

## АНАЛИЗ ВЫБЕГА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ БЛИЗКИХ СКОРОСТЕЙ

**В.П. Волков,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ)

**Э.Х. Рабинович,** кандидат технических наук, доцент ХНАДУ, г. Харьков

**Ю.В. Зыбцев,** старший преподаватель ХНАДУ, г. Харьков

**Д.В. Никитин,** аспирант, ХНАДУ, г. Харьков



В.П. Волков



Э.Х. Рабинович



Ю.В. Зыбцев



Д.В. Никитин

*Показано, что для проверки легковых автомобилей выбегом с 50 км/ч до остановки требуется горизонтальный участок дороги длиной более 750 м, который не всегда доступен. Внесены изменения в известный метод анализа выбега. Выведены эмпирические формулы для сопротивлений воздуха и качения, которые позволяют рассчитать путь и время выбега намного точнее, чем классические.*

*The article shows that inspection of cars by coasting from 50 km/h to a stop requires a horizontal section of road length of 750 m, which is not always available. By changes in the known method of analysis we derived empirical formulas for air and rolling resistance, which allows calculating the etalons of path and time of coasting far more accurate than classical method.*

### Введение

Путь выбега автомобиля со скорости 50 км/ч — один из немногих доступных рядовому пользователю параметров дорожной проверки. Да и то с оговорками: а чем его измерять? Одометром? А как уловить начало выбега? Как одновременно уследить за спидометром, поддерживая скорость 50 км/ч, за дорогой (вот тот столбик, от которого нужно начинать выбег), за одометром и вовремя выжать педаль сцепления... И в конце остается грубая индикация пути одометром — шаг 100 м. Не случайно мы рекомендовали измерять не путь, а время выбега [1]: в этом случае снимаются все трудности и остается только погрешность засечки времени.

### Анализ публикаций

Во многих инструкциях по эксплуатации автомобилей предписывается путь выбега с 50 км/ч не менее 500 м (а в некоторых — даже 420 м). Соответствующее время выбега составит приблизительно 76 и 64 с.

Можно встретить такие сведения [2]:

- минимальный выбег должен составлять ~500 метров;
- обычный разброс — 450–700 метров.

Выбег зависит от шин (накачаны — не накачаны, шипы — слики), загрузки, типа авто... Так, у легкой машинки он будет меньше, чем у большого моноприводного седана из-за разной инерции, а у джипа меньше, чем у большого седана из-за потерь в трансмиссии”.

Мнение о “разной инерции” широко распространено, но неверно. Это подтверждают результаты экспериментов (табл. 1).

Как видно из таблицы, решающую роль играет не масса автомобиля, а качество шин. Легкий DAEWOO Matiz на шинах ESO показал время выбега 109,1 с — значительно лучше, чем Волга с большой инерцией, но на всесезонных шинах (86...89 с). У Ланоса на хороших шинах выбег на 32 % больше, чем у ВАЗ-2105 практически такой же массы. Совершенно феноменальный накат продемонстрировал универсал Mercedes-Benz E 300 D, но не из-за массы, которая ненамного больше, чем у Волги с полной загрузкой, а благодаря отличным шинам (да еще не новым, с уменьшенным сопро-

Выбег легковых автомобилей с 50 км/ч (эксперименты ХНАДУ)

Автомобиль	Масса, кг	Время выбега, с	Шины и Cx
DAEWOO Matiz	1111	109,1	ContiEcoContact EP Cx = 0,4
DAEWOO Lanos	1360	124,1	Tigar (фил. Michelin) TG621 Cx = 0,37
BA3-2105	1392	94,3	Belshina Бел-103 Cx = 0,52
ГАЗ-31105 Chrysler	1650	103,2	Nokian Hakka I3 Cx = 0,461
ГАЗ-31105 ЗМЗ	1475	86,6	Vredestein SnowTrac 2 M + S Cx = 0,461
	1650	87,1	
	1890	88,6	
Chery Tiggo монопривод	1625	143,5	GT Radial Champiro 128 Cx = 0,384
BMW 524 TD	1794	101,9	Bridgestone Cx = 0,31
Mercedes-Benz E 300 D	2022	141,7	Continental Premium Contact Cx = 0,28

тивлением качению), великолепной аэродинамике и большому возрасту: с пробегом трущиеся пары в автомобиле прирабатываются и накат улучшается (и, наверное, благодаря мерседесовскому качеству). Еще лучше выбег у Chery Tiggo на индонезийских шинах из натурального каучука (а масса меньше на 400 кг). Итак, даже наихудшее время выбега из приведенных в табл. 1 (82 с) оказалось заметно лучше значения 76 с, соответствующего пути выбега 500 м.

Понять малое влияние массы автомобиля легко. Если бы не было сопротивления воздуха и потерь в трансмиссии, замедление автомобиля  $j$  (м/с<sup>2</sup>) определялось бы только сопротивлением качению:

$$j = \frac{P_f}{\delta \cdot m_a} = \frac{m_a \cdot g \cdot f}{\delta \cdot m_a} = \frac{g \cdot f}{\delta},$$

где  $P_f$  – сила сопротивления качению, Н;  $m_a$  – масса автомобиля, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $f$  – коэффициент сопротивления качению;  $\delta$  – коэффициент учета вращающихся масс.

Таким образом, масса практически не влияет на замедление, вызванное сопротивлением качению.

С другой стороны, сопротивление воздуха не зависит от массы, но сильно зависит от формы автомобиля. У “легкой машинки” аэродинамика обычно хуже, чем у большого седана, поэтому замедление, создаваемое сопротивлением воздуха, у нее выше и выбег соответственно короче.

#### Выбег седана Honda Civic D4 (2006)

В доступных технических характеристиках норма выбега не указана. Но пользователю нужна эта информация. В экспериментах “Авторевю” Civic с автоматической коробкой передач (АКП) показал выбег 631 и 646 м, что соответствует времени примерно 96...98 с.

Мы провели свой эксперимент на горизонтальной дороге с хорошим покрытием [3]. Автомобиль – Honda Civic D4 с АКП. Масса с участниками эксперимента – 1705 кг (по взвешиванию). Шины летние ContiPremiumContact\_2 205/55 R16 91V.

Регистрация параметров выбега выполнялась путем видеосъемки меняющихся показаний спидометра и барьерного ограждения, которое мы использовали как разметку дороги.

Видеозаписи в форматах .mts и .mp4 обрабатывали на компьютере в видеомонтажной программе AVS VideoEditor, в формате .avi – в программе VirtualDub: находили при покадровом просмотре моменты начала и конца индикации одной и той же скорости и строили диаграмму  $v(t)$ , относя значения скорости к середине участка времени от начала до конца индикации. По видеозаписям ограждения строили графики пути  $S(t)$ , которые затем сглаживали полиномами 3-й или 4-й степени, и далее численно дифференцировали, получая диаграммы истинной скорости  $v(t)$  и замедления  $j(v)$ . Здесь использованы именно эти диаграммы. После отбраковки неполных и ненадежных записей осталось восемь кривых (рис. 1, табл. 2). Путь выбега в них варьировал от 591 до 746 м со средним 658 м. Это превышает длину доступных в нашей местности горизонтальных участков дорог (350...500 м), поэтому был предпринят более подробный анализ.

Требовалось найти такой диапазон скоростей, в котором путь выбега не превышал хотя бы 500 м, время было достаточно велико для надежного измерения при ручной засечке, а вариация – достаточно мала. Были оценены общепринятые выборочные показатели: выборочное среднее, размах, дисперсия, стандартное отклонение и коэффициент вариации.

Чтобы снизить требования к длине дороги, можно замерять выбег не до остановки, а до 20 или 30 км/ч. Но в первом случае путь выбега все же превышает 500 м, а во втором заметно больше вклад сопротивления воздуха. Это делает проверку более чувствительной к изменению скорости ветра и менее чувствительной к неисправностям ходовой части и трансмиссии. Лучше ограничивать диапазон сверху. Привлекательно выглядят два варианта: от 40 до 20 км/ч и от 30 до 10 км/ч (табл. 3).

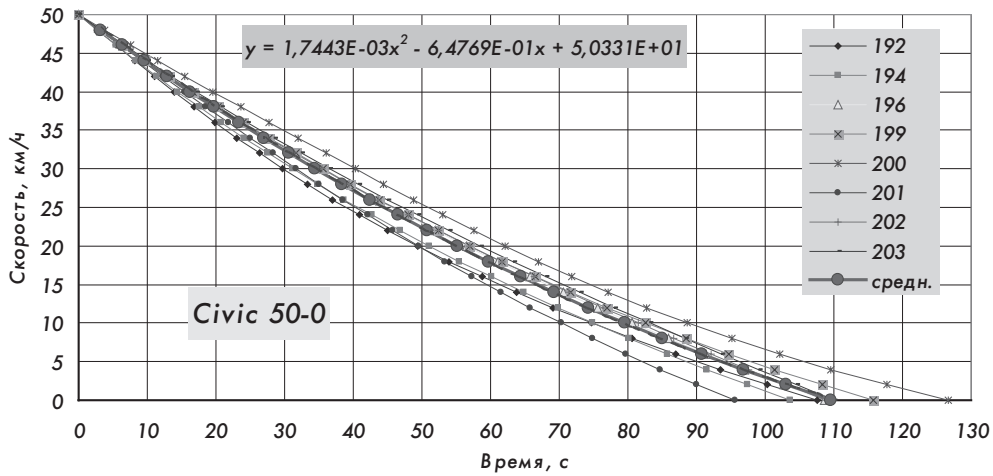


Рис. 1. Диаграммы выбегов автомобиля Honda Civic D4 от 50 км/ч до полной остановки

Таблица 2

Время выбега автомобиля Honda Civic D4 от 50 км/ч до скорости V

Клип	Скорость V, км/ч				
	40	30	20	10	0
192	13,87	29,70	49,38	74,74	107,63
196	16,69	35,35	56,47	80,66	108,60
199	16,69	35,57	56,96	82,61	115,69
200	19,58	40,23	62,12	88,71	126,74
201	15,40	31,61	49,47	70,23	95,58
202	16,56	35,38	56,96	81,48	108,78
203	17,14	36,56	58,55	83,12	110,05
Среднее <i>t</i>	16,28693	34,44496	55,1222	79,55868	109,5863
Размах Δ	5,71	10,53	12,74	18,48	31,16
Дисперсия <i>D</i>	3,181196	11,74634	21,53607	34,65025	81,28929
Станд. откл. σ	1,783591	3,427294	4,640698	5,886446	9,016057
Козф. вариации ν	0,109511	0,099501	0,084189	0,073989	0,082274

Таблица 3

Сравнение показателей двух возможных диапазонов скоростей

Диапазон скоростей, км/ч	От 40 до 20	От 30 до 10
Время выбега, с	38,6	44,9
Путь выбега, м	317,3	242,6
Размах замедления, м/с <sup>2</sup>	0,0723	0,0711

Оба диапазона удобны. Средний путь выбега существенно меньше 500 м. Среднее время выбега достаточно велико, чтобы погрешность, вызванная запаздыванием засечки, например, 0,5 с, не вызвала общую ошибку более 1,5 % (1,3 и 1,1 %). Размах замедления в выборке практически одинаков.

Цифровой спидометр автомобиля Honda Civic индицирует скорость в целых километрах в час, поэтому на дисплее одно значение удерживается довольно долго, а человек может засечь время как

в самом начале, так и в конце периода индикации. Впрочем, после некоторой тренировки ручная засечка оказывается достаточно точной и дает ошибку от 0 до 0,35 с. Погрешности включения и выключения секундомера имеют одинаковый знак, поэтому ошибка разности невелика – 0,1...0,2 с. Вторая особенность цифрового спидометра – спорадические пропуски значений скорости, например, после 40 сразу 38 км/ч, после 33 – 31 км/ч и т.п., что вынуждает повторять замеры.

В описанном выше анализе результатов эксперимента получено среднее значение  $f = 0,01124$  (для скорости 20 км/ч). Это близко к 0,01130 – по нижней границе поля возможных значений для шин категорий S и T. Наибольшие возможные значения  $f$  (верхняя граница поля для шин H, V и других скоростных) выше в 1,237 раза, наименьшие (нижняя граница поля для шин ESO) – в 0,756 раза. Опуская вычисления, приведем полученные значения пути и времени выбега для рассматриваемых диапазонов скорости (табл. 4).

Таблица 4

Расчетные нормативные значения параметров “Время выбега” и “Путь выбега” автомобиля Honda Civic D4

Вариант сопротивления качению	Параметр	Диапазон скорости			
		от 50 до 0	от 40 до 20	от 30 до 10	от 40 до 10
Худший	Время, с	90,6	32,4	37	52,3
	Путь, м	554,1	266,8	200,6	348,7
Средний	Время, с	106,2	37,3	43,2	60,7
	Путь, м	639,2	306,7	233,6	403
Лучший	Время, с	129,4	44,2	52,3	72,8
	Путь, м	760	362,6	281,3	480,3

Итак, установлены рекомендуемые режимы проверки автомобиля Honda Civic D4 с шинами группы ЕСО и нормативы для этих режимов.

Однако при шинах других типов нормативы будут иными. Не имея возможности повторить эксперимент со всеми вариантами шин, мы попытались рассчитать эти варианты, исходя из общепринятых моделей сопротивлений движению автомобиля. Однако никакое сочетание постоянного значения  $C_x$  и зависимости  $f(v)$  не дало кривой замедления  $j(v)$ , приближающейся к экспериментальной.

Оставалось принять версию о непостоянстве  $C_x$  и попытаться найти достаточно простые методы расчета параметров выбега с 50 км/ч с учетом этого непостоянства. Характер зависимости  $C_x(v)$  удобно исследовать методом, описанным, например, в [4]: выбирают на экспериментальной кривой  $j(v)$  две близкие по скорости точки и принимают допущение, что в силу малой разности скоростей значения сопротивлений в обеих точках одинаковы. Далее составляют систему из двух уравнений силового баланса для этих двух точек и решают ее. Затем переходят к следующей паре скоростей – и так до конца исследуемого диапазона. Мы называем эту процедуру “методом близких скоростей” (МБС).

Исходная система уравнений:

$$\begin{cases} P_{f1} + P_{xx,тр1} + kF \cdot v_1^2 = \delta \cdot m_a \cdot j_1; \\ P_{f2} + P_{xx,тр2} + kF \cdot v_2^2 = \delta \cdot m_a \cdot j_2, \end{cases}$$

где  $P_f$  – сила сопротивления качению, Н;  $P_{xx,тр}$  – сила сопротивления холостого хода трансмиссии, Н;  $k$  – коэффициент обтекаемости,  $H \cdot c^2 \cdot m^{-4}$ ;  $k = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x$  ( $\rho$  – плотность воздуха,  $кг/м^3$ ;  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления);  $F$  – лобовая площадь автомобиля,  $м^2$ ;  $v_1, v_2$  – выбранные близкие скорости,  $м/с$ ;  $j_1, j_2$  – замедления при этих скоростях.

Как сказано выше, принято допущение, что при достаточно близких скоростях сопротивления равны. Однако предварительная оценка на примере автомобиля Honda Civic показывает, что чувствительность трех составляющих к изменению скорости различна (табл. 5, рис. 2).

Таблица 5

Зависимость сопротивлений выбегу автомобиля Honda Civic от скорости (сопротивление воздуха – по стандартной формуле при  $\rho = 1,208 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_x = 0,31$ ,  $F = 2,1 \text{ м}^2$ ; сопротивление качению при  $m_a = 1703 \text{ кг}$ ,  $f$  – по нижней границе поля возможных значений для шин категорий S и T [1];  $P_{xx}$  – по результатам измерений [6])

$v$	0	5	10	15	20	25	30
$P_w$	0,0	0,8	3,3	7,3	13,0	20,4	29,3
$P_f$	189,4	189,0	188,8	188,8	188,8	189,0	189,3
$P_{xx}$	0,052	0,704	1,05	1,37	2,64	3,85	4,81

$v$	35	40	45	50	55	60	65
$P_w$	39,9	52,2	66,0	81,5	98,6	117,4	137,8
$P_f$	189,6	190,2	190,8	191,5	192,4	193,4	194,5
$P_{xx}$	5,72	6,78	8,07	9,46	10,85	12,4	15,1

Наименее чувствительно сопротивление качению, именно его можно без ущерба для точности считать постоянным в выбранном диапазоне скоростей от  $v_1$  до  $v_2$  ( $P_{f1} = P_{f2} = P_f$ ). Остальные два сопро-

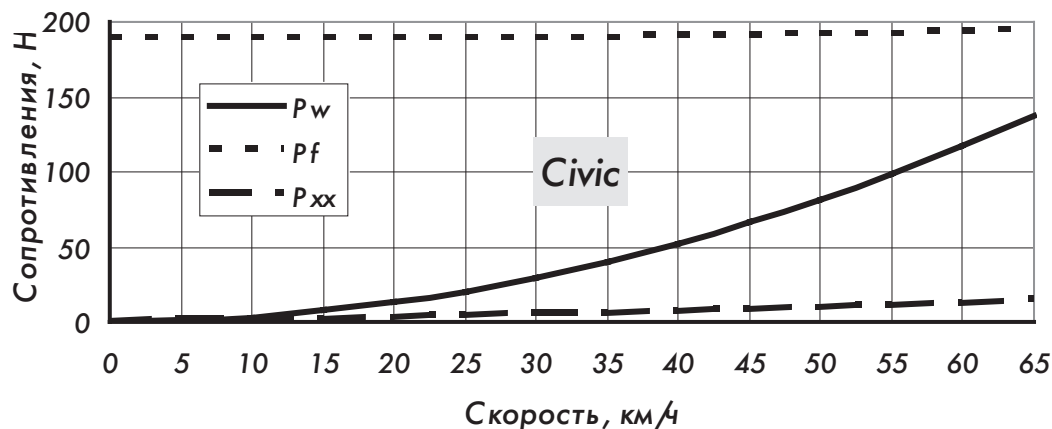


Рис. 2. Зависимость сопротивлений выбега Honda Civic от скорости





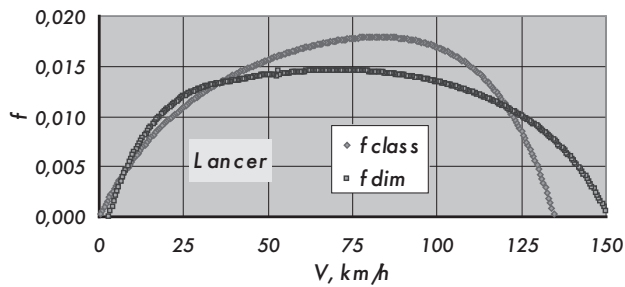


Рис. 5. Расчетная зависимость коэффициента сопротивления качению от скорости, полученная методом близких скоростей

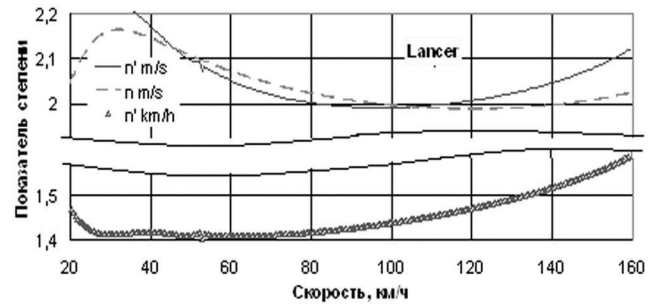


Рис. 6. Условный показатель степени при расчете с  $C_x = 0,3639$

среднее для рабочего диапазона скоростей значение  $C_x = 0,3656$  достаточно близко к вычисленному методом [1] 0,3639, а значение  $f = 0,011748$  практически совпадает с  $f = 0,011706$  (при скорости 23,75 км/ч, на которой вычисляется  $f$  методом [1]).

Возник вопрос: а в какую степень надо возводить скорость при таком значении  $C_x$ , чтобы получить такое же сопротивление воздуха, какое дает МБС? Результат расчета оказался бесполезным: кривая этого условного показателя степени ( $n'$  m/s на рис. 6) в зоне малых скоростей заметно уходит от исходной ( $n$ ), устремляется к бесконечности и образует разрыв вблизи 3,6 км/ч. Более практичный результат такая операция дала при подстановке скорости в километрах в час. Кривая  $n'$  km/h на рис. 6 идет в области рабочих скоростей более полого, на участке от 90 до 30 км/ч этот показатель практически постоянный (1,4135), а в пределах от 50 до 20 км/ч может быть принят 1,418. Правда, на меньших скоростях расчет сопротивления воздуха при  $C_x = 0,3639$  и  $n' = 1,418$  дает нарастающую погрешность, но на фоне прочих сопротивлений она незначительна да и сам расчет по МБС не идеален.

Аналогичные расчеты для автомобилей с резко отличающейся аэродинамикой – внедорожника Toyota Land Cruiser 200 ( $C_x = 0,5063$ ) и седана Honda Civic D4 ( $C_x = 0,3092$ ) – дали близкие значения:  $n' = 1,4396$  и  $n' = 1,4228$ . Среднее из трех – 1,427.

Подбор эмпирических формул для расчета коэффициента сопротивления качению  $f$  также опирался на результаты анализа выбега Mitsubishi Lancer с помощью МБС при переменном показателе степени. Полученная диаграмма  $f(v)$  показана на рис. 7. Она была аппроксимирована логарифмической функцией, но кривая при скоростях ниже 2 км/ч уходила в отрицательную область, что не имеет физического смысла. Поэтому функция была откорректирована смещением аргумента на 1,7 км/ч.

У двух других рассмотренных автомобилей форма аппроксимирующей кривой такая же, но ординаты выше или ниже в соответствии со свойствами шины. Это удобно корректировать масштабным коэффициентом  $C_i / C_L$ , где  $C$  – свободный член в аппроксимирующем выражении для зависимости коэффициента сопротивления качению  $f$  от скорости [1];  $i$  – индекс рассматриваемого автомобиля;  $L$  – индекс автомобиля Lancer. Значение  $C_L$  для седана Lancer принято по средней линии для шин SR-TR (0,012467), для внедорожника Toyota – по верхней линии для шин HR-VR (0,0140095), для седана Civic – по средней линии для шин HR-VR (0,013261). Выбор  $C$  определялся скоростной категорией шины с учетом значения  $\psi$ , полученного при обработке диаграммы выбега по [1].

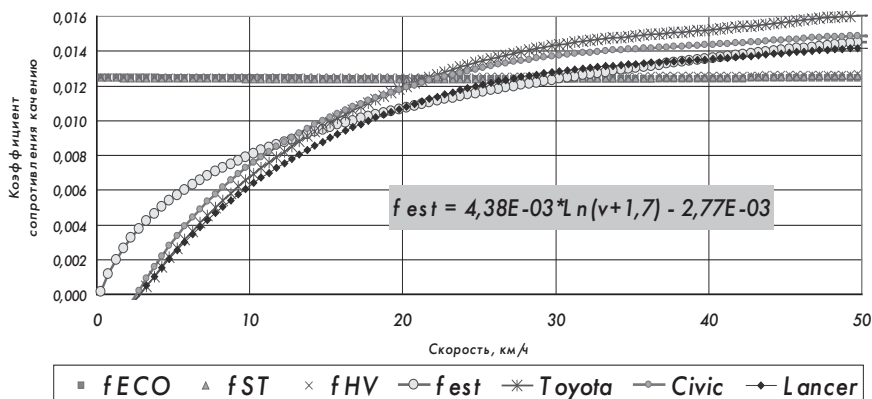


Рис. 7. Зависимость коэффициента сопротивления качению  $f$  от скорости, вычисленная методом близких скоростей при переменном  $[n(v)]$  показателе степени, справочная для трех групп шин ( $f$  ECO,  $f$  ST,  $f$  HV), трех автомобилей (Lancer, Toyota, Civic) и принятая для расчета ( $f$  est)

Параметры выбега легковых автомобилей, рассчитанные классическим и предлагаемым эмпирическим методами, в сопоставлении с экспериментальными данными

Источник данных	Диапазон скоростей							
	50–1		50–20		40–20		30–10	
	Время, с/ε, %	Путь, м/ε, %	Время, с/ε, %	Путь, м/ε, %	Время, с/ε, %	Путь, м/ε, %	Время, с/ε, %	Путь, м/ε, %
Седан Mitsubishi Lancer 2,0								
Эксперимент	154,96	654,81	50,11	470,21	35,90	293,02	46,35	243,92
Класс. расчет ε, %	101,92	667,12	56,96	540,51	40,13	330,66	61,90	240,21
	–34,23	1,88	13,68	14,95	11,79	12,85	33,57	–1,52
Эмпир. расчет ε, %	151,93	656,17	50,85	474,92	36,79	299,65	47,48	250,63
	–1,96	0,21	1,48	1,00	2,47	2,26	2,45	2,75
Внедорожник Toyota Land Cruiser 200								
Эксперимент	141,91	583,95	44,30	415,06	31,83	259,54	41,65	218,58
Класс. расчет ε, %	89,04	579,89	49,41	468,75	34,82	286,79	53,89	209,28
	–37,26	–0,70	11,53	12,94	9,39	10,50	29,39	–4,25
Эмпир. расчет ε, %	134,04	573,66	44,32	413,73	32,09	261,25	41,64	219,51
	–5,55	–1,76	0,03	–0,32	0,80	0,66	–0,04	0,43
Седан Honda Civic D4								
Эксперимент	136,91	628,58	49,33	465,50	34,98	286,44	43,27	229,77
Класс. расчет ε, %	103,02	680,53	58,22	554,23	40,73	336,07	62,43	241,28
	–24,75	8,26	18,01	19,06	16,44	17,33	44,27	5,01
Эмпир. расчет ε, %	146,05	640,92	49,93	467,42	35,97	293,38	45,89	242,72
	6,68	1,96	1,23	0,41	2,85	2,42	6,05	5,63

Результаты расчета параметров выбега для трех автомобилей представлены в табл. 6 натуральными значениями и отклонениями от экспериментальных данных в процентах (ε, %).

Как видно из табл. 6, предложенный эмпирический метод намного точнее общепринятого классического метода:

1) измерение параметров выбега легковых автомобилей со скорости 50 км/ч до полной остановки возможно лишь при наличии прямого горизонтального участка дороги длиной более 580...750 м;

2) наименьшая вариация замедления выбега автомобиля Honda Civic D4 наблюдается в диапазоне от 20 до 30 км/ч, наибольшая – от 10 км/ч до остановки и от 50 до 40 км/ч;

3) в зависимости от длины доступного прямого горизонтального участка дороги рекомендуется измерять параметры выбега легкового автомобиля в диапазонах скорости от 40 до 10, от 40 до 20 или от 30 до 10 км/ч; ориентировочные значения нормативов выбега автомобиля Honda Civic D4 в указанных диапазонах скорости приведены в табл. 4;

4) нормативы пути и времени выбега следует вычислять по описанной здесь методике.

#### Список литературы

1. Рабинович Э.Х. Оценка коэффициентов сопротивления движению автомобиля по пути выбега / Э.Х. Рабинович, В.П. Волков, Е.А. Белогуров // Український метрологічний журнал. – 2010. – № 4. – С. 47–52.
2. Про измерение выбега [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.exp-rem.ru/files/faq/05-07-20\\_rem\\_faq\\_vybeg.htm](http://www.exp-rem.ru/files/faq/05-07-20_rem_faq_vybeg.htm).
3. Волков В.П. Уточнение методики диагностирования автомобиля по выбегу / В.П. Волков, Ю.В. Зыбцев, В.И. Ярмак // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2012. – № 64 (970). – С. 36–42.
4. Рябков А.И. Методика расчета коэффициента сопротивления качению и фактора обтекаемости автомобиля / А.И. Рябков, В.Н. Лавренченко // Автомобильная промышленность. – 1984. – № 3. – С. 19–20.
5. Диваков А. С намеком на... / А. Диваков, П. Карин // Авторевю. – 2007. – № 13–14.
6. Измерение момента инерции автомобильной автоматической трансмиссии методом выбега / Э.Х. Рабинович, В.П. Волков, Ю.В. Зыбцев [и др.] // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 2. – С. 28–33.