



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЮ АВТОМОБИЛЯ ПО НЕПОЛНЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫБЕГА

Э.Х. Рабинович, кандидат технических наук, доцент Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ)
В.А. Иршенко, студент ХНАДУ, г. Харьков
А.С. Перов, студент ХНАДУ, г. Харьков



Э.Х. Рабинович



В.А. Иршенко



А.С. Перов

Предложен прошедший предварительную проверку метод оценки коэффициентов сопротивления движению автомобиля C_x и f по неполным результатам измерений выбега, например, по пути выбега от 120 до 50 км/ч и от 50 км/ч до остановки.

Ключевые слова: путь выбега S , 120–50–0 км/ч, аналогии, восстановление полной диаграммы $S(t)$, полином 4 степени, оценка, коэффициенты сопротивления воздуха C_x и качения f .

The method which has passed the preliminary verification for estimating the coefficients of vehicle movement resistance C_x and f is proposed based on the incomplete results of measurements of running-out, for example, on the line of running-out from 120 to 50 km/h and from 50 km / h up to the stop is proposed.

Keywords: coasting path S , 120–50–0 km/h, analogies, restoration of the full diagram $S(t)$, polynomial of the 4th degree, estimation, air drag C_d and rolling resistance C_{rr} coefficients.

Введение

Для расчета динамики автомобиля нужно знать коэффициенты сопротивления воздуха C_x и сопротивления качению f . Считается, что самые точные

сведения о C_x дает продувка в аэродинамической трубе. Это не так. Во-первых, в трубе измеряют силу сопротивления воздуха на одной высокой скорости, например, 40 м/с (144 км/ч), а C_x вычисляют при допущении о квадратичной зависимости сопротивления воздуха от скорости. Неспециалисты полагают, что C_x — это константа и будет таким же на всех скоростях. И то, и другое неточно. Во-вторых, в трубе обтекание автомобиля воздухом моделируется частично — в большинстве автомобильных труб колеса не вращаются, пол неподвижен. Из-за этого продувка показывает сопротивление воздуха на 5...10 % меньше, чем на дороге.

Дорожные испытания свободны от этих недостатков. Но для них требуется горизонтальный прямой участок дороги длиной хотя бы 2 км, небольшая интенсивность движения и погода — плюсовая температура, отсутствие осадков, слабый ветер. Все это ограничивает возможность проведения испытаний на дороге и тем самым повышает их ценность.

Анализ публикаций

Известен [1] метод вычисления коэффициентов сопротивления воздуха C_x и суммарного дорожного сопротивления ψ (на гладкой дороге — сопротивления качению f) по замедлениям выбега j_1 и j_2

Таблица 1

Аппроксимирующие полиномы зависимостей коэффициента сопротивления качению от скорости

Шины HR — ZRT	Верхняя граница поля	$0,6762 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 + 1,5214 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,014010$
	Средняя линия поля	$0,9619 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 + 0,6057 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,013261$
	Нижняя граница поля	$1,2476 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 0,3071 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,012510$
Шины SR, TR	Верхняя граница поля	$3,1124 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 1,2543 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,013601$
	Средняя линия поля	$2,2571 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 0,8471 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,012467$
	Нижняя граница поля	$1,4019 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 0,4400 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,011334$
Шины ECO	Верхняя граница поля	$1,3562 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 0,7543 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,012484$
	Средняя линия поля	$1,4552 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 0,9029 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,010526$
	Нижняя граница поля	$1,5543 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 1,0514 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0,008569$

при скоростях v_1 и v_2 автомобиля массой m с лобовой площадью F (формулы оригинала переписаны в принятых у нас обозначениях):

$$C_x = \frac{6 \cdot m \cdot (j_1 - j_2)}{F \cdot (v_1^2 - v_2^2)}; \psi = \frac{28,2 \cdot (j_2 \cdot v_1^2 - j_1 \cdot v_2^2)}{10^3 \cdot (v_1^2 - v_2^2)}$$

Метод рекомендован для скоростей до 100 км/ч. В работе [2] предложены дополнения, снимающие это ограничение и повышающие точность: введены в явном виде плотность воздуха ρ в кг/м³ и коэффициент учета вращающихся масс автомобиля δ , а главное — предложенный авторами коэффициент K_V , оценивающий ожидаемое изменение коэффициента сопротивления качению при увеличении скорости от v_2 до v_1 :

$$C_x = \frac{2 \cdot \delta \cdot m \cdot (j_1 - j_2 \cdot K_V)}{F \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2 \cdot K_V)}; \psi = \frac{\delta \cdot (j_2 \cdot v_1^2 - j_1 \cdot v_2^2)}{g \cdot (v_1^2 - v_2^2 \cdot K_V)}; \quad (1)$$

$$K_V = \frac{A \cdot v_1^2 + B \cdot v_1 + C}{A \cdot v_2^2 + B \cdot v_2 + C},$$

где A, B, C — коэффициенты аппроксимирующего полинома для зависимости $\psi(v)$ (см. табл. 1).

Дальнейшие исследования [3, 4] выявили, что показатель степени n при скорости в формуле

сопротивления воздуха вообще и в формуле (1) в частности равен 2 лишь в среднем. Если же считать C_x постоянным для данного автомобиля, то n есть функция скорости и может быть оценен по приведенным на рис. 1 аппроксимирующим формулам.

Все описанные усовершенствования улучшают математическую модель и метод определения коэффициентов, но не делают его идеальным. Так, выявлена зависимость результатов от выбора скоростей v_1 и v_2 [5]. Показано, что наилучшие результаты дает сочетание $v_1=103...123$ км/ч и $v_2=27...39$ км/ч. И разумеется, надежность результатов самым серьезным образом зависит от качества исходных значений.

Однако проверки на дорогах общего пользования нужного качества не дают, а полигонные тесты для вузовских или частных исследователей недоступны. Профессиональные испытания на автополигонах выполняются по заказам и их результаты не публикуются. Остается доверять журналам, которые проводят собственные испытания и публикуют их результаты. В настоящее время — это “Авторевю” и “За рулем”.

К сожалению, их статьи не дают полной картины сопротивлений. “Авторевю” приводит неполные результаты измерений: пути выбега от 160 до 80 км/ч, от 130 до 80, от 50 до остановки — но без пути от 80 до 50 км/ч (а иногда — только 130-80 и 50-0). “За рулем” дает еще меньше значений: от 120 до 50 км/ч и от 50 до нуля. В работе [6] предложен метод подбора значения пути 80-50 км/ч по критерию наименьших квадратов который позволил строить полную диаграмму выбега (ВП, v_p) по данным “Авторевю” и вычислять по ней коэффициенты сопротивлений.

Задача исследования и предлагаемый метод ее решения

Задача исследования — разработать метод оценки коэффициентов сопротивления воздуха и сопротивления качению по неполным результатам измерения пути выбега, публикуемым в жур-

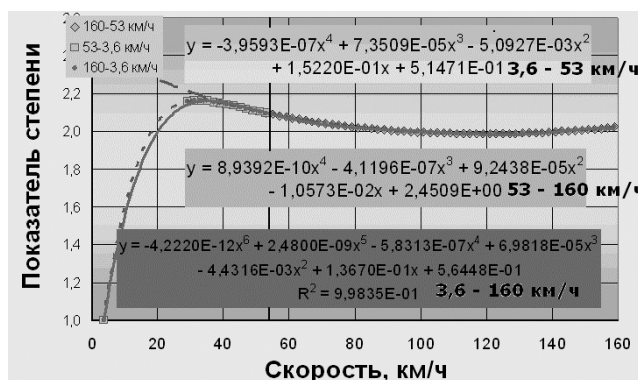


Рис. 1. Расчетная зависимость показателя степени n от скорости, усредненная по 84 моделям легковых автомобилей разных классов [3]

нале “За рулем”. В основу предлагаемого метода решения этой задачи положены три допущения:

- диаграммы выбега автомобилей, полученные разными группами экспертов, подобны по конфигурации при условии метрологической сопоставимости методик этих групп;
- диаграмма выбега, получаемая по данным “Авторевю” путем подбора недостающего значения пути выбега от 80 до 50 км/ч, достаточно точна;
- кривизна диаграммы на отдельных участках хорошо коррелирует с соотношением измеренных значений пути 120-50 (S_1) и 50-0 (S_2):

$$X1/2 = S_1 / S_2.$$

Введен показатель “доля” (D) — часть измеренного пути выбега от первой скорости до второй, прямо пропорциональная соответствующей части этого диапазона скоростей. Пусть, например, изучается выбег от 50 км/ч до остановки. Путь по полной диаграмме выбега $S_{50вр} = 2064,9$; $S_{0вр} = 2764,9$; путь от 50 до 0 $S_2=700$ м. Доля точки 38 км/ч в этом пути S_2 , то есть часть пути выбега от 50 до 38 км, пропорциональная доле интервала 50–38, $D = 700(50-38) / 50 = 168$ м.

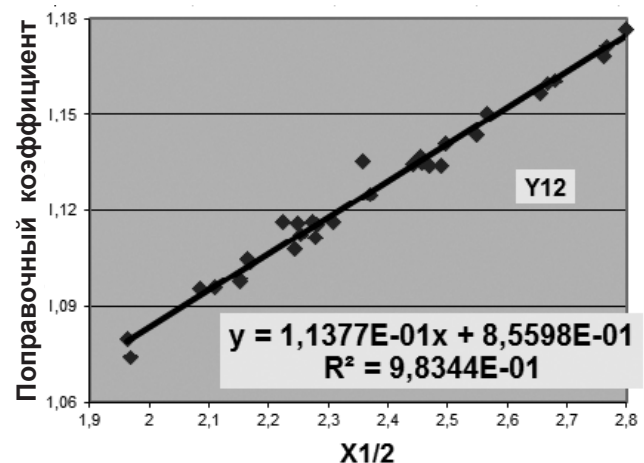
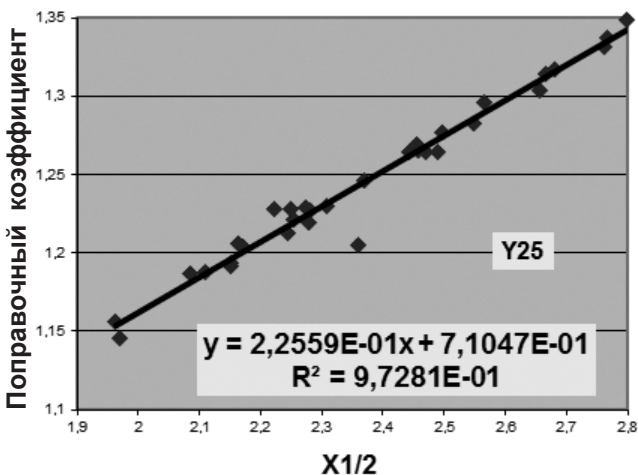
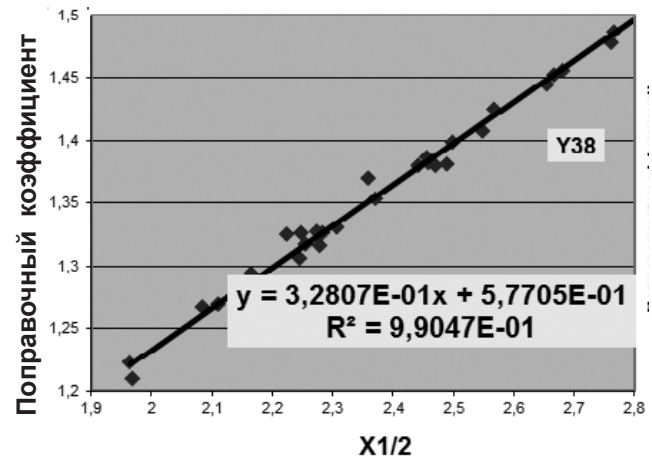
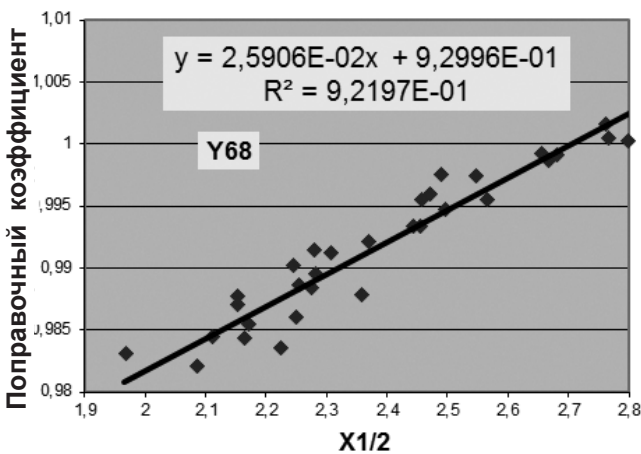
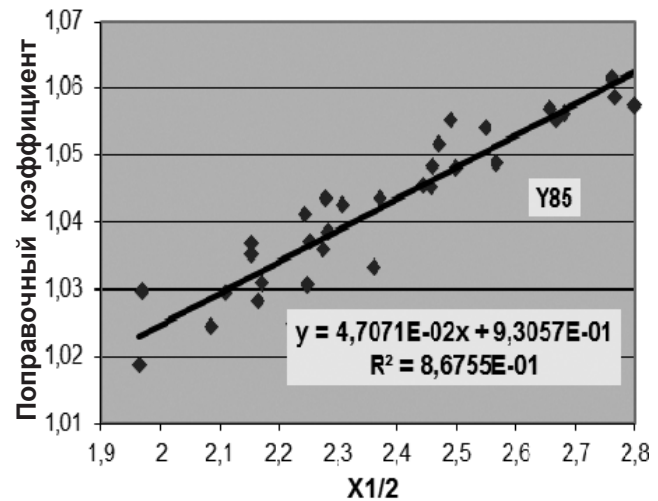
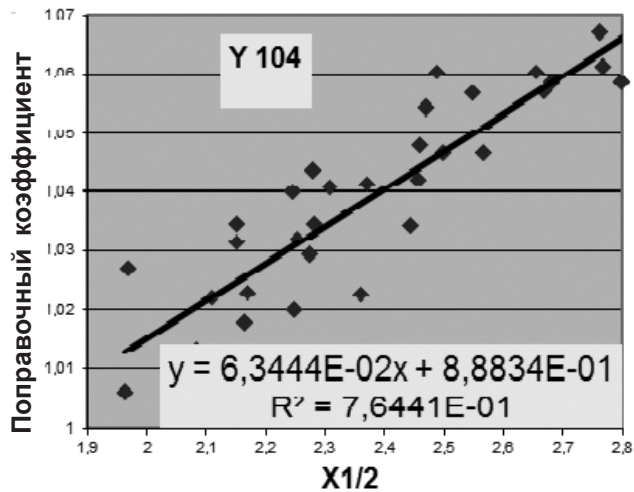


Рис. 2. Поправочные коэффициенты Y для характерных скоростей

Фактический путь выбега до 38 км/ч по полной диаграмме $S_{38vp}=2270,359$, в том числе на участке $50-0-2270,359-2064,9 = 205,459$. Чтобы перейти от доли к предполагаемому значению пути, нужно использовать поправочный коэффициент $Y_{38} = 205,459 / 168 = 1,22297$.

Аналогично рассчитаны поправочные коэффициенты Y_i для скоростей 104, 85, 68, 25, 12 км/ч по 32 автомобилям разных типов: седанам, хэтчбекам, кроссоверам, кабриолетам, а также седанам и купе премиум-класса. Построены поля массивов $Y_i(X1/2)$, аппроксимированы линейной функцией (рис. 2).

Как видно из диаграмм, в большинстве случаев $R>0,9$. Такая степень корреляции поправочных коэффициентов с показателем $X1/2$ говорит о близости к функциональной зависимости, чем подтверждается принятое допущение. Вариация несколько выше на высоких скоростях, но там меньше размах — разность между наибольшим и наименьшим значениями.

Предложенный метод проверен по данным седана Lada Priora. Этот автомобиль испытан не раз, надежно установлен коэффициент сопротивления воздуха $C_x=0,32$. Лобовая площадь принята как у VA3-2110—1,93 м². Данные тестового автомобиля Priora взяты из статьи [7]: снаряженная масса 1078 кг, загрузка 200 кг, шины Cordiant Standart 185/65 R1486H, $S_{160-80}=1416$ м, $S_{130-80}=956$ м, $S_{50-0}=595$ м, $\delta=1,0313$ (наш расчет). Из полной диаграммы выбега взяты значения: $v_1=113$, $j_1=0,457553$; $v_2=27$, $j_2=0,164597$. Результаты расчета: $C_x=0,3749$ ($0,3749/0,32=1,1716$, то есть расхождение с номинальным значением 17,2 %); $f=0,0143$. Как уже упоминалось, в аэродинамической трубе сопротивление воздуха на 5...10 % меньше, чем на дороге. Расхождение 17,2 % выходит за эти пределы (как и у большинства проверенных нами автомобилей). Заметим, что другие варианты расчета, например, по [6], тоже показывали чрезмерное превышение расчетного значения C_x над номинальным.

Значение коэффициента сопротивления качению $f=0,0143$ при скорости 27 км/ч довольно близко к верхней границе поля возможных значений для скоростных шин категорий V, H и т. п., но не выходит за эту границу.

Известно, однако, что движению автомобиля при выбега препятствуют также потери холостого хода трансмиссии. Когда исходные значения замедлений были уменьшены на величину парциального замедления от этих потерь (рассчитано по аналогии с VA3-2105 [8]), результаты заметно изменились: $C_x=0,3470$ (расхождение с номинальным 8,4 %); коэффициент сопротивления качению снизился почти до нижней границы — $f=0,01294$.

Те же показатели рассчитаны по предлагаемой методике (табл. 2).

По рассчитанным значениям пути выбега S_{calc} построена и аппроксимирована полиномом 4-й степени диаграмма выбега $S(v)$ (рис. 3).

Далее по уравнению аппроксимации рассчитаны длительности интервалов t_i и средние замедления на интервале j_i :

$$t_i = \frac{S_{i+1} - S_i}{0,5 \cdot (v_{i+1} + v_i)}; \quad j_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{3,6 \cdot t_i}.$$

Получены замедления 0,4159 при 113 км/ч и 0,1465 при 27 км/ч. По ним определены искомые коэффициенты: $C_x=0,3455$ и $f=0,01248$ (в варианте программы с переменным показателем степени при скорости в формуле сопротивления воздуха [4]). Расхождение расчетного C_x с номинальным составляет 8 %, а с расчетом по ВП — минус 0,4 %.

Затем была проверена применимость методики к данным из журнала “За рулем” [9]: 1069 кг, $S_{120-50}=1410$ м, $S_{50-0}=618$ м, $\delta=1,02955$. Получены значения $C_x=0,31307$ и $f=0,01205$. Расхождение расчетного C_x с номинальным составило 2,2 %, а с расчетом по ВП — минус 9 %.

Проверено предположение, что точность можно повысить, если включить в исходный массив только

Таблица 2

Lada Priora: Расчет по предлагаемой методике

				X1/2	2,223491	
	Svp-S120vp	Svp-S50vp	D	Y	D*Y	S _{calc}
120	0		0	1	0	0
104			302,395	1,029407	311,29	311,29
85			661,489	1,035232	684,79	684,79
68			982,783	0,987562	970,56	970,56
50	1322,977		1322,98	1	1322,98	1322,98
38			142,8	1,306511	186,57	1509,55
25			297,5	1,153448	343,15	1666,13
12			452,2	1,108947	501,47	1824,44
0	1917,977	595	595	1	595	1917,98

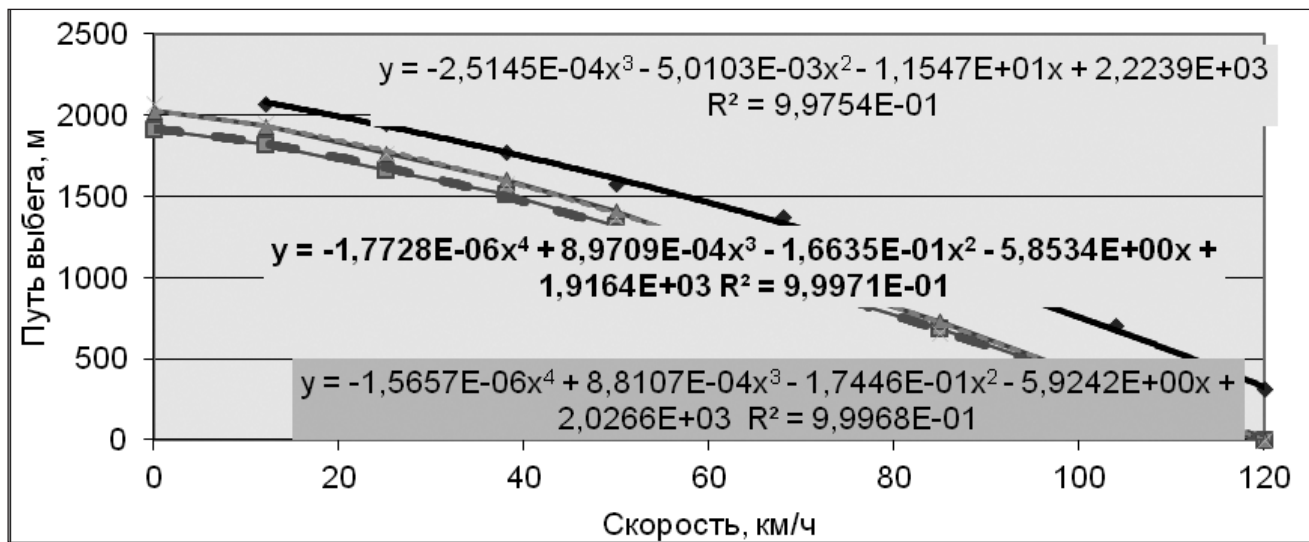


Рис. 3. Полная диаграмма выбега Priya по данным “Авторевю” (сплошная линия) и две диаграммы выбега, рассчитанные предлагаемым методом: по данным “Авторевю” (штриховая) и по данным “За рулем” (треугольные маркеры)

автомобили той же группы, что и рассматриваемый, в данном случае — средние седаны и хэтчбеки. По данным “Авторевю” получено $C_x=0,3179$ (расхождение с номинальным 0,66 %, с расчетом по ВП — минус 8,4 %) и $f=0,01333$. Расчет по данным “За рулем” дал $C_x=0,28703$ (расхождение с номинальным минус 10,3 %, с расчетом по ВП — минус 17,3 %) и $f=0,01295$.

Итак, предложенный метод дает удовлетворительные результаты при использовании общих поправочных коэффициентов, несколько худшие — если поправочные коэффициенты вычислены только по средней группе (в ее нынешнем объеме).

Аналогичные расчеты выполнены еще для некоторых автомобилей. Везде принята нагрузка 200 кг (два человека, оборудование, вещи). Значения коэффициента учета вращающихся масс рассчитаны по формуле

$$\delta = 1 + m_{\text{пр.кпр}} / m_a; \quad m_{\text{пр.кпр}} = (4,6 \cdot I_k + 0,1) / r_k^2,$$

где $m_{\text{пр.кпр}}$ — приведенная к контакту ведущего колеса с дорогой масса 4 колес, трансмиссии (0,6 от момента инерции колеса I_k) и двух тормозных дисков (барабанов) со ступицами (момент инерции принят 0,1 кг·м²); m_a — масса автомобиля во время теста (снаряженная масса плюс 200 кг); r_k — кинематический радиус (радиус качения при отсутствии крутящего момента на колесе), м.

Момент инерции колеса рассчитывался по [10].

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Некоторые данные автомобилей помечены буквами “оц” — эти значения не найдены в литературе и приняты авторами по своей оценке.

Результаты расчета, как правило, не выходят за пределы допустимых расхождений. Однако значения C_x по очень нужным массовым автомобилям Lanos, Kalina, Forza явно занижены. Причина, скорее всего, — в ошибочных результатах замеров в публикации [14].

Выводы и направления дальнейших исследований

1. Предложен метод оценки коэффициентов сопротивлений движению автомобиля, включающий в себя:

- сбор статистики по отклонениям полной диаграммы выбега в характерных точках от значений D , получаемых линейной интерполяцией;
- линейную аппроксимацию зависимостей каждого из указанных отклонений от соотношения выбегов 120-50 км/ч и 50-0 км/ч;
- вычисление ожидаемых значений расчетной диаграммы выбега, ее построение и аппроксимацию полиномом 4–6 степени;
- расчет по уравнению аппроксимации ожидаемых значений замедления выбега при нужных скоростях, например, 113 и 27 км/ч;
- вычисление по этим замедлениям ожидаемых значений коэффициентов сопротивления воздуха и сопротивления качению.

2. Выполнены операции, перечисленные в п. 1, по 32 автомобилям разных типов и отдельно по 17 средним седанам и хэтчбекам, выбранным из того же массива.

3. Расчет коэффициентов сопротивления по опубликованным в журнале “За рулем” значениям выбегов 120-50 и 50-0 км/ч по всему массиву и только по средней группе для двух седанов и одного кроссовера и сопоставление их с известными значениями коэффициентов для этих автомобилей показал, что расхождение коэффициента сопротивления воздуха укладывается в установленные пределы 5...10 %, а значения коэффициента сопротивления качению не выходят за границы поля возможных значений.

4. Описанная предварительная проверка подтвердила возможность использования предлагаемого метода для вычисления коэффициентов сопротивлений движению по опубликованным результатам измерения пути выбега автомобиля от 120 до 50 км/ч и от 50 км/ч до остановки.

5. Одна из публикаций дала нереальные результаты расчета, судя по всему, ошибочные.

Таблица 3

Результаты расчета коэффициентов сопротивлений для некоторых моделей автомобилей

Модель автомобиля	Ford Focus II sed	Kia Rio sed	Ford Kuga	ZAZ Lanos	Lada Kalina	ZAZ Forza
C_x номинал	0,32	0,31	0,379	0,33 оц	0,378	
Лоб площадь ном	2,12	2,09 оц	2,59	2 оц	2,14 оц	2,1 оц
Данные АР (источник)	№ 202010 [11]					
Масса снаряж + 200	1464	1312				
Шины	*	**				
К-т Дельта	1,0324	1,029				
S160–80	1491	1319				
S130–80	990	856				
S50–0	700	595				
По ВП: C_x	0,37876					
Расх. с ном %	18,36					
По ВП: Пси	0,010685					
Общ. к-ты: C_x	0,37443					
Расх. с ном %	17,01					
Расх. С ВП	-1,14					
Пси	0,01072					
Групп. к-ты: C_x	0,3594					
Расх. с ном %	12,31					
Расх. С ВП	-5,11					
Пси	0,010966					
Данные ЗР (источник)	№ 122005 [12]		№ 112008 [13]	УЗР 82011 [14]		
Масса снаряж + 200	1475	1337,5	1886	1284	1291	1399
Шины		175/70 R14	235/55 R17	185/60 R14	175/65 R14	185/55 R15
К-т Дельта	1,0324	1,0284	1,0414	1,0273	1,0274	1,0265
S120–50	1506	1241	1260	1453	364	1564
S50–0	777	544	579	695	652	702
Общ. к-ты: C_x	0,32674	0,329515	0,421113	0,295174	0,29682	
Расх. с ном %	2,11	6,30	11,11	-10,55	-21,48	
Расх. С ВП	-13,73					
Пси	0,009352	0,013864	0,013128	0,010864	0,01167	
Групп. к-ты: C_x	0,33305	0,322267		0,295321		0,26797
Расх. с ном %	4,08	0,71		-10,51		
Расх. С ВП	-12,07					
Пси	0,009539	0,01491		0,01086		0,01104

* Michelin Energy 195/65 R15

** Hankook Centum K702175/70 R14

Поэтому каждый выполненный расчет следует завершать оценкой достоверности результата.

6. Направления дальнейших исследований включают в себя:

- существенное увеличение массива исходных данных полного выбега и разбивку его на характерные группы: средние, гранды (дорожные легковые ав-

томобили с двигателем более 3 л), джипы (кроссоверы и внедорожники), мелкие (автомобили с пропорциями “коробочек”) и фургоны (пассажиры и грузопассажиры);

- анализ целесообразности описанной разбивки;
- расширение методики на случаи неполных данных “Авторевю” (130-80 и 50-0 км/ч).

Список литературы

1. BOSCH. Автомобильный справочник: пер. с англ. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: ЗАО "КЖИ "За рулем", 2004. 992 с.
2. Рабинович Э.Х., Кемалов З.Э., Сосновый А.В. Определение сопротивлений движению автомобиля методом однократного выбега // Автомобильный транспорт: сб. науч. трудов. Харьков: ХНАДУ, 2008. Вып. 22. С. 46–48.
3. Нікітін Д.В. Обґрунтування параметрів дорожнього діагностування автомобілів: кваліфікаційна робота магістра. Харків: ХНАДУ, 2012. 75 с. (Рукопис).
4. Волков В.П., Рабинович Э.Х., Белогуров Е.А. Сопротивление движению легкового автомобиля на скоростях 30...160 км/ч // Міжвуз. збірник (за галузями знань "Машинобудування та металообробка", "Інженерна механіка", "Металургія та металознавство"). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. Вип. 36. С. 46–51.
5. Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А., Никитин Д.В. Измерение аэродинамического сопротивления движению автомобиля дорожным методом // Метрологія та вимірювальна техніка: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. "Метрологія-2012" [Електронний ресурс]: наук. праці. Харків: ННЦ "Інститут метрології", 2012. С. 390–393. 1 CD-ROM.
6. Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А. Оценка коэффициентов сопротивлений движению автомобиля по пути выбега // Український метрологічний журнал. 2010. № 4. С. 47–52.
7. Диваков А., Карин П. Спорим? Проверка на дорогах Daewoo Nexia, Lada Priora, Geely MK // Авторевю. 2008. № 19.
8. Рабинович Э.Х., Волков В.П., Зуев В.А., Никитин П.А. Измерение момента инерции и сопротивлений холостого хода трансмиссии автомобиля ВАЗ-2105 методом выбега // Метрологія та вимірювальна техніка: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. "Метрологія-2012" [Електронний ресурс]: наук. праці. Харків: ННЦ "Інститут метрології", 2012. С. 394–397. 1 CD-ROM.
9. Воскресенский С. Бюджетный интернационал. Тест Daewoo Nexia, Geely MK, Lada Priora // За рулем. 2008. № 10. С. 64–72.
10. Рабинович Э.Х., Зуев В.А. Учет моментов инерции автомобильных колес в задачах диагностики тормозных и тяговых свойств // Транспорт, экология — устойчивое развитие: сб. материалов XIII науч.-техн. конф. с международным участием "ЕКОВАРНА'2007". Варна: Технический университет, 2007. С. 709–715.
11. Арутин В., Диваков А. Классовая борьба. Проверка на дорогах VW Polo, Ford Focus, Renault Logan, Kia Rio // Авторевю. 2010. № 20. С. 33–44.
12. Гзовский М. В споре с авторитетами. Тест Kia Rio, Chevrolet Lacetti, Ford Focus // За рулем. 2005. № 12. С. 66–74.
13. Воскресенский С. Экспресс на Мышкин. Тест Renault Koleos, Ford Kuga, VW Tiguan // Там же. 2008. № 11. С. 28–38.
14. Гзовский М. Вам любоваться или ездить? ZAZ Forza, Lada Kalina, ZAZ Lanos // Украина за рулем. 2008. № 11. С. 14–23.