

УДК 625.032.821

РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПО ВЫБЕГУ

Э.Х. Рабинович, доцент, к.т.н., В.П. Волков, профессор, д.т.н.,
Е.А. Белогуров, аспирант, магистр, А.Н. Радаев, студент, ХНАДУ

Аннотация. Сопоставлены два метода расчета коэффициента аэродинамического сопротивления C_x по замедлению выбега – известный и предложенный авторами. Критерий оценки – отношение рассчитанного по выбегу C_x к объявленному изготовителем. Новый метод несколько точнее и не имеет ограничений по скорости. Полученные средние значения критерия оценки 1,16...1,20 намного выше, чем приводимые в литературе 1,05...1,10.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, автомобиль, коэффициент аэродинамического сопротивления, замедление выбега.

РОЗРАХУНОК АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ АВТОМОБІЛЯ ЗА ВИБІГОМ

Е.Х. Рабінович, доцент, к.т.н., В.П. Волков, профессор, д.т.н.,
Є.О. Білогуров, аспірант, магістр, А.М. Радаєв, студент, ХНАДУ

Анотація. Зіставлено два методи розрахунку коефіцієнта аеродинамічного опору C_x за уповільненням вибігу – відомий і запропонований авторами. Критерій оцінки – відношення розрахованого за вибігом C_x до оголошеного виготовлювачем. Новий метод трохи точніше й не має обмежень у швидкості. Отримані середні значення критерію оцінки 1,16...1,20 набагато вище, ніж приводять у літературі 1,05...1,10.

Ключові слова: аеродинамічний опір, автомобіль, коефіцієнт аеродинамічного опору, уповільнення вибігу.

DETERMINATION OF AIR RESISTANCE ACCORDING TO VEHICLE'S RUNNING-DOWN

E. Rabinovich, Candidate of Technical Science, V. Volkov, Professor, Doctor of
Technical Science, E. Belogurov, postgraduat, master, A. Radayev, student, KhNAHU

Abstract. Two methods of calculating the vehicle's drag coefficient C_x according to the road deceleration value, according to the road deceleration value known and suggested by the authors, are compared. Evaluation criteria – the ratio of the calculated C_x to the declared by the manufacturer. The new method is somewhat more accurate and has no speed limit. The obtained average evaluation criterion 1,16...1,20 is much higher than cited in the literature of 1,05...1,10.

Key words: aerodynamic resistance, car, coefficient of aerodynamic resistance-ray, slow rundown.

Введение

Прошедшее десятилетие после подписания Киотского протокола ознаменовалось для автомобильного мира интенсивной борьбой за снижение выброса парниковых газов. Направления поисков – совершенствование си-

ловых агрегатов, широкое использование гибридных приводов, снижение сопротивления качению шин, улучшение аэродинамических свойств автомобиля. Последнее достигается широким использованием аэродинамических труб при доводке форм автомобиля, компьютерным моделированием

ем, массовым применением щитов-обтекателей на днище автомобиля. Если, например, двадцать лет назад легковые автомобили имели C_x в среднем 0,31–0,33, то сейчас средние значения уменьшились до 0,27–0,29 и все больше появляется новых моделей с объявленными значениями 0,25–0,26. Эти значения получают продувкой в аэродинамических трубах. На дороге сопротивление воздуха больше на 5–10% [1] – в основном из-за того, что в автомобильной трубе машина стоит на полу и поток воздуха почти не принакает под днище. Встречаются, однако, и более заметные расхождения, например 13–15%.

Для специалистов, выполняющих практические расчеты, например, обосновывающих нормы расхода топлива, желательно иметь более надежные соотношения.

Анализ публикаций

На дороге сопротивления определяют методом выбега [2]. Выполняют свободный выбег автомобиля массой m и лобовой площадью F , измеряют замедления j_1 и j_2 при высокой v_1 и низкой скорости v_2 (в км/ч), по ним вычисляют коэффициент аэродинамического сопротивления C_x и коэффициент суммарного дорожного сопротивления ψ :

$$C_x = \frac{6m \cdot (j_1 - j_2)}{F \cdot (v_1^2 - v_2^2)},$$

$$\psi = \frac{28,3 \cdot (j_2 \cdot v_1^2 - j_1 \cdot v_2^2)}{(v_1^2 - v_2^2) \cdot 10^3}. \quad (1)$$

Метод рекомендован для скоростей до 100 км/ч, при которых можно считать сопротивление качению постоянным. Мы предложили ввести коэффициент ожидаемого изменения сопротивления качению при переходе от меньшей скорости к большей K_V [3], а также учитывать реальную плотность воздуха ρ и коэффициент учета вращающихся масс β ; в формулах (2) скорость в м/с, замедление в м/с²:

$$C_x = \frac{2 \cdot \beta \cdot m \cdot (j_1 - j_2 \cdot K_V)}{F \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2 \cdot K_V)},$$

$$\psi = \frac{\beta \cdot (j_2 \cdot v_1^2 - j_1 \cdot v_2^2)}{(v_1^2 - v_2^2 \cdot K_V) \cdot 9,81}. \quad (2)$$

Это позволило расширить диапазон скоростей испытаний за 100 км/ч. Далее были предложены приемы расчета этих показателей по пути выбега [3], что дало возможность использовать результаты полигонных испытаний, проводимых экспертами автомобильных журналов. Журнал «За рулем» публикует значения пути выбега от 120 до 50 км/ч и от 50 км/ч до остановки. В «Авторевю» приводятся пути выбега от 160 до 80 км/ч, от 130 до 80 и от 50 до остановки.

Цель и постановка задачи

Задача данной статьи – обосновать такие соотношения с учетом реальной вариации показателей.

Статистическое сравнение результатов продувки с результатами выбега

Примем в качестве показателя точности метода Пт следующее соотношение:

$$Пт = C_{x,дор} / C_{x,ат}, \quad (3)$$

где $C_{x,дор}$ – значение C_x , вычисленное по выбегу на дороге; $C_{x,ат}$ – значение C_x , определенное продувкой в аэродинамической трубе (либо объявленное изготовителем) и принятое в качестве эталонного.

Эталонные значения выбирались из Интернета, большей частью из официальных сайтов производителей автомобилей и сайтов <http://carfolio.com/specifications>, automobile-catalog.com и т.д.

Значения $C_{x,дор}$ вычислялись двумя методами – известным и предложенным нами. Данные о выбеге на дороге взяты из результатов полигонных испытаний, выполненных экспертами журнала «За рулем». В публикациях приводились значения пути выбега до остановки. Расчет велся для средних значений скорости в интервалах 120–50 км/ч и 50–0, определенных с учетом непостоянства замедления – 80,88 и 23,75 км/ч; таким образом, условие применимости известного метода не было нарушено.

Ниже приведены значения показателей точности по 273 легковым автомобилям (табл. 1). На рис. 1 показана гистограмма этого распределения, изображенная линией, огибающей их вершины. Средние значения состави-

ли: для известного метода 1,252, для предложенного 1,219. Моды – соответственно 1,227 и 1,188. Можно допустить, что значения менее 0,7 и более 1,7 – это выбросы. Но остальные достаточно надежны.

Таблица 1 Распределение значений показателя точности (по данным испытаний журнала «За рулем», выбеги 120–50 км/ч и 50–0)

Пт	Частота, ед, при методе	
	новом	известном
0,45	1	0
0,55	1	2
0,65	1	0
0,75	2	1
0,85	3	3
0,95	13	9
1,05	35	24
1,15	76	61
1,25	73	80
1,35	38	52
1,45	12	19
1,55	11	13
1,65	2	4
1,75	0	0
1,85	1	0
1,95	1	1
2,05	3	3
2,15	0	1
Мода	1,188	1,227
Среднее	1,219	1,252

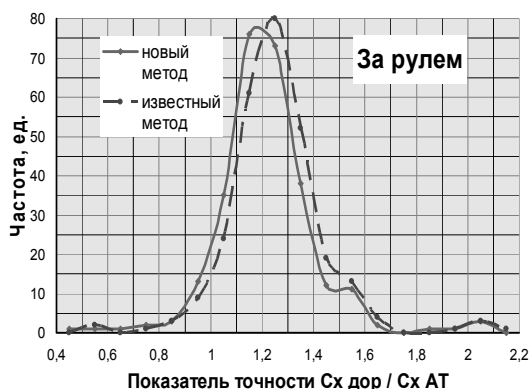


Рис. 1. Распределение значений показателя точности (по данным испытаний «За рулем»)

Мы разбили весь массив автомобилей на четыре категории: гранды (седаны и купе с рабочим объемом двигателя более 3 л); средние (рабочий объем от 1,2 до 3 л); малые (менее 1,2 л); джипы и кроссоверы. Показатели распределений (новый метод) представлены в табл. 2.

Таблица 2 Показатели распределений Пт по категориям автомобилей

Категория	Кол-во	Показатели по новому методу	
		мода	среднее
Все	273	1,188	1,219
Гранды	33	1,171	1,295
Средние	179	1,195	1,21
Малые	15	1,233	1,117
Джипы	46	1,225	1,209

Аналогичный анализ был проведен по данным, опубликованным в журнале «Авторевю». Объем выборки – 182 единицы. Результаты представлены в табл. 3 и на рис. 2. Показаны результаты расчета S_x четырьмя вариантами: новым методом по выездам 130-80 и 50-0, 160-130 и 50-0, 160-80 и 50-0, а также известным методом по выездам 130-80 и 50-0 (средние скорости 102,69 и 23,75 км/ч).

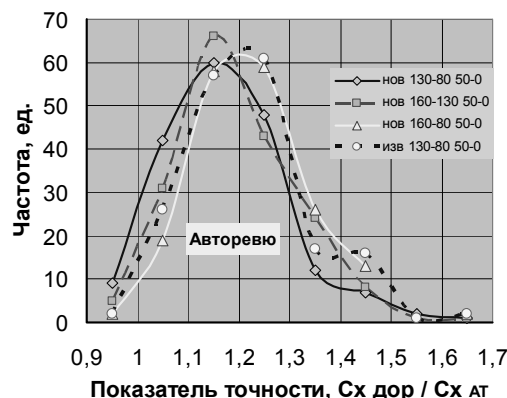


Рис. 2. Распределение значений показателя точности (по данным «Авторевю»)

Таблица 3 Распределение значений показателя точности (по данным испытаний журнала «Авторевю», разные сочетания выездов)

Показатель точности Пт	Частота, ед.			
	новый метод			известный
	130-80 50-0	160-130 50-0	160-80 50-0	
0,95	9	5	2	2
1,05	42	31	19	26
1,15	60	66	58	57
1,25	48	43	59	61
1,35	12	24	26	17
1,45	7	8	13	16
1,55	2	1		1
1,65	1	1	2	2
Мода	1,160	1,160	1,203	1,208
Средн	1,178	1,193	1,226	1,218

Отметим, что из большого массива данных, опубликованных в журнале «Авторевю», выбраны только результаты испытаний, проведенных после середины 2005 года, когда в отчетах начали приводить значения фактической массы автомобиля, определенные взвешиванием. Этот анализ вновь подтвердил, что в диапазоне скоростей, доступных для известного метода, предложенный метод дает несколько лучшие оценки C_x , чем известный. Естественно, результаты выбега с высоких скоростей позволяет использовать только новый метод. Далее, подтверждено, что C_x на дороге существенно выше, чем в аэродинамической трубе, причем не на 5–10%, а на 16–20. Дополнительно получены основания для сравнения трех вариантов расчета по данным «Авторевю» с предложенным методом. Наихудшие результаты дал третий вариант. Возможно, сказалась недостаточная надежность оценки средней скорости на большом диапазоне, от 160 до 80 км/ч. Не исключено, что этой же причиной объясняются более высокие значения показателя Пт, вычисленные по тестам «За рулем». В первых двух вариантах модальные значения практически одинаковы, хотя во втором (160-130, 50-0) огибающая несколько смещена вправо, в область более высоких значений; это проявляется увеличенным значением средней – 1,1927 против 1,1779. Возможно, дело в том, что значение пути выбега со 160 до 130 км/ч не приведено явно в опубликованных результатах эксперимента, а получено нами как разность двух опубликованных значений – 160-80 и 130-80. Может быть, испытатели получали эти значения пути выбега в разных замерах. Итак, надо признать лучшим первый вариант расчета C_x , по значениям пути выбега со 130 до 80 км/ч и с 50 км/ч до полной остановки. Как и в предыдущем случае, весь массив автомобилей был разбит на категории: гранды; средние и джипы. Малые не включены, поскольку не испытывались на скорости выше 130 км/ч. Показатели распределений (новый метод) сведены в табл. 4.

Таблица 4 Показатели распределений Пт по категориям автомобилей («Авторевю», новый метод первый вариант)

Категория	Кол-во	Показатели	
		мода	среднее
Все	182	1,160	1,178
Гранды	67	1,131	1,152
Средние	90	1,148	1,76
Джипы	25	1,238	1,255

Наконец, мы смогли подобрать результаты 30 испытаний на дороге и в аэродинамической трубе НИЦИАМТ (г. Дмитров, Россия), опубликованные в журнале «Авторевю». В этой выборке значения Пт варьировали от 1,045 до 1,161 со средним арифметическим 1,096 и модой 1,089. По-видимому, независимая продувка дает результаты, более близкие к истине.

Выводы

1. В условиях применимости известного метода, т.е. при скоростях до 100 км/ч, предложенный нами метод расчета C_x дает значения, несколько более близкие к литературным, чем известный (на 2–3 %).
2. Результаты выбега с высоких скоростей позволяет использовать только новый метод.
3. Средние значения Пт, как и моды распределений, полученные обоими методами, близки к 1,2, а не к 1,1, как указано в [1].

Последний вывод многозначителен. Наличие высоких значений Пт в наших выборках можно объяснить тем, что:

- на полигоне испытывались автомобили, адаптированные к плохим дорогам, в частности, с увеличенным клиренсом;
- мы ошибались при подборе эталонных значений C_x ;
- отдельные объявленные изготовителями значения C_x занижены в рекламных целях.

Доступные данные недостаточны для выбора того или иного варианта.

Литература

1. Петрушов В.А. Мощностной баланс автомобиля / В.А. Петрушов, В.В. Московкин, А.Н. Евграфов. – 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. Рабинович Э.Х. Определение сопротивления движению по выбегу автомобиля / Э.Х. Рабинович, В.П. Волков, Е.А. Белогуров // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. Ч. 2. – Луганськ. – 2008. – № 7 (125). – С. 22–25.

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

Статья поступила в редакцию 23 июня 2011 г.