

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПО ВЫБЕГУ АВТОМОБИЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЕТРА

**В.П. Волков, профессор, д.т.н., Э.Х. Рабинович, доцент, к.т.н.,
Е.А. Белогуров, аспирант, С.С. Полевой, В.А. Павлов, студенты,
ХНАДУ**

***Аннотация.** Выведены и подтверждены экспериментально зависимости для расчета скорости ветра и коэффициентов сопротивлений воздуха и качению по результатам выбега автомобиля.*

***Ключевые слова:** выбег, сопротивление качению, сопротивление воздуха, ветер.*

Введение

Сумму сопротивлений движению автомобиля определяют по замедлению его выбега. Простейший путь разделения сопротивлений таков: по замедлению выбега на малой скорости, когда сопротивление воздуха можно считать нулевым, вычислить коэффициент суммарного дорожного сопротивления ψ (на горизонтальной гладкой дороге равен коэффициенту сопротивления качению f), а потом подставить его в уравнение для большей скорости и рассчитать коэффициент аэродинамического сопротивления C_x , принимая, что с увеличением скорости коэффициенты ψ и f не меняются [1]. Слабые места этого подхода – допущения, что на малой скорости сопротивление воздуха пренебрежимо мало и что коэффициент ψ не зависит от скорости. Первый недостаток легко преодолеть, если принять хотя бы приблизительное значение C_x , вычислить соответствующее сопротивление воздуха и отнять от суммарного сопротивления на малой скорости.

Более точный метод описан в [2]. Там тоже принимают допущение о постоянстве ψ , но ограничивают применимость метода скоростями не более 100 км/ч. В работе [3] введен коэффициент K_V , который характеризует ожидаемое возрастание ψ от ψ_2 на малой скорости v_2 до ψ_1 на большей скорости v_1 и таким образом позволяет расширить диапазон тестовых скоростей.

Но все эти методы ограничены требованием проводить испытание лишь в безветренную погоду. При ветре выбег в разные стороны дает разные замедления, и потому невозможно получить однозначное решение. Заезды в противоположные стороны могут компенсировать уклоны дороги, но не ветер – ведь сопротивление воздуха пропорционально не первой степени, а квадрату скорости. Так, например, если автомобиль движется со скоростью 90 км/ч, а скорость ветра всего 5,5 м/с, т.е. 20 км/ч, то скорость воздушного потока относительно автомобиля в одну сторону составит 110 км/ч, а в противоположную – 70 км/ч. Сила сопротивления воздуха против ветра будет больше, чем по ветру, в $(110/70)^2 = 2,5$ раза [4].

Решение задачи при наличии ветра

Как в [3], составим два уравнения: для выбегов туда и обратно с одинаковой скоростью v_1 (м/с) при наличии ветра с неизвестной скоростью v_w . В двух выбегах будет разное замедление – j_1 и j_2 (м/с²). Тогда:

$$\begin{cases} m \cdot g \cdot K_V \cdot \psi_2 + kF \cdot (v_1 + v_w)^2 = \beta \cdot m \cdot j_1; \\ m \cdot g \cdot K_V \cdot \psi_2 + kF \cdot (v_1 - v_w)^2 = \beta \cdot m \cdot j_2, \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса автомобиля, кг; kF – фактор обтекаемости; β – коэффициент учета вращающихся масс автомобиля.

Выполним очевидные преобразования:

$$\begin{cases} kF \cdot (v_1 + v_g)^2 = \beta \cdot m \cdot j_1 - m \cdot g \cdot K_V \cdot \psi_2; \\ kF \cdot (v_1 - v_g)^2 = \beta \cdot m \cdot j_2 - m \cdot g \cdot K_V \cdot \psi_2; \\ (v_1 + v_g)^2 = m \cdot (\beta \cdot j_1 - g \cdot K_V \cdot \psi_2) / kF; \\ (v_1 - v_g)^2 = m \cdot (\beta \cdot j_2 - g \cdot K_V \cdot \psi_2) / kF. \end{cases}$$

Возводим в квадрат левые части и вычитаем:

$$\begin{cases} v_1^2 + 2v_1 v_g + v_g^2 = m \cdot (\beta \cdot j_1 - g \cdot K_V \cdot \psi_2) / kF; \\ v_1^2 - 2v_1 v_g + v_g^2 = m \cdot (\beta \cdot j_2 - g \cdot K_V \cdot \psi_2) / kF. \end{cases}$$

$$4v_1 v_g = m \cdot \frac{(\beta \cdot j_1 - \beta \cdot j_2 - g \cdot K_V \cdot \psi_2 + g \cdot K_V \cdot \psi_2)}{kF};$$

$$v_g = \frac{m \cdot \beta \cdot (j_1 - j_2)}{4kF \cdot v_1}, \text{ м/с.} \quad (2)$$

Возвращаемся к исходному уравнению движения против ветра:

$$\begin{aligned} m \cdot g \cdot K_V \cdot \psi_2 + kF \cdot (v_1 + v_g)^2 &= \beta \cdot m \cdot j_1; \\ kF \cdot (v_1 + v_g)^2 &= \beta \cdot m \cdot j_1 - m \cdot g \cdot K_V \cdot \psi_2 = \\ &= m \cdot (\beta \cdot j_1 - g \cdot K_V \cdot \psi_2); \\ k &= 0,5 \cdot \rho \cdot C_x = \frac{m \cdot (\beta \cdot j_1 - g \cdot K_V \cdot \psi_2)}{F \cdot (v_1 + v_g)^2}, \end{aligned}$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³.

$$C_x = \frac{2 \cdot m \cdot (\beta \cdot j_1 - g \cdot K_V \cdot \psi_2)}{\rho \cdot F \cdot (v_1 + v_g)^2}. \quad (3)$$

Для выбега по ветру:

$$C_x = \frac{2 \cdot m \cdot (\beta \cdot j_2 - g \cdot K_V \cdot \psi_2)}{\rho \cdot F \cdot (v_1 - v_g)^2}. \quad (4)$$

Коэффициент C_x лучше вычислять по замедлению при высокой скорости, когда сила сопротивления воздуха проявляется сильнее, – тогда неточности измерений будут влиять меньше. Нужно помнить, что неизвестное значение C_x неявно входит в формулу скорости ветра и в вычисление ψ_2 . Поэтому расчет надо выполнять в несколько итераций, постепенно приближаясь к точному ответу.

Определение коэффициентов сопротивлений для автомобиля «Москвич-2140»

Результаты эксперимента С. Полевого 16.09.2008: интервал скорости по спидометру

100...90 км/ч (по результатам проверки спидометра с помощью GPS – 88...79,2 км/ч), средняя скорость $v_1 = 83,6$ км/ч = 23,22 м/с. В 9 заездах среднее время выбега по ветру составило 6,6 с, против ветра – 5,5 с (рис. 1).

Соответствующие замедления

$$j_1 = \frac{88 - 79,2}{3,6 \cdot 5,5} = 0,44444 \text{ м/с}^2;$$

$$j_2 = \frac{88 - 79,2}{3,6 \cdot 6,6} = 0,37037 \text{ м/с}^2.$$

На малых скоростях, от 30 до 20 км/ч (от 26,4 до 17,6, средняя 22 км/ч = 6,111 м/с), среднее время выбега в двух направлениях составило 80,8 – 65,5 = 15,3 с, замедление

$$\begin{aligned} j_{30-20} &= (26,4 - 17,6) / (3,6 \cdot 15,3) = \\ &= 0,1598 \approx 0,16 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

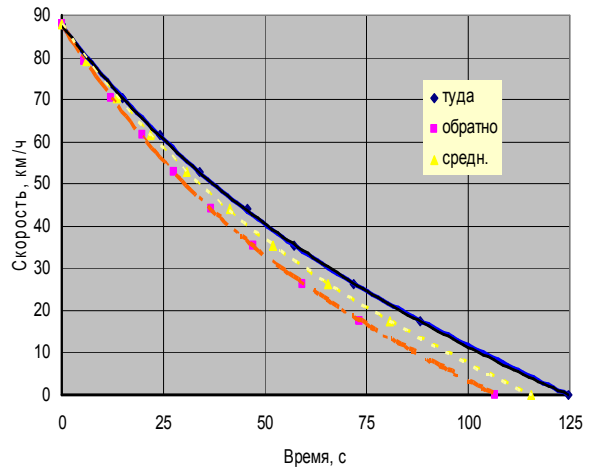


Рис. 1. Выбег автомобиля «Москвич-2140»

Масса автомобиля с водителем и пассажирами в этом эксперименте составляла 1395 кг, приведенная масса четырех колес $7,81 \times 4 = 31,2$ кг, трансмиссии – 4,70 кг. Суммарная приведенная масса 1431 кг, коэффициент учета вращающихся масс при выбеге $\beta = 1,0258$.

Сумма сопротивлений на малых скоростях:

$$P_w + P_\psi = j \cdot m_{np} = 0,16 \cdot 1431 = 228,96 \text{ Н.}$$

Погодные условия: $t=10^\circ\text{C}$, $p=750$ мм рт. ст., относительная влажность $H=81\%$. Плотность воздуха по формуле Международного бюро мер и весов

$$\rho_B = \frac{0,464554 \cdot p - H \cdot (0,00252 \cdot t - 0,020582)}{273,15 + t} =$$

$$= \frac{0,464554 \cdot 750 - 81 \cdot (0,00252 \cdot 10 - 0,020582)}{273,15 + 10} =$$

$$= 1,2292 \text{ кг/м}^3.$$

На дороге коэффициент аэродинамического сопротивления «Москвич-2140» $C_x = 0,56$ [5], лобовая площадь по нашей оценке $F = 1,9 \text{ м}^2$.

Фактор обтекаемости

$$kF = 0,5 \cdot \rho_B \cdot C_x \cdot F =$$

$$= 0,5 \cdot 1,2292 \cdot 0,56 \cdot 1,9 = 0,6539.$$

Сила сопротивления воздуха на малой скорости будет

$$P_w = 0,6539 \cdot 6,111^2 = 24,42 \text{ Н.}$$

На долю дорожного сопротивления (вместе с потерями в трансмиссии) остается

$$P_\psi = 228,96 - 24,42 = 204,54 \text{ Н.}$$

Соответствующий коэффициент суммарного дорожного сопротивления

$$\psi = P_\psi / G_a = 204,54 / (1395 \cdot 9,81) = 0,01495.$$

Скорость ветра:

$$v_e = \frac{m \cdot \beta \cdot (j_1 - j_2)}{4kF \cdot v_1} =$$

$$= \frac{1395 \cdot 1,0258 \cdot (0,44444 - 0,37037)}{4 \cdot 0,6539 \cdot 23,22} =$$

$$= 1,7451 \text{ м/с.}$$

Вычислим K_V – коэффициент, характеризующий изменение сопротивления качению при переходе от малой скорости к большой (коэффициенты A , B и C – по табл. 1):

$$K_V = \frac{A \cdot v_1^2 - B \cdot v_1 + C}{A \cdot v_2^2 - B \cdot v_2 + C}; \quad (5)$$

По верхней линии поля возможных значений f для шин SR, TR при $v_1 = 83,6 \text{ км/ч}$, $v_2 = 22 \text{ км/ч}$ (23,22 и 6,11 м/с) найдем $K_V = 1,0929$.

Таблица 1 Функции аппроксимации зависимости коэффициента сопротивления качению f от скорости в км/ч [2, 3]

Шины		$f = Av^2 - Bv + C$		
		$A \cdot 10^{-7}$	$B \cdot 10^{-3}$	$C \cdot 10^{-3}$
HR – ZRT	верх.	0,6762	-1,5214	14,010
	ср.	0,9619	-0,6057	13,261
	нижн.	1,2476	0,3071	12,510
SR, TR	верх.	3,1124	1,2543	13,601
	ср.	2,2571	0,8471	12,467
	нижн.	1,4019	0,4400	11,334

C_x по результатам выбега против ветра

$$C_x = \frac{2 \cdot 1395 \cdot (1,0258 \cdot 0,44444 - 9,81 \cdot 1,0929 \cdot 0,01495)}{1,2292 \cdot 1,9 \cdot (23,22 + 1,7451)^2} = 0,5667;$$

то же по ветру

$$C_x = \frac{2 \cdot 1395 \cdot (1,0258 \cdot 0,37037 - 9,81 \cdot 1,0929 \cdot 0,01495)}{1,2292 \cdot 1,9 \cdot (23,22 - 1,7451)^2} = 0,5691$$

Среднее значение $C_x = 0,5679$. Откорректировав расчеты по этому значению, получим скорость ветра 1,7241 м/с, C_x по выбегу против ветра 0,5683, по ветру – 0,5685. Отметим, что, по данным сайта Gismeteo.ua, где приводится скорость ветра, округленная до целого числа, она в то время составляла 2 м/с.

Дальнейшие итерации не нужны. Среднее значение $C_x = 0,5684$ близко к полученному в аэродинамической трубе значению, увеличенному на 10% для приведения к дорожным условиям, т.е. $C_x = 0,5 \cdot 1,1 = 0,55$. Еще ближе к значению $C_x = 0,56$, полученному методом дорожных испытаний в закрытом аэродинамическом канале [5].

Определение коэффициентов сопротивлений для автомобиля Škoda Fabia

Данные эксперимента В. Павлова, выполненного 26.08.08 на той же дороге.

Масса автомобиля с участниками эксперимента 1378 кг, сумма приведенных масс колес и трансмиссии 36 кг. Коэффициент учета вращающихся масс при выбеге $\beta = 1,0261$. Шины HR. На дороге $C_x = 0,35 \cdot 1,1 = 0,385$, лобовая площадь $F = 2,08 \text{ м}^2$ [6]. Погодные условия (архив Meteorprog.ua): $t = 24^\circ\text{C}$, $p = 747 \text{ мм рт. ст.}$, относительная влажность $H = 81\%$. Плотность воздуха $1,1648 \text{ кг/м}^3$. Ветер западный, от 1 до 4 м/с.

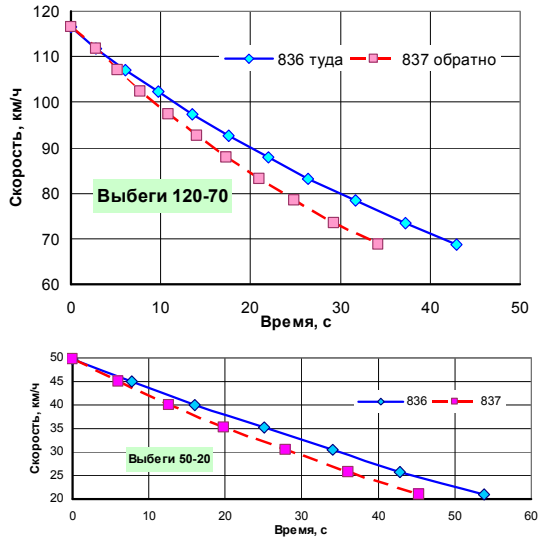


Рис. 2. Выбег автомобиля Škoda Fabia

На скорости 22,49 км/ч среднее замедление $0,1326 \text{ м/с}^2$, соответственно $\psi=0,0125$.

В таблице 2 сведены измеренные в эксперименте значения скорости V_1 в км/ч, замедлений выбега против ветра j_1 и по ветру j_2 , м/с^2 , и вычисленные по описанной методике значения коэффициента аэродинамического сопротивления C_x и коэффициента сопротивления качению f .

Средняя расчетная скорость ветра $2,54 \text{ м/с} = 9,1 \text{ км/ч}$, средние значения коэффициентов сопротивлений: $C_{x \text{ ср}} = 0,3996$, $f_{\text{ср}} = 0,01244$.

Следует учитывать, что мы испытывали автомобиль украинской сборки, адаптированный к нашим условиям, в частности, с увеличенным клиренсом – с 0,14 до 0,16 м. Увеличение клиренса повышает C_x – рис. 3.

Таблица 2

V_1	j_1 j_2	K_v	V_v	C_x	f
112,42	0,5169	1,0990	2,7748	0,3892	0,01251
	0,4014				
105,44	0,4835	1,0855	2,5728	0,4053	0,01231
	0,3756				
98,9	0,4494	1,0738	2,5321	0,4174	0,01241
	0,3499				
77,42	0,3123	1,0413	2,2964	0,3867	0,01252
	0,2469				

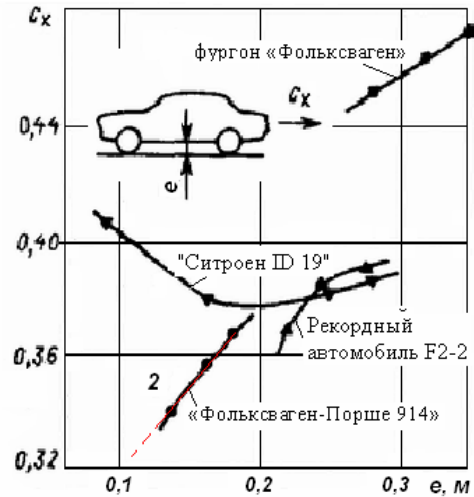


Рис. 3. Влияние клиренса e на коэффициент аэродинамического сопротивления C_x [7]
Из приведенных на рис. 3 кривых ближе всего к нашему случаю график 2, который можно приблизительно описать выражением

$$C_x = C_{x0} (1 + 1,7 \cdot \delta e), \quad (5)$$

где C_{x0} – значение C_x при номинальном клиренсе, δe – изменение клиренса по сравнению с номинальным, m (с учетом знака).

В нашем случае

$$C_x = 0,35 \cdot 1,1 \cdot (1 + 1,7 \cdot 0,02) = 0,3981,$$

что достаточно близко к нашему результату 0,3996. Выполненная нами по методике [3] обработка значений пути выбега, полученных при испытаниях автомобиля Škoda Fabia на автополигоне [8], дала также близкое значение 0,3928.

Нужно сказать, что расчет по усредненным значениям замедления, без поправки на ветер, дал для этих двух автомобилей значения $C_x = 0,5718$ и $0,3915$. Расхождения невелики: 0,6 и 2,1% соответственно. Однако и скорость ветра в наших экспериментах была довольно мала – 6,2 и 9,1 км/ч. Мы планируем повторить измерения при более сильном ветре и на других автомобилях, но тоже таких, для которых есть надежные данные по аэродинамическим свойствам.

Мы считаем, что в целом экспериментальная проверка подтвердила правильность предложенной методики.

Литература

1. Канунников С. Литры на ветер // За рулем, № 9, 2000.
2. BOSCH. Автомобильный справочник: Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.: ил.
3. Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А. Определение сопротивлений движению

по выбегу автомобиля // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, № 7 (125), частина 2. Луганськ, 2008, с. 22-25.

4. Слесарев В. Соперник ветра: урок аэродинамики // За рулем, №1, 2004, с. 94-97.

5. Петрушов В.А. Оценка аэродинамических качеств и сопротивлений качению автомобиля в дорожных условиях // Автомобильная промышленность, 1985, № 11. с. 14.

6. Отвечают специалисты ВАЗа, ГАЗа // За рулем, №11, 2003.

7. Аэродинамика автомобиля. /Под ред. В.-Г. Гухо; пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с., ил.

8. Диваков А., Кадаков М. Polo-position // Авторевю, 2002, № 10, с. 25.

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

Статья поступила в редакцию 6 июня 2009 г.