

УДК 625.032.821

В.П.Волков, Э.Х.Рабинович, Е.А.Белогуров, Д.В.Никитин, Е.Е.Руденко
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ
НА СКОРОСТЯХ 30...160 км/ч**

Расхождение теоретических и экспериментальных значений сил сопротивления движению легкового автомобиля на скоростях 30...160 км/ч вызывается неправомерным использованием постоянного показателя степени $\alpha=2$ в формуле сопротивления воздуха. По результатам дорожных испытаний получена средняя зависимость α от скорости с минимумом $\alpha=1,98$ вблизи 120 км/ч и максимумом $\alpha=2,15$ вблизи 33 км/ч. Расчет с переменным α уменьшает указанное расхождение в 5...10 раз. Дополнительно предложена эмпирическая формула для вычисления поправки к обычному расчету сопротивлений движению

Ключевые слова: Автомобили легковые, сопротивление движению, эксперимент, расчет, поправки, переменный показатель степени.

Введение

Характерная тенденция нынешнего этапа развития автомобильной техники – борьба за снижение выброса парниковых газов и, как основной его причины, – расхода топлива. Уменьшение его на десятые доли литра на 100 км рассматривается как успех. Разработчики кузова и шасси достигают этого снижением сопротивлений движению. На средних и высоких скоростях это, в первую очередь, сопротивление воздуха. У массовых современных автомобилей оно сравнивается с сопротивлением качению уже на 70...75 км/ч, а дальше резко превышает его (на 130...150 км/ч – в 3...4 раза). Поэтому повышение точности измерения и расчета аэродинамического сопротивления является важной и актуальной задачей.

Анализ публикаций

Силу аэродинамического сопротивления рассчитывают по общепринятой формуле

$$P_w = k \cdot F \cdot v^2 / 3,6^2, \quad (1)$$

где k – коэффициент обтекаемости $\text{Н} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-4}$; $k = 0,5 C_x \rho_B$ (C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, ρ_B – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$), F – лобовая площадь автомобиля, м^2 .

Однако, как показано в [1, 2], результаты расчета по этой формуле расходятся с данными дорожных экспериментов, в отдельных случаях – весьма значительно, причем наибольшее расхождение приходится на скорости выше 80...100 км/ч (рис. 1).

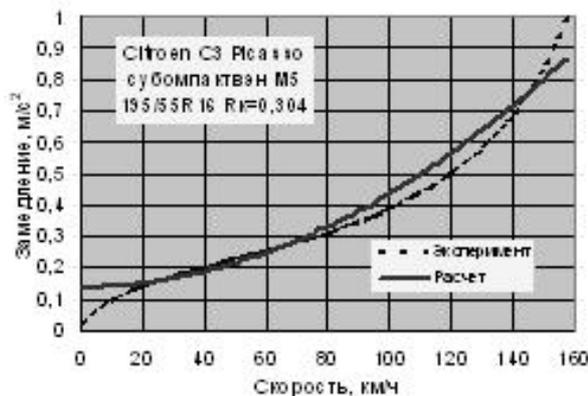


Рис. 1. Зависимость замедления выбега автомобиля от скорости [2]

Представленный в [1] анализ этих расхождений приводит к выводу, что наиболее вероятная причина – слишком упрощенная модель аэродинамического сопротивления. Рассмотрены две гипотезы: непостоянство C_x и непостоянство показателя степени при скорости «2». Выбор зависит от смысла, который мы вкладываем в коэффициент C_x .

Если C_x – постоянная характеристика данного объекта, определяемая только его формой и состоянием поверхностей, то приходится принять гипотезу о непостоянстве показателя степени. В рассмотренном в [1] примере он варьирует от 1,95 до 2,1.

Если же C_x – это не присущая данному объекту характеристика, а просто результат математических действий и потому величина переменная, то ее значение меняется в пределах от 0,3 до 0,5. Это менее вероятно.

Более привлекателен первый вариант: он вносит определенность в понимание явления и требует меньшей изменчивости расчетного показателя. Кроме того, такой подход лучше отражает сложность картины в зоне перехода от ламинарного обтекания к турбулентному, где теория не дает надежных оценок.

Нам не удалось найти в доступных публикациях сведений, подтверждающих или опровергающих эту гипотезу для автомобиля (кроме старых данных, рассмотренных в [1]). В других случаях, однако, это общепринятое мнение.

Так, при расчете замедления пули в полете R [3] используется формула

$$R = A \cdot v^m, \quad (2)$$

в которой показатель степени m сильно варьирует в зависимости от скорости – от 1,5 до 3, причем для скоростей от 0 до 840 фут/с (т.е. 0...256 м/с) приводится среднее значение $m=1,6$.

В работе [4], где изучалось сопротивление воздуха падению тела на малых скоростях, получен показатель степени 2,5, в более поздних работах того же автора – 2,7.

В работе [5] изучены на значительном числе примеров расхождения расчетных и экспериментальных сопротивлений движению (ΔF) и выведены эмпирические формулы поправок к стандартному расчету. Анализ факторов, вызывающих расхождения, не проводился.

Цель и постановка задачи

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

- 1) проанализировать факторы, вызывающие различия расчетных и экспериментальных сопротивлений движению;
- 2) вывести эмпирические формулы для практических расчетов сил сопротивления движению автомобиля на скоростях 30...160 км/ч;
- 3) оценить среднюю зависимость показателя степени в формуле сопротивления воздуха от скорости.

Факторный анализ расхождения расчетных и экспериментальных сопротивлений движению

Мы анализировали массив результатов полигонных тестов журнала «Авторевию», обработанных по методике [5, 6]. Были использованы приемы, принятые в теории планирования эксперимента [7]. Набор факторов выбран из числа показателей, имеющихся в общедоступной технической характеристике автомобиля и открытой литературе. Поскольку речь идет о режимах, где преобладает сопротивление воздуха, были выбраны аэродинамические показатели: C_x и произведение $C_x \cdot F$ (иногда называемое «эффективная площадь лобового сопротивления» или просто «площадь сопротивления»). Вторым по важности источником дополнительных сопротивлений мы сочли колебания автомобиля, определяемые его подвеской и пропорциями, в частности, отношением высоты центра масс h_c к колесной базе B . Именно это соотношение при прочих равных условиях определяет колебания подрессоренной массы, создающие дополнительные сопротивления в амортизаторах и шинах. Поскольку, однако, данные подвески и значение h_c не приводятся в характеристике автомобиля, мы использовали вместо h_c общую высоту автомобиля H , полагая, что эти два показателя определенным образом коррелируют. Следующим фактором было выбрано передаточное число главной передачи u_0 : чем оно больше, тем сильнее сказываются на выбеге автомобиля сопротивления холостого хода трансмиссии.

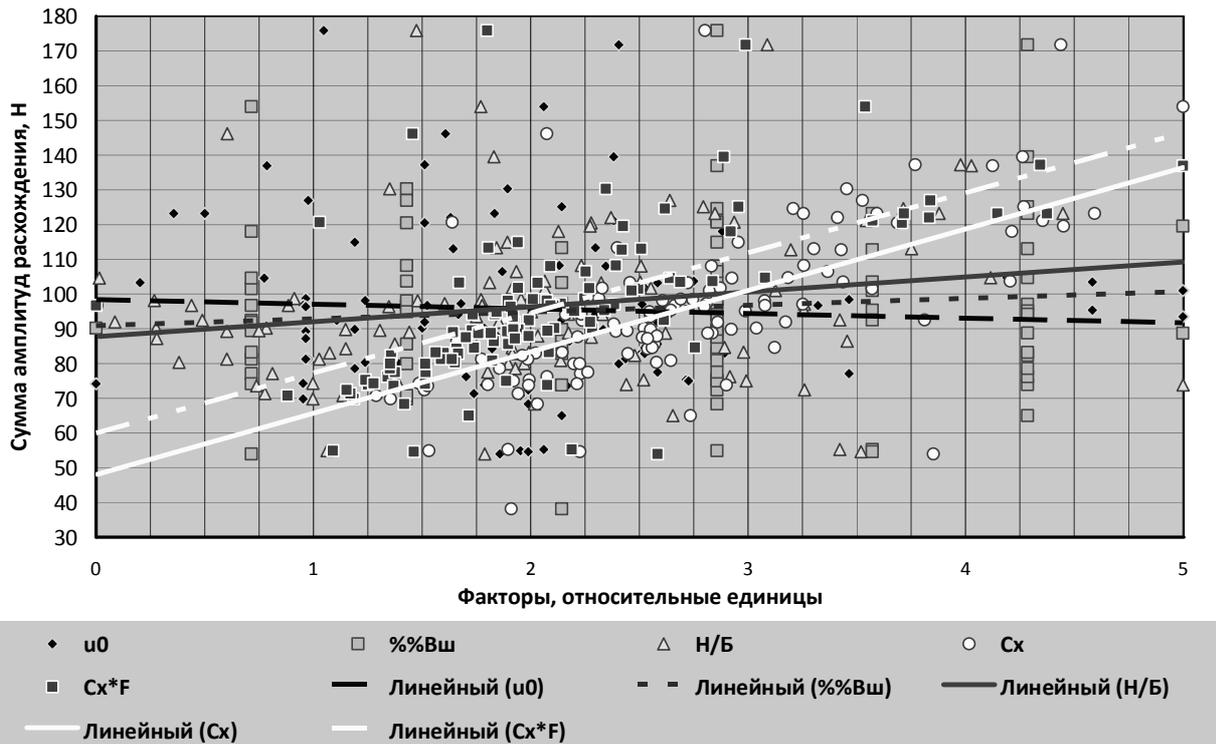


Рис. 2. Влияние некоторых факторов на расхождение расчетных и экспериментальных сопротивлений движению

Наконец, влияние шин мы учитывали их коэффициентом профильности (%%Вш). Все факторы были переведены в относительные единицы от 0 до 5.

Самым сильным фактором (рис. 2) оказалась аэродинамика, причем показатели C_x и $C_x \cdot F$ влияют одинаково, поэтому можно ограничиться любым одним из них.

Остальные факторы влияют заметно слабее. Неожиданным оказался негативный характер влияния передаточного числа главной передачи и, наоборот, позитивное влияние профильности. Очевидно, следовало более глубоко проанализировать эти факторы.

В целом представляется возможным приближенно оценивать поправку к расчету по следующей эмпирической формуле:

$$\Sigma A = 96 + 102(C_x F - 0,83) - 130 \left(\frac{H}{B} - 0,56 \right) \quad (3)$$

Уточнение математической модели сопротивления воздуха

Как уже упомянуто, в работе [1] была высказана гипотеза о непостоянстве показателя степени α в формуле сопротивления воздуха и показана его возможная зависимость от скорости на примере выбега седана Ford Mondeo. На базе описанного выше массива опытных данных были выполнены аналогичные расчеты и проанализированы такие же зависимости по 96 легковым автомобилям. Характер зависимости оказался сходным для всех автомобилей, но вариация, особенно при малых скоростях, велика (рис. 3).

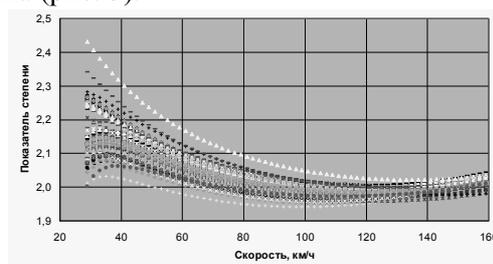


Рис. 3. Вариация расчетной зависимости $\alpha(v)$ у разных автомобилей

Попытка разбить массив на категории по показателю Н/Б не дала ожидаемых результатов: вариация α в каждой категории осталась значительной. Зато средние зависимости $\alpha(v)$ оказались весьма близкими (рис. 4).

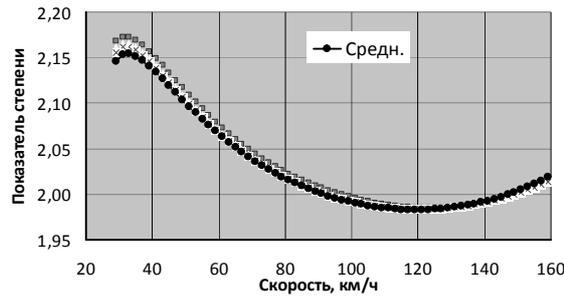


Рис. 4. Расчетные зависимости $\alpha(v)$ по категориям автомобилей и средняя

Поэтому мы усреднили значение показателя степени всех автомобилей. Средняя кривая практически совпала с кривой самой многочисленной категории. Участок зависимости в диапазоне скоростей от 29 до 160 км/ч хорошо описывается полиномом шестой степени:

$$\begin{aligned}
 n = & -1,074 \cdot 10^{-12} \cdot V^6 + 6,596 \cdot 10^{-10} \cdot V^5 - \\
 & 1,628 \cdot 10^{-7} \cdot V^4 + 2,053 \cdot 10^{-5} \cdot V^3 - \\
 & 1,359 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 + 4,101 \cdot 10^{-2} \cdot V + 1,719.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Далее переменный показатель степени был введен в общепринятую формулу сопротивления воздуха и по так скорректированной модели была вычислена разность теоретических и экспериментальных сил сопротивления в ряде примеров.

Как видно из диаграмм на рис. 5, разность сил потеряла S-образную форму и существенно уменьшилась – в 10 раз для Ford Mondeo, в 5 раз для Ford Fusion.

Окончательное слово в споре о том, что считать переменным – коэффициент C_x или показатель степени при скорости α , – должны сказать специалисты по аэродинамике. Любая продувка в аэродинамической трубе может дать в качестве побочного результата, практически без дополнительных затрат, параллельную запись скорости воздушного потока и силы сопротивления воздуха после выключения привода вентилятора. Анализ большого массива таких записей даст возможность углубить теорию. Однако для инженеров автомобильной промышленности и транспорта, как и для специалистов прикладной автомобильной науки, нужна определенность – и тут вариант с постоянным C_x для данного автомобиля и переменным показателем степени для всех автомобилей представляется достаточно практичным.

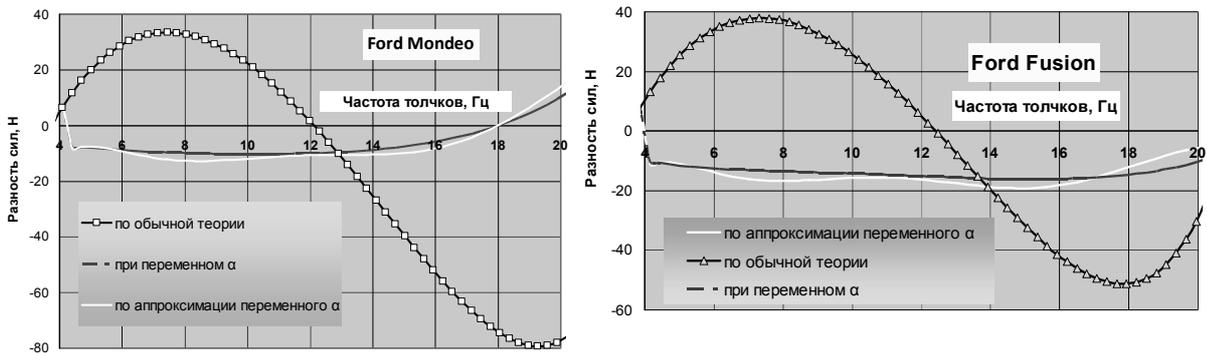


Рис. 5. Расхождение экспериментальных и теоретических значений сил сопротивления движению легкового автомобиля при расчете по обычной теории, по модели с переменным показателем степени и с аппроксимированным по формуле (4) переменным показателем степени

Выводы

Факторный анализ показал, что различия расчетных и экспериментальных сил сопротивления движению на скоростях 30...160 км/ч вызываются, в первую очередь, несовершенством математической модели сопротивления воздуха при смешанном ламинарно-турбулентном обтекании автомобиля; влияние других рассмотренных факторов значительно слабее.

Выведена эмпирическая зависимость для вычисления поправки к расчету сил сопротивления движению автомобиля на указанных скоростях общепринятым методом.

Оценена и аппроксимирована средняя зависимость показателя степени в формуле сопротивления воздуха от скорости $\alpha(v)$; вычисления с учетом переменного α в 5...10 раз уменьшили расхождение расчетного и экспериментального сопротивления движению автомобиля при выбеге; это является косвенным подтверждением гипотезы о непостоянстве показателя степени α .

Средняя зависимость $\alpha(v)$ практически одинакова для разных категорий автомобилей, хотя в пределах одной категории вариация ее достаточно велика.

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. Зависимость баллистического коэффициента от формы пули / [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье: <http://www.ada.ru/guns/ballistic/bc/drag.htm>
4. Герасимов С.А. Динамический режим аэродинамического сопротивления // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – № 8 – С. 19-22.
5. Возможное влияние колебаний на сопротивление движению легкового автомобиля при выбеге / [Э.Х. Рабинович, А.В. Дитятъев, В.П. Волков, Е.А. Белогуров] / Автомобильный транспорт. – Харьков, ХНАДУ. – 2010. – вып. 26. – с. 59-62.
6. Статистический анализ сопротивлений движению легкового автомобиля при выбеге / [Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А., Кондратьев Э.А.] / Вестник ХНАДУ. – 2012 (план).
7. Протодяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. М.: «Наука», 1970– 69 с.