = 0,8229.$$

Для полностью загруженного автомобиля

$$K_{\text{н.пер.п}} = 1,3 - 0,3 \cdot \frac{970}{790} = 0,932;$$

$$K_{\text{н.задн.п}} = 1,3 - 0,3 \cdot \frac{970}{705} = 0,887;$$

$$K_{\text{н.п}} = \frac{0,932 \cdot 790 + 0,887 \cdot 705}{1495} = 0,9108.$$

Будем считать, что на гладкой дороге ψ зависит от нагрузки на шину так же, как f . Тогда система уравнений (1) принимает вид

$$\begin{cases} m_1 \cdot g \cdot K_{\text{н.п}} \cdot \psi + kF \cdot v^2 = m_1 \cdot j_1; \\ m_2 \cdot g \cdot K_{\text{н.ч}} \cdot \psi + kF \cdot v^2 = m_2 \cdot j_2, \end{cases} \quad (4)$$

Откуда

$$\psi = \frac{m_1 \cdot j_1 - m_2 \cdot j_2}{g \cdot (m_1 \cdot K_{\text{н.п}} - m_2 \cdot K_{\text{н.ч}})}$$

$$C_x \approx \frac{2m_1 \cdot m_2 \cdot (j_1 \cdot K_{\text{н.ч}} - j_2 \cdot K_{\text{н.п}})}{\rho \cdot F \cdot v^2 \cdot (m_2 \cdot K_{\text{н.ч}} - m_1 \cdot K_{\text{н.п}})}. \quad (5)$$

Подсчитанные по этим формулам значения ψ уже более реальны (табл. 1), но значения C_x заметно меньше того, что приводится в литературе – 0,44 в стандартном исполнении [4].

Известно, что C_x зависит от клиренса и наклона кузова (рис. 1 [5]). У нас полностью загруженный автомобиль имел наклон вперед $\alpha = -0,64^\circ$, частично загруженный $-1,27^\circ$. Клиренс вблизи переднего колеса при загрузке уменьшился на 0,01 м, вблизи заднего – на 0,03 м, т.е. в среднем на 0,02 м (рис. 2). Если принять зависимость C_x от клиренса по кривой 5, то можно записать $C_{xe} \approx C_x \cdot E_e$; $E_e \approx 1 - 1,7\Delta e$, где Δe – изменение клиренса в м; влияние наклона можно принять по линейной части кривых 1 и 2: $C_{x\alpha} \approx C_x \cdot E_\alpha$; $E_\alpha \approx 1 - 0,04\alpha$. Совместное влияние клиренса и наклона учтем коэффициентом $E = E_\alpha + E_e$. Тогда система уравнений (4) примет вид

$$\begin{cases} m_1 \cdot g \cdot K_{\text{н.п}} \cdot \psi + kF \cdot v^2 = m_1 \cdot j_1; \\ m_2 \cdot g \cdot K_{\text{н.ч}} \cdot \psi + kF \cdot E \cdot v^2 = m_2 \cdot j_2, \end{cases} \quad (6)$$

откуда

$$\psi = \frac{E \cdot m_1 \cdot j_1 - m_2 \cdot j_2}{g \cdot (E \cdot m_1 \cdot K_{н.п} - m_2 \cdot K_{н.ч})} \quad \text{и}$$

$$C_x \approx \frac{2m_1 \cdot m_2 \cdot (j_1 \cdot K_{н.ч} - j_2 \cdot K_{н.п})}{\rho \cdot F \cdot v^2 (m_2 \cdot K_{н.ч} - E \cdot m_1 \cdot K_{н.п})} \quad (7)$$

При изменении клиренса на 0,02 м и угла наклона на $1,27^\circ - 0,64^\circ = 0,63^\circ$ коэффициент снижения сопротивления воздуха

$$E \approx (1 - 0,04 \cdot 0,63) \cdot (1 - 1,7 \cdot 0,02) = 0,975 \cdot 0,966 = 0,94.$$

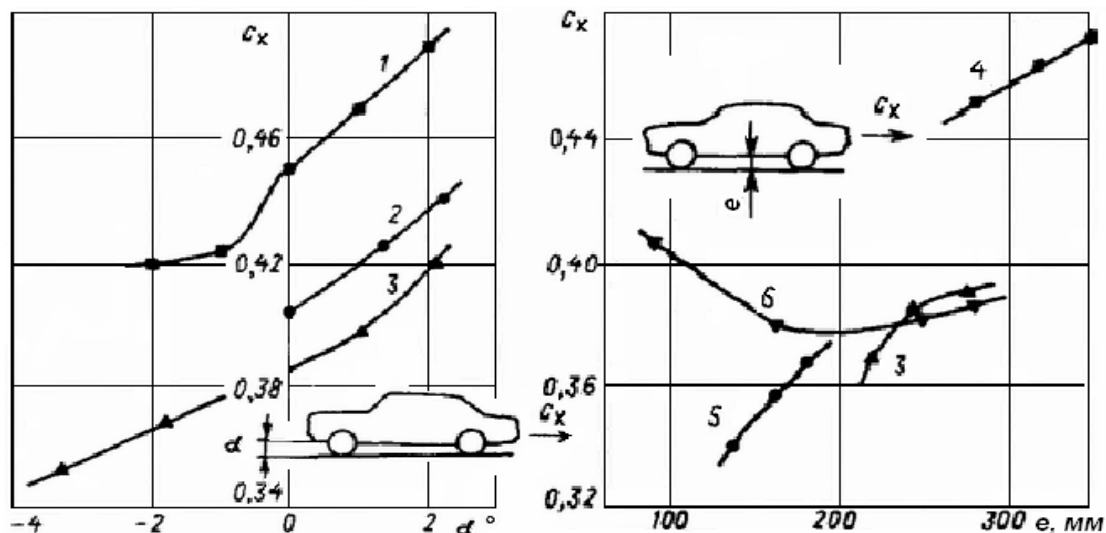


Рис. 1. Влияние угла наклона кузова α и клиренса автомобиля e на коэффициент аэродинамического сопротивления C_x [5]: 1 – «Фольксваген», вариант 411; 2 – «Ауди-100»; 3 – рекордный автомобиль «F2-2»; 4 – автомобиль-фургон «Фольксваген»; 5 – «Фольксваген-Порше-914»; 6 – «Ситроен ID19»

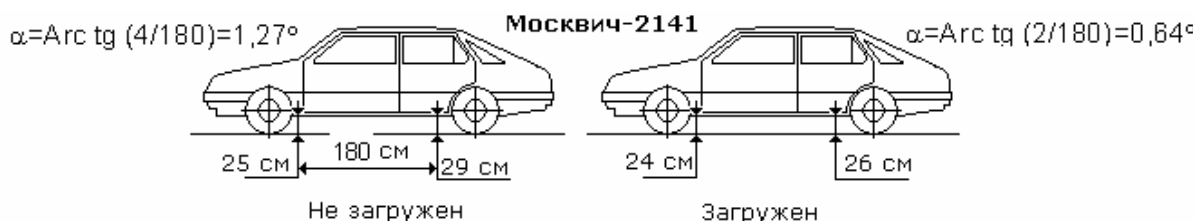


Рис. 2. Изменение положения кузова при загрузке автомобиля

Таблица 1 Результаты эксперимента на автомобиле АЗЛК-2141 и расчетов

Диапазон скоростей, км/ч	100-90	70-60	Расчет по формулам (5)	
Средняя скорость, км/ч	95	65	К-т снижения сопротивления качению	$K_{н.п} = 0,9108$
Выбег с полной нагрузкой ($m_1 = 1495$ кг)				$K_{н.ч} = 0,8229$
Время, с	7,53	11,61	ψ	0,020189 0,015637
Замедление, м/с ²	0,36889	0,23926	C_x	0,348718 0,393363
Выбег с частичной нагрузкой ($m_1 = 1220$ кг)			Расчет по формулам (7)	
Время, с	7,05	11,19	К-т снижения сопротивления воздуха	$E = 0,94$
Замедление, м/с ²	0,39401	0,24824		
Расчет по формулам (2)			ψ	0,013939 0,012336
ψ	0,026246	0,020328	C_x	0,452002 0,509871
C_x	0,21128	0,16136	C_x среднее	0,480936

Для приведения к дорожным условиям результатов продувки легковых автомобилей в аэродинамической трубе рекомендуют умножать их на 1,05 – 1,1 [1]: $0,44 \cdot (1,05 - 1,1) = 0,462 - 0,484$. Полученное нами среднее значение $C_x = 0,4809$ лежит в границах этого диапазона.

Расчетные значения ψ вполне укладываются в поле вариации коэффициента сопротивления качению для современных радиальных шин (рис. 3 [2]).

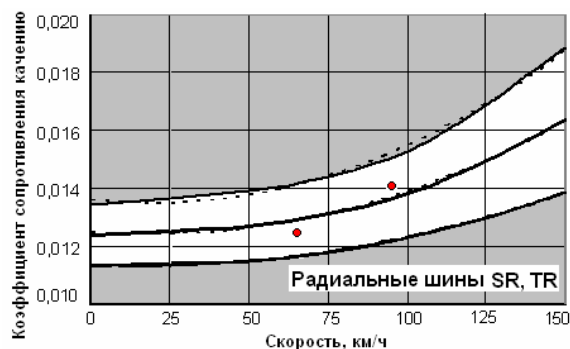


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления качению радиальных легковых шин от скорости. Точками выделены результаты расчета по формулам (7)

Выводы и рекомендации

Проверенный метод определения сопротивлений движению автомобиля по результатам двукратного выбега дает результаты, хорошо согласующиеся с опубликованными данными, полученными более сложными методами. Эксперимент вполне доступен рядовому водителю, обработку его результатов по приведенным здесь сведениям может выполнить любой инженер или техник.

При пользовании этим методом рекомендуется предварительно проверить показания спидометра (хотя бы по километровым столбам) и взвесить автомобиль при частичной и полной загрузке. Поскольку эксперименты проводятся на обычной дороге общего пользования (например, той, для которой будет

вычисляться маршрутная норма расхода топлива), обязательно проводить замеры в прямом и обратном направлениях (чтобы учесть влияние уклонов и ветра) по несколько раз.

Следует отметить, что рассмотренный здесь метод, как и предложенное нами усовершенствование известного метода определения сопротивлений по замедлению однократного выбега [2], весьма чувствителен к погрешностям измерения времени. В настоящее время мы ищем пути повышения точности этих измерений без использования сложных приборов. В частности, мы пробуем применить видеозапись движения стрелки спидометра с последующим пок кадровым просмотром и обработкой на компьютере. Это вполне выполнимо с использованием бытовой техники, например, видеокамер, цифровых фотоаппаратов с функцией видеозаписи или мобильных телефонов с такой же функцией и бытовых ПЭВМ.

Литература

1. Петрушов В.А., Московкин В.В., Евграфов А.Н. Мощностной баланс автомобиля. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
2. BOSCH. Автомобильный справочник: Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.
3. Раймпель Й. Шасси автомобиля. Амортизаторы, шины и колеса. – М.: Машиностроение, 1986.–320 с., ил.
4. Растегаев О. Ветер, ветер, ты могуч! // Авторевю. – 1998. – № 6. – С. 16 – 23.
5. Аэродинамика автомобиля / Под ред. В.-Г. Гухо; Пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 15 октября 2007 г.