

Рабинович Э.Х.,
Здебский К.Ю.

Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
г. Харьков, Украина.
E-mail: erjara39@ukr.net,
erjara3@gmail.com

УСЛОВИЯ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ
НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ –
ОЦЕНКА ПО ЗАМЕДЛЕНИЮ ВЫБЕГА

УДК 625.032.821

В повседневной работе и при испытаниях транспортных и технологических колесных машин возникает необходимость количественной оценки условий движения этой конкретной машины. В статье обоснована методика расчета нужных показателей по данным выбега машины в двух противоположных направлениях, а при возможности – и на двух пересекающихся участках дороги. Представлен реальный пример.

Ключевые слова: выбег, скорость, замедление, DAEWOO Lanos, ветер, коэффициент, сопротивление качению, сопротивление воздуха.

Введение. Для решения практических задач, связанных с движением колесной машины, нужно знать реальные условия движения, в частности, скорость и направление ветра, коэффициент сопротивления качению (КСК), коэффициент аэродинамического сопротивления. Обычно эти показатели определяют экспериментально, используя высокоточное и дорогое оборудование – аэродинамические трубы, шинные стенды с беговыми барабанами диаметром 1,7 м и более, электронные метеостанции, флюгеры и анемометры. Главный недостаток такого подхода – сложность применения результатов к расчетам движения конкретной машины в конкретных условиях при сопоставлении их с экспериментальными данными.

Естественным выходом представляется оценка этих условий по их совместному действию, т.е. по замедлению машины при выбеге – движении накатом.

Актуальность таких исследований сохраняется при любых изменениях двигателя, трансмиссии, конструкции колес и форм кузова.

Анализ публикаций. В литературе можно найти множество публикаций о сопротивлениях движению, но ближе всех к теме настоящего исследования оказались две.

В работе [1] (Münch, 2012) использована линеаризация кривой выбега функцией $a(v^2)=M \cdot (v^2)+C$, что позволяет отделить квадратичную часть общего замедления от постоянной составляющей, т.е. сопротивление воздуха от сопротивления качению. Приведен пример успешного применения метода, но сделан вывод о его непригодности для промышленного применения из-за сильного влияния ветра и дождя. Правда, влияние это не оценено, скорость ветра не измерялась. Модель выбега примитивна, сопротивление качению принято постоянным, хотя давно известна его существенная зависимость от скорости [2, 3], неудачно выбраны диапазоны скоростей мерных заездов – надежные результаты можно получить лишь при правильном подборе пар скоростей, высокой и низкой [4] (Рабинович Э.Х. 2012).

В статье [5] (Рабинович Э.Х. 2016) показано, как по данным выбега определить КСК, среднюю скорость ветра, а при наличии данных о выбеге на двух расположенных под углом участках дороги – и его направление. Используя те же исходные данные, можно дополнительно определить коэффициент сопротивления воздуха C_x . Покажем это на примере.

Результаты исследования. Автомобиль DAEWOO Lanos 2008 г.в., масса снаряженная 1095 кг (измерена весовым устройством тормозного стенда Veissbarth BD 600 [6]), масса в состоянии эксперимента с людьми и оборудованием $m=1508$ кг, приведенная

масса при выбеге $\delta m = 1543$ кг, вес $mg = 14793,5$ Н. Коэффициент аэродинамического сопротивления на дороге принят по неофициальным данным АвтоЗАЗ $C_x = 0,375$, лобовая площадь по измерению фотоспособом (М. Буравцев) – $2,045$ м², принята по литературным данным $F = 2,07$ м². Плотность воздуха, вычисленная по данным ближайшей надежной метеостанции, $\rho = 1,2422$ кг/м³. Фактор обтекаемости $kF = 0,5 \cdot 1,242 \cdot 0,375 \cdot 2,07 = 0,48213$.

Шины Белшина Artmotion 185/60 R14 82H (изготовителем объявлено пониженное сопротивление качению).

Дорога горизонтальная, покрытие – асфальтобетон в хорошем состоянии. Имеет длинный участок (1750 м, азимут 98,03°) и, после поворота, короткий участок (750 м, азимут 44,96°). Скорость ветра по замеру анемометром МС-13 в период с 15:04 по 15:09 была $2,19 \pm 1,2$ м/с, с 16:24 по 16:29 – $3,97 \pm 0,86$ м/с.

Система уравнений силового баланса при выбеге:

$$\begin{cases} mgf + kF(v_a + v_w)^2 + P_x = j_{fr} \cdot \delta m; \\ mgf + kF(v_a - v_w)^2 + P_x = j_{bk} \cdot \delta m, \end{cases} \quad (1)$$

где v_a – скорость автомобиля, м/с; v_w – проекция скорости ветра на ось движения, м/с; j_{fr} , j_{bk} – замедления автомобиля при движении вперед (*forth*) и назад (*back*) соответственно, м/с².

Вычитаем второе уравнение из первого и после обычных преобразований получаем формулу для вычисления скорости ветра:

$$kF \cdot 4v_a v_w = (j_{fr} - j_{bk}) \cdot \delta m; \quad v_w = \frac{(j_{fr} - j_{bk}) \cdot \delta m}{4kF \cdot v_a}. \quad (2)$$

Складываем два уравнения и после аналогичных преобразований получаем формулу коэффициента сопротивления качению (с учетом уже найденного значения скорости ветра):

$$\begin{aligned} 2mgf + 2kF(v_a^2 + v_w^2) + 2P_x &= (j_{fr} + j_{bk}) \cdot \delta m; \\ f &= \frac{(j_{fr} + j_{bk}) \cdot \delta m / 2 - kF(v_a^2 + v_w^2) - P_x}{mg}. \end{aligned} \quad (3)$$

В эксперименте на длинном участке дороги ветер был направлен с востока на запад, средние значения замедлений составили при движении со скоростью 108 км/ч (30 м/с) вперед (против ветра, с 15:54 по 15:55) $j_{fr} = 0,4608$ м/с², при движении с той же скоростью назад (по ветру, с 16:14 по 16:18) $j_{bk} = 0,4163$ м/с². Расчетная скорость ветра (составляющая вдоль оси движения автомобиля)

$$v_w = \frac{(0,4608 - 0,4163) \cdot 1543}{4 \cdot 0,48213 \cdot 30} = 1,187 \text{ м/с.}$$

Расчетный коэффициент сопротивления качению

$$f = \frac{(0,4608 + 0,4163) \cdot 1543 / 2 - 0,48213 \cdot (30^2 + 1,187^2) - 6 - 0,33 \cdot 108}{14793,5} = 0,01355.$$

На коротком участке дороги (с 15:55 по 15:56) при том же ветре средние значения замедлений составили при движении вперед (против ветра) со скоростью 28,8 км/ч (8 м/с) $j_{fr} = 0,1571$ м/с², при движении с той же скоростью назад (по ветру) $j_{bk} = 0,1251$ м/с². Расчетная скорость ветра (составляющая вдоль оси движения автомобиля)

$$v_w = \frac{(0,1571 - 0,1251) \cdot 1543}{4 \cdot 0,48213 \cdot 8} = 3,201 \text{ м/с.}$$

Коэффициент сопротивления качению

$$f = \frac{(0,1571+0,1251) \cdot 1543 / 2 - 0,48213 \cdot (8^2 + 3,201^2) - 6 - 0,33 \cdot 28,8}{14793,5} = 0,01125.$$

Расхождение значений КСК ощутимое. Казалось бы, на обоих участках одной дороги сопротивление качению должно быть одинаковым. Но надо учитывать влияние скорости. Полученное расхождение достаточно близко к тому, какое предлагает расчетная зависимость $f(v)$ для шин категорий S и T, полученная нами путем обработки данных из [2] при допущении, что в пределах поля возможных значений КСК отдельные реализации идут не хаотично, а правильным веером (рис. 1). Самая близкая из таких реализаций проходит на высоте 0,2 от всей высоты поля (ST0.2) и при скоростях 28,8 и 108 км/ч дает значения КСК 0,01176 и 0,01317 соответственно. Это действительно заметно ниже, чем у скоростных шин категории Н, где минимальные значения КСК при этих скоростях – 0,01252 и 0,01363.

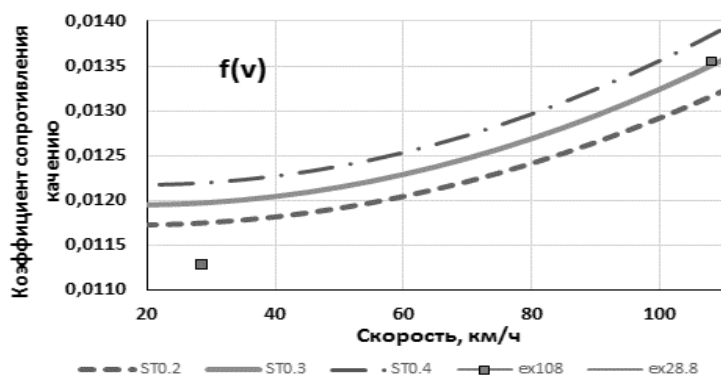


Рис. 1 – Гипотетические зависимости коэффициента сопротивления качению от скорости

Исключая обоснованные соображения о случайном разбросе, можно считать возможной причиной не устранённой части расхождения – неточность принятых по литературным данным показателей, в частности – коэффициента сопротивления воздуха C_x , а также сопротивлений холостого хода трансмиссии P_x .

Последние были приняты по аналогии с автомобилем Hyundai i30 (упрощенная формула $P_x=6+0,33 \cdot 3,6 \cdot v_a$). В свое время на другом экземпляре Lanos была получена нелинейная зависимость с более высокими значениями сопротивлений (рис. 2). Судя по форме кривой, трансмиссия не была прогрета до нормальной рабочей температуры, вязкость трансмиссионного масла была выше нормы, соответственно высоки были и сопротивления. Примем эти значения как наибольшие возможные.

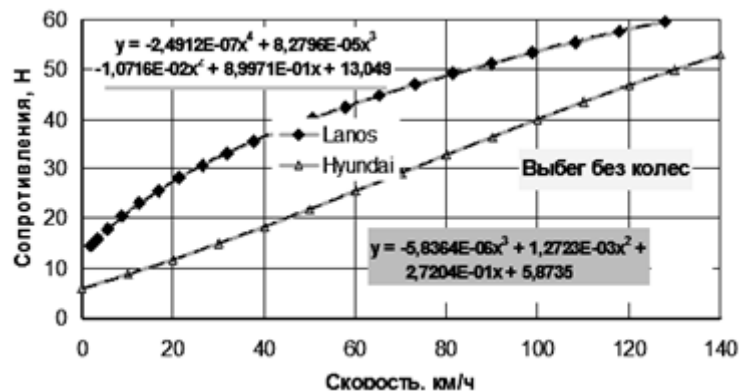


Рис. 2 – Экспериментальные зависимости потерь холостого хода трансмиссии от скорости автомобиля

Использованная здесь математическая модель позволяет оценить значение C_x , при котором будет выполнено условие $f_1=f_2$ на одной и той же скорости или $f_1=Kv f_2$ на

разных скоростях (1 и 2 – индексы первого и второго участка дороги; Kv – коэффициент, характеризующий ожидаемое изменение КСК при увеличении скорости от v_{a2} до v_{a1} [7]). Опуская громоздкие, но очевидные преобразования, приведем лишь окончательные формулы для варианта равных скоростей:

$$kF_{opt} = \frac{(j_{fr2} + j_{bk2} - j_{fr1} - j_{bk1}) \cdot \delta m / 2 - P_{x2} + P_{x1}}{v_{a2}^2 + v_{w2}^2 - v_{a1}^2 - v_{w1}^2}, \quad C_{x,opt} = 2kF_{opt} / \rho F, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 .

При выбранной вначале модели $P_{x1}=41,64$ Н, $P_{x2}=15,504$ Н. Равенство сопротивлений качению на двух участках при скоростях 30 м/с на одном и 8 м/с на втором участке ($f=0,01110$) наша математическая модель показывает при дорожном значении $C_{x,opt}=0.4064$, $kF_{opt}=0.52244$. Соответствующие расчетные скорости ветра – $v_{w1}=1,0952$ м/с, $v_{w2}=2,9534$ м/с. По данным [8] (Петрушов В.А. 2008) в аэродинамической трубе значение C_x на 5...13 % меньше. Если принять среднее соотношение, т.е. 1,09, то в трубе было бы $C_x=0,3728$ – близко к 0,375, принятому в АвтоЗАЗ. Снижение расчетного значения до $C_{x,opt}=0.402$ несколько приближает соотношение КСК к реальности – 0,0114 и 0,0111.

Во втором варианте $P_{x1}=55$ Н, $P_{x2}=20$ Н, $kF_{opt}=0.51193$, $C_{x,opt}=0.3982$, $f=0,01084$, $v_{w1}=1,0439$ м/с, $v_{w2}=2,9534$ м/с.

Сопротивления холостого хода трансмиссии создаются в основном потерями на взбалтывание и перемешивание масла. Они, в свою очередь, пропорциональны частоте вращения ведомой шестерни главной пары, т.е. прямо пропорциональны передаточному числу главной передачи и обратно пропорциональны радиусу качения. У i30 соотношение этих двух показателей равно 14,3, у Lanos – 14,7. Этот критерий не дает оснований для выбора. В принципе расхождение невелико, порядка 2 %. До получения экспериментальных данных о потерях в трансмиссии тестового автомобиля примем для определенности второй вариант.

Вычислим средние показатели ветра за период двух испытаний. Методика расчета ясна из карты-схемы (рис. 3).

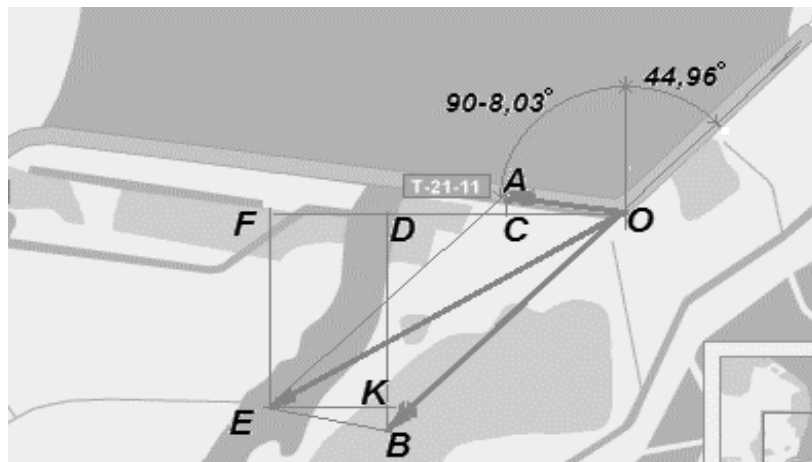


Рис. 3 – Схема дороги и ветра во время эксперимента

$$OE = \sqrt{OF^2 + EF^2}; \quad AzOE = 270^\circ - \text{Arctg}(EF / OF);$$

$$EF = BD - BK = BD - AC; \quad BD = OB \cdot \text{Cos } 44,96^\circ; \quad AC = OA \cdot \text{Sin } 8,03^\circ$$

$$OF = OD + OC; \quad OD = OB \cdot \text{Sin } 44,96^\circ; \quad OC = OA \cdot \text{Cos } 8,03^\circ; \quad OA = 1,0439; \quad OB = 2,9534;$$

$$BD = 2,9534 \cdot \text{Cos } 44,96^\circ = 2,08983; \quad AC = 1,0439 \cdot \text{Sin } 8,03^\circ = 0,1458; \quad EF = 1,944006;$$

$$OD = 2,9534 \cdot \text{Sin } 44,96^\circ = 2,08691; \quad OC = 1,0439 \cdot \text{Cos } 8,03^\circ = 1,03366; \quad OF = 3,120575;$$

$$OE = 3,6766; \quad AzOE = 238,08^\circ.$$

Среднее значение скорости ветра 3,68 м/с хорошо укладывается в диапазон $3,97 \pm 0,86$ м/с, полученный замером через 10 минут после окончания последнего выбега.

В другой серии заездов получена средняя скорость ветра 1,83 м/с. Прямые замеры, выполненные непосредственно перед началом этой серии, показали $2,19 \pm 1,2$ м/с. Для скорости ветра это близкое совпадение. Остальные показатели: $C_{x,opt} = 0,3607$, $f = 0,01245$. Средние по двум сериям значения: $C_{x,opt} = 0,3835$, $f = 0,01178$. Значение C_x достаточно близко к принятому изготовителем (0,375, расхождение 2,3 %), чтобы признать описанный метод пригодным к использованию.

Анализ точности метода. Необходимо отметить, что результаты расчетов серьезно зависят от точности исходных данных. Использованные здесь значения скорости вычислены по данным трека, записанного приемником спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС модели GARMIN eTrex 30. Трек содержит координаты мест нахождения приемника – широту и долготу в градусах с десятью знаками после запятой. Записи в треке приведены с шагом в одну секунду. Однако при переходе от угловых мер к линейным использованы масштабы с шестью знаками после запятой. Значения их зависят от принятой модели геоида и в любом варианте приближительны и округлены. Расстояния между соседними точками вычислялись по теореме Пифагора. Интервал времени во всех дальнейших расчетах принимался равным 1 с, хотя на самом деле мог составлять, например, 1,00000224 или 0,99999360. Диаграммы скорости $v(t)$ строились путем аппроксимации полученных рядов значений полиномами (от третьей до шестой степени) в редакторе MS Excel, диаграммы замедлений – дифференцированием уравнений аппроксимации $v(t)$. Все указанные операции сопровождались потерей точности, в результате не удавалось получить одно конкретное значение замедления. Seriously влияет на результат расчета замедления выбор метода аппроксимации. В показанном на рис. 4 случае была выбрана полиномиальная аппроксимация и значение $j = 0,1342$ при заданной скорости $v = 28,8$.

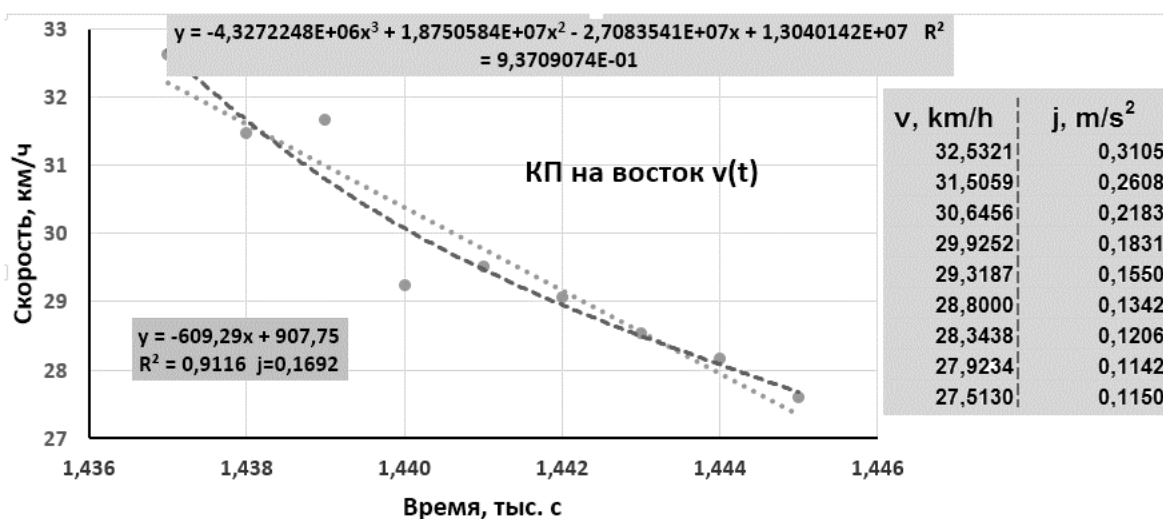


Рис. 4 – Влияние выбора метода аппроксимации на результат расчета замедления

Погрешность расчетов резко увеличивалась из-за неопределенности показателей массы и сил. В силу сказанного приведенные здесь значения показателей следует рассматривать как чисто оценочные.

Но приводимые в литературе данные ненамного точнее. Так, объявляемые значения коэффициента сопротивления воздуха C_x получают в аэродинамической трубе на ОДНОЙ высокой скорости, например, 144 км/ч и неявно распространяют на все скорости, хотя на самом деле при этом может возникать ошибка в 10 % [8]. Разные трубы оценивают C_x одного и того же автомобиля с расхождением до 9 % [9]. На дороге C_x может быть больше измеренного в трубе на 5...13 %.

Коэффициент сопротивления качению европейские изготовители шин должны указывать на этикетке – но не числом, а классом. Класс А – $RRC \leq 6.5$ (т.е. $0,0065$), класс В $6.6 \leq RRC \leq 7.7$, класс С $7.8 \leq RRC \leq 9.0$, класс Е $9.1 \leq RRC \leq 10.5$, класс F $10.6 \leq RRC \leq 12.0$, класс G $RRC \geq 12.1$ ($RRC = \text{Rolling Resistance Coefficient}$). Даже если не вспоминать вариацию показаний шинного стенда, следует учитывать, что разница этого показателя у шин для одного и того же автомобиля может достигать до 50% и что в конце жизненного цикла шины ее сопротивление качению снижается на 25% по сравнению с новой шиной (данные фирмы Michelin).

Ветер – нестабильное явление. За три секунды его скорость может измениться в два раза, а направление – на 120° . Не случайно в метеоданных ее указывают только в целых числах, причем не оговаривают высоту.

Описанный метод дает по меньшей мере сопоставимую точность с привязкой к конкретному объекту с его конкретной высотой центра давления, конкретному времени, конкретным погодным условиям – и без дорогих испытательных средств.

Вывод. Предложен и проверен экспериментально способ определения скорости и направления ветра, а также коэффициентов сопротивления качению и воздуха по замедлениям двух пар выбегов в прямом и обратном направлениях на двух пересекающихся участках дороги. У автомобиля Lanos коэффициент сопротивления воздуха на дороге близок к 0,38, коэффициент сопротивления шин Белшина Artmotion 185/60 R14 82H по асфальтобетону в хорошем состоянии – 0,0118. Средняя скорость ветра на уровне центра давления за время эксперимента варьировала от 1,8 до 3,7 м/с.

Литература:

1. Münch Kai-Uve Determination of air drag coefficient of a car by means of coasting / [Электронный ресурс] Режим доступа: [www.zeszyty.waw.pl/artykuly/zn5\(91\)2012/027-032.pdf](http://www.zeszyty.waw.pl/artykuly/zn5(91)2012/027-032.pdf)
2. BOSCH. Автомобильный справочник: Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.
3. The Pneumatic Tire / U.S. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration. DOT HS 810 561 2006. 707 P. / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nhtsa.gov/staticfiles/safecar/pdf/PneumaticTire_HS-810-561.pdf
4. Измерение аэродинамического сопротивления движению автомобиля дорожным методом / Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А., Никитин Д.В. // МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. "МЕТРОЛОГІЯ–2012" –9–11 жовтня 2012 р., Харків: наук. праці. – Харків: ННЦ "Інститут метрології", 2012. –С. 390-393.
5. Восстановление картины ветра по измеренным параметрам выбега автомобиля / Волков В.П., Рабинович Э.Х., Буравцев М.Х., Тарасов С.П., Замай Я.Н. // Укр. метрологічний журнал. – 2016. – №2. – С. 21–28.
6. Тормозной стенд Beissbarth BD600 – Beissbarth в Украине // [Электронный ресурс] Режим доступа: www.beissbarth.kiev.ua/bd600.html

7. Рабинович Э.Х. Определение сопротивлений движению автомобиля методом однократного выбега / Э.Х. Рабинович, З.Э. Кемалов, А.В. Сосновыи // Автомоб. транспорт: Сб. науч. трудов.–Харьков, ХНАДУ.–2008.– вып. 22.– С. 46-48.
8. Петрушов В. А. Автомобили и автопоезда. Новые технологии исследования сопротивлений качению и воздуха. – М.: Торус Пресс, 2008.
9. Технология аэродинамической трубы для болидов Формулы 1 <http://userdocs.ru/matematika/12141/index.html?page=7>

Summary

Rabinovich E.Kh., Zdebsky K.Yu. Conditions of wheeled machine motion on horizontal surface evaluation on coasting deceleration

In everyday usage and in the testing of transport and technological wheeled machines, it becomes necessary to quantify the actual driving conditions of this particular machine: the wind direction and speed v_w , the coefficient of air resistance C_d and coefficient of rolling resistance C_{rr} . The values obtained in the wind tunnel, on a tire stand with a large diameter drum, at the nearest meteorological station, may be far from the particular case under investigation or simply inaccessible. Therefore, in this study, the task is to justify the methodology for determining these indices from the machine output, preferably without expensive equipment and excessive labor, time and money.

In the article, it is suggested to evaluate the joint impact of weather conditions and resistance to motion on the data of the wheeled machine coasting in two opposite directions. The method of calculating the required indices is justified. A real example is presented – a coasting of a Daewoo Lanos sedan (notchback) with Belshin tires Artmotion 185/60 R14 82H on a horizontal road, two adjacent sections of which are located at an angle of 53° . When processing the experimental data, the dependence of the rolling resistance on speed is described by the second degree polynomial, the air resistance is described by the conventional quadratic function, and the transmission idling losses – by the linear function. The solution of the system of two equations with two unknowns gave an average value of $C_d = 0.38$ (according to unofficial manufacturer's data – 0.375), the average value of $C_{rr} = 0.0117$ (there is no data for comparison, but judging from the literature data such a value is possible). The average estimated wind speed at the height of the pressure center at the beginning of the experiment was 1.9 m/s, after 80 minutes – 3.56 m/s. Measurement with anemometer at an altitude of 0.9 m showed at the same time's intervals 2.19 ± 1.2 m/s and 3.97 ± 0.86 m/s. Thus, the described method yields results linked to a specific object under specific conditions and comparable to data from specialized measuring means, but does not require the use of expensive equipment, highly qualified experts and excessive time, labor and finance.

Keywords: wheeled machine. coasting, speed, deceleration, DAEWOO Lanos, wind, coefficient, rolling resistance, air resistance. calculation

References

1. Munch Kai-Uve Determination of air drag coefficient of a car by means of coasting / [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: [www.zeszyty.waw.pl/artykuly/zn5\(91\)2012/027-032.pdf](http://www.zeszyty.waw.pl/artykuly/zn5(91)2012/027-032.pdf)
2. BOSCH. Avtomobilnyj spravochnik: Per. s angl. – 2-e izd., pererab. i dop. – М.: ZAO «KZhI «Za rulem», 2004. – 992 s.
3. The Pneumatic Tire / U.S. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration. DOT HS 810 561 2006. 707 P. / [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://www.nhtsa.gov/staticfiles/safecar/pdf/PneumaticTire_HS-810-561.pdf

4. Izmerenie aerodinamicheskogo soprotivleniya dvizheniyu avtomobilya dorozhnym metodom / Rabinovich E.H., Volkov V.P., Belogurov E.A., Nikitin D.V. // METROLOGIYA TA VIMIRYUVALNA TEHNIKA: VIII Mizhnar. nauk.-tehn. konf. "METROLOGIYA-2012" —9–11 zhovtnya 2012 r., Harkiv: nauk. praci. — Harkiv: NNC "Institut metrologiyi", 2012. —S. 390-393. 51.
5. Vosstanovlenie kartiny vetra po izmerennym parametram vybega avtomobilya / Volkov V.P., Rabinovich E.H., Buravcev M.H., Tarasov S.P., Zamaj Ya.N. // Ukr. metrologichnij zhurnal. — 2016. — №2. — S. 21–28.
6. Tormoznoj stend Beissbarth BD600 – Beissbarth v Ukraine // [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: www.beissbarth.kiev.ua/bd600.html
7. Rabinovich E.H. Opredelenie soprotivlenij dvizheniyu avtomobilya metodom odnokratnogo vybega / E.H. Rabinovich, Z.E. Kemalov, A.V. Sosnovyj // Avtomob. transport: Sb. nauch. trudov.–Harkov, HNADU.–2008.– vyp. 22.– S. 46-48.
8. Petrushov V. A. Avtomobili i avtopoezda. Novye tehnologii issledovaniya soprotivlenij kacheniyu i vozduha. — M.: Torus Press, 2008.
9. Tehnologiya aerodinamicheskoy trubyy dlya bolidov Formuly 1 <http://userdocs.ru/matematika/12141/index.html?page=7>)