

УДК 625.032.821

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПО ВЫБЕГУ АВТОМОБИЛЯ

Э.Х. Рабинович, доц., к.т.н., Я.Н. Замай, В.А. Иршенко, студенты,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Точность дорожного метода определения коэффициентов сопротивления воздуха и качению C_x и f можно повысить, подобрав нужную зависимость $f(v)$ в расчетной модели. Это позволяет опустить нижнюю границу рекомендуемого диапазона большей скорости до 100 км/ч.

Ключевые слова: автомобили легковые, выбег, замедление, аэродинамическое сопротивление, сопротивление качению, эксперимент, расчет.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ОПОРУ РУХУ ЗА ВИБІГОМ АВТОМОБІЛЯ

Е.Х. Рабінович, доц., к.т.н., Я.М. Замай, В.А. Іршенко, студенти,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Точність дорожнього методу визначення коефіцієнтів опору повітря й кочення C_x й f можна підвищити, підібравши потрібну залежність $f(v)$ у розрахунковій моделі. Це дозволяє опустити нижню межу рекомендованого діапазону більшої швидкості до 100 км/год.

Ключові слова: автомобілі легкові, вибіг, уповільнення, аеродинамічний опір, опір коченню, експеримент, розрахунок.

DETERMINING OF C_d & C_{rr} BASED ON COASTING OF CAR

E. Rabinovich, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), Y. Zamay, V. Irshenko, St.,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The accuracy of the on-road method of determining the air-drag coefficient and vehicle rolling C_d & C_{rr} can be improved by the selection the necessary dependence $f(v)$ in the analysis model. This allows to extend the lower limit of the recommended range of greater speed to 100 km/h.

Key words: passenger car, coast-down, deceleration, drag, rolling resistance, experiment, calculation.

Введение

Дорожные испытания автомобиля в режиме выбега широко используются в отечественной и мировой практике. Регистрируют параметры выбега – путь, скорость и (или) замедление в зависимости от времени, по ним вычисляют коэффициенты сопротивления воздуха C_x и суммарного дорожного сопротивления ψ (который часто именуют коэффициентом сопротивления качению f). Продувка в аэродинамической трубе дает лишь точечное значение C_x на высокой скорости, поскольку нигде в мире не продувают авто-

моби́ли на реальных скоростях из-за большой турбулентности в переходных режимах [1]. Сопротивление качению шин на барабанных стендах обычно не измеряют при скоростях ниже 15 км/ч. Стенд не имитирует всего многообразия режимов работы шины на реальной дороге. Поэтому определение сопротивлений движению дорожными методами является неотъемлемой частью испытаний автомобиля.

Анализ публикаций

Известны разные методики вычисления коэффициентов C_x и ψ по выбегу автомобиля.

Многие авторы (например, [2, 3]) описывают зависимость суммарного сопротивления движению F от скорости v полиномом второй степени [3]

$$F = a + b \cdot v + c \cdot (v_{rel})^2 \quad (1)$$

и утверждают, что a – это преимущественно сопротивление качению, b – это зависимость сопротивления качению от скорости плюс потери в трансмиссии, причем иногда $b \approx 0$, а $c(v_{rel})^2$ – это сила сопротивления воздуха (v_{rel} – скорость автомобиля относительно воздуха). Другие (например, [4]) отвергают такое толкование, опираясь на более надежную полиномиальную модель сопротивления качению, а сопротивление воздуха определяют вычитанием расчетного сопротивления качению из общего сопротивления движению автомобиля при выбеге. Сопротивлениями холостого хода трансмиссии пренебрегают.

В работе [5] приведен подробный анализ всех показателей, входящих в расчеты сопротивлений движению. В частности, предложена формула для расчета лобовой площади автомобиля F (здесь записана с привычными обозначениями)

$$F = c \times B \times H - (K' - B_{ш}) \times \Pi' , \quad (2)$$

где c – коэффициент заполнения, B , H – ширина и высота автомобиля, K' – колея передняя, $B_{ш}$ – ширина шины, Π' – дорожный просвет под передней осью. Автор предлагает $c=0,918$ и утверждает, что эта формула дает лучшее приближение к фактическим данным автомобилей, чем формула SAE J1269

$$F = 0,8 \times B \times H . \quad (3)$$

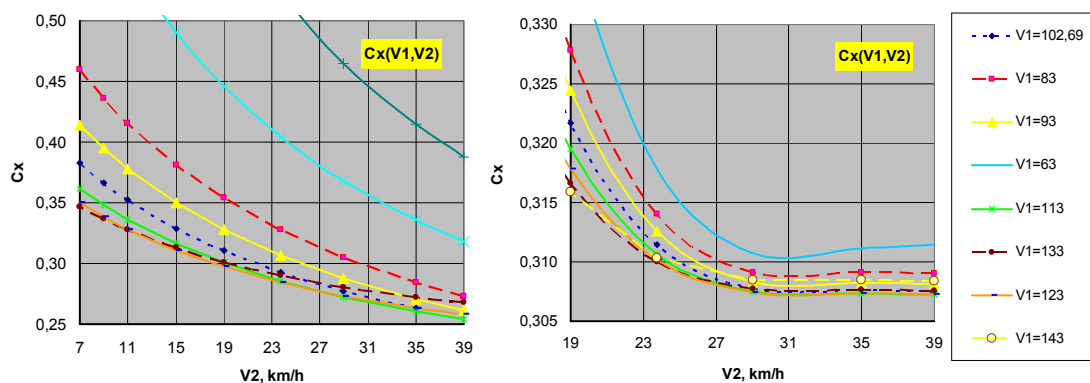


Рис. 1. Результаты расчета C_x седана Лада Приора в зависимости от выбора скоростей v_1 и v_2 при постоянном (слева) и переменном показателе степени n

Тот же результат дало бы увеличение коэффициента заполнения с 0,8 до 0,84.

В справочнике [6] описан более разумный метод разделения сопротивлений, однако и там сопротивление качению P_f считается постоянным до 100 км/ч. В работе [7] этот метод развит нами, снято допущение о постоянстве сопротивления качению и ограничение применимости метода скоростью до 100 км/ч. Для разделения сопротивлений используются значения замедлений выбега j_1 и j_2 на двух скоростях – v_1 и v_2 . В работе [8] показано, что результат расчета C_x зависит от выбора этих скоростей и на основании нескольких примеров рекомендовано сочетание $v_1=113-123$ и $v_2=27-49$ км/ч. Кроме того, показано, что сопротивление воздуха следует рассчитывать с переменным показателем степени при скорости $n(v)$ [9]. В таких случаях графики зависимостей $C_x(v_2)$ при разных v_1 стягиваются в довольно узкий жгут, а средние расчетные значения C_x оказываются достаточно близкими к объявленным (рис. 1). Однако у некоторых автомобилей графики остаются довольно далекими друг от друга, и выбрать по ним можно лишь диапазон возможных расчетных значений C_x (например, от 0,402 до 0,418 у Cruze, рис. 2).

Цель и постановка задачи

Целью исследования является повышение надежности расчетов движения автомобилей за счет снижения неопределенности вычисления коэффициентов сопротивления движению по данным выбега автомобиля. А задачей – усовершенствовать приемы обработки экспериментальных данных с целью уменьшения размаха расчетных значений C_x .

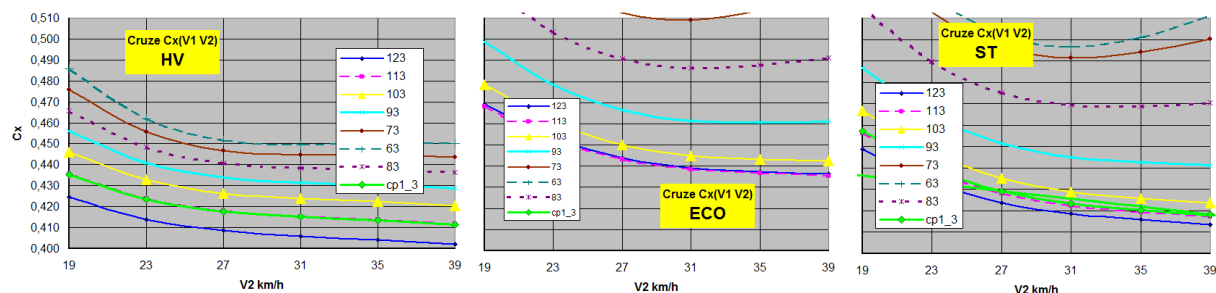


Рис. 2. Результаты расчета C_x хэтчбека Chevrolet Cruze в зависимости от выбора скоростей v_1 и v_2 при переменном показателе степени n и разных скоростных категориях шин, принятых в расчете

Ход и результаты исследования

Как показал дальнейший анализ, результат расчета сильно зависит от принятой в математической модели категории шин (HV, ST или ECO по [6]). Симптомом неверного выбора может послужить большой размах расчетных значений (разность между наибольшим и наименьшим значениями). Неопределенность расчетных значений C_x можно еще уменьшить, если разбить поле возможных значений f более мелко (рис. 3) и выбрать график $f(v)$, который обеспечит минимальный размах кривых. В этом примере среднее значение C_x в диапазоне 113–123 км/ч составляет 0,3888 (объявлено 0,34). Допущение о регулярном веерообразном ходе кривых в какой-то мере подтверждается данными исследователей США [10, fig. 12.14]. Термин «неопределенность» принят сейчас метрологами взамен термина «погрешность».

Если учесть ограничения скорости на дорогах общего пользования, то следует опустить нижнюю границу рекомендованного диапазона v_1 , например, до 103–109 км/ч. В примере с Ford Fiesta при 109 км/ч значение C_x из-

меняется на 0,0006, при 103 – на 0,0010. Кроме того, если зависимость $f(v)$ выбрана правильно, то C_x увеличится всего на 0,0016 даже при $v_1 = 79$ км/ч (рис. 3).

Все представленные здесь данные выбегов, как и в предыдущей работе на эту тему [8], были заимствованы из статей о полигонных испытаниях автомобилей, проведенных экспертами «Авторевю». Однако и наши эксперименты дают нужные для расчетов сведения, хотя выполнены в менее благоприятных условиях и с простыми измерительными средствами.

На рис. 4 показаны диаграммы выбега с высокой и низкой скорости пятидверного хэтчбека Ford Fiesta 2008 года. Ветер заметно искажал картину – пришлось усреднять результаты заездов в противоположных направлениях, что снизило точность. Приняты для расчета такие значения: масса автомобиля с экспериментаторами – 1400 кг, лобовая площадь – 2,06 м²; средняя плотность воздуха – 1,25 кг/м³; скорость ветра на уровне центра давления – 1,3–3,2 м/с, направление – 3 – ЮЗ, азимут от 245 до 268°.

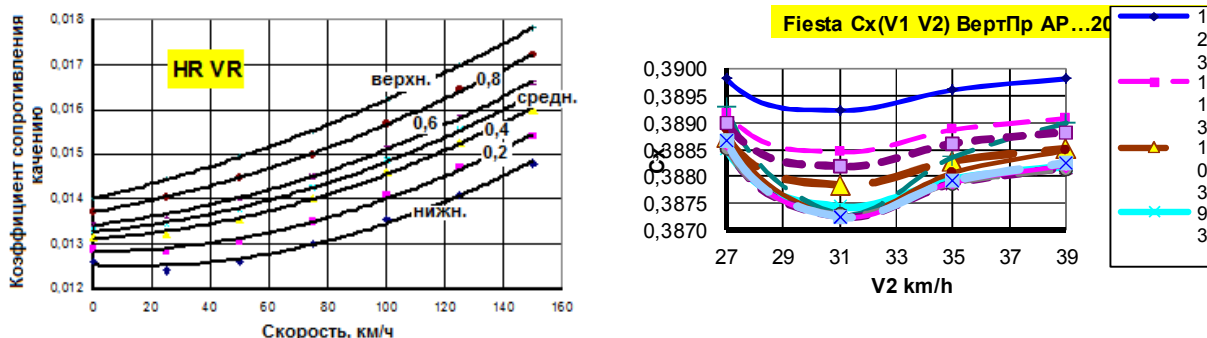


Рис. 3. Разбивка поля возможных значений f и диаграмма $C_x(v)$ хэтчбека Ford Fiesta, построенная с использованием нижнего графика

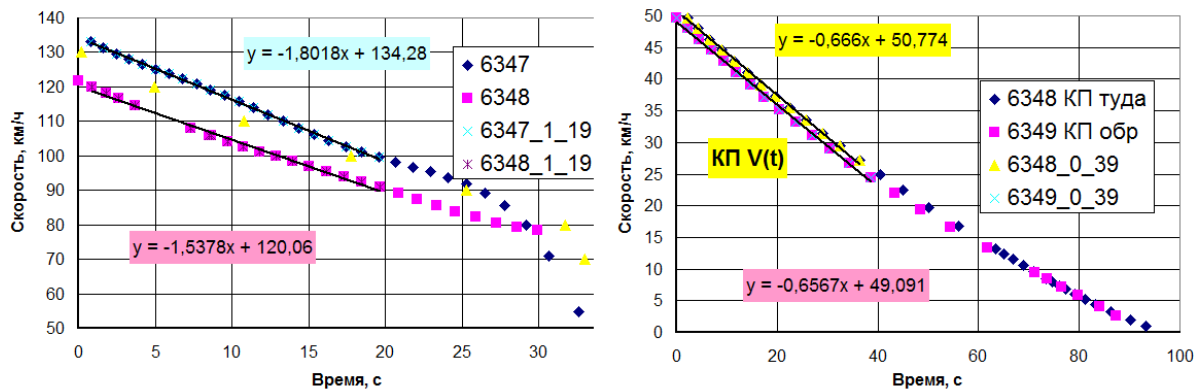


Рис. 4. Диаграммы выбега хэтчбека Ford Fiesta с высокой и низкой скорости

Среднее замедление в области 120–100 км/ч – $0,464 \text{ м/с}^2$, в области 27–49 км/ч – $0,184 \text{ м/с}^2$. Искомые значения коэффициентов: $C_x = 0,35\text{--}0,362$ (на дороге; при продувке было бы $0,317\text{--}0,345$); $\psi=0,0167$.

Выводы

Правильный выбор зависимости коэффициента сопротивления качению от скорости $f(v)$ снижает неопределенность значения C_x . При правильном выборе зависимости $f(v)$ можно без ущерба для точности опустить нижнюю границу рекомендованного диапазона высокой скорости v_1 до 100 км/ч.

Литература

- Пути развития сотрудничества КамАЗа и НАМИ в области испытаний способом выбега / Д.Х. Валеев, В.С. Карабцев, С.В. Бахмутов, В.А. Петрушов // ФГУП «НАМИ». – Режим доступа: <http://www.aae-press.ru/f/88/28.pdf>.
- About coastdown testing. – Режим доступа к статье: <http://www.edison2.com/blog/2010/8/25/about-coastdown-testing.html>.
- Estimation of Road Load Parameters via On-road Vehicle Testing / Rahul Ahlawata, Jürgen Bredenbeck, Tatsuo Ichigec. – Режим доступа к статье: <http://www.aanddtech.com/Docs/TTX%202013.pdf>.
- Ligterink N.E. Correction algorithms for WLTP chassis dynamometer and coastdown testing / Norbert E. Ligterink, Pim van Mensch, Rob F.A. Cuelenaere et al // WLTP-08-37e TNO-rapport.
- Pannone G. Technical Analysis of Vehicle Load Reduction Potential For Advanced Clean Cars (Contract 13-313). Draft Final Report - Task 8 - (Version 1.1) / Greg Pannon, // CONTROLTEC, LL. – Режим доступа: <https://www.arb.ca.gov/research/rsc/3-27-15/item1dfr13-313.pdf>.
- Автомобильный справочник BOSCH: Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.
- Рабинович Э.Х. Определение сопротивлений движению автомобиля методом однократного выбега / Э.Х. Рабинович, З.Э. Кемалов, А.В. Сосновый // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. 22. – С. 46–48.
- Измерение аэродинамического сопротивления движению автомобиля дорожным методом / Э.Х. Рабинович, В.П. Волков, Е.А. Белогуров, Д.В. Никитин // Метрологія та вимірювальна техніка: матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф. «Метрологія–2012», 9–11 жовтня 2012 р., Харків: наук. праці. – Х.: ННЦ «Інститут метрології», 2012. – С. 390–393.
- Сопротивление движению легкового автомобиля на скоростях 30–160 км/ч / В.П. Волков, Э.Х. Рабинович, Е.А. Белогуров и др. // Машинобудування та металлообработка: Міжвузівський збірник (за галузями знань). – 2012. – Вип. 36. – С. 46–51.
- The Pneumatic Tire / U.S. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration. DOT HS 810 561 2006. – 707 с. – Режим доступа: http://www.nhtsa.gov/staticfiles/safecar/pdf/PneumaticTire_HS-810-561.pdf.

Рецензент: С.И. Ломака, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2016 г.