

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАРТИНЫ ВЕТРА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ ВЫБЕГА АВТОМОБИЛЯ

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

М.Х. Буравцев, главный конструктор ф. "Гелиос", г. Харьков

С.П. Тарасов, механик СТО "Автодом Харьков"

Я.Н. Замай, студент ХНАДУ, г. Харьков



В.П. Волков



Э.Х. Рабинович



М.Х. Буравцев



С.П. Тарасов



Я.Н. Замай

Показано, что оценка воздействия ветра на автомобиль прямыми измерениями трудоемка, неэффективна и ей свойственна большая неопределенность. Предложен метод косвенной интегральной оценки картины ветра по разности длительностей выбега автомобиля в двух направлениях, который обеспечивает высокую точность расчетов.

It is shown that the estimation of the wind action on the car with direct measurements is time-consuming, inefficient and suffers from great uncertainty. The method of indirect evaluation of integrated pattern of the wind based on the difference between the time of the car coasting-down in two directions is proposed, which provides high accuracy calculations.

Введение

Дорожные испытания — необходимая часть процессов разработки, постановки на производство

и технической эксплуатации автомобилей. Поэтому исследования движения автомобиля в реальных условиях, то есть на дороге с уклонами и в ветреную погоду, актуальны и необходимы.

Анализ публикаций

Методы и теория испытаний заложены в трудах Е.А. Чудакова, Г.В. Зимелева, Б.С. Фалькевича — основоположников отечественной автомобильной науки [1]. Заметный вклад внесли украинские исследователи, в частности, ученые ХАДИ–ХНАДУ под руководством Н.Я. Говорущенко [2].

Основой теории дорожных испытаний является общеизвестное уравнение тягового баланса, одна из составляющих которого — сила сопротивления воздуха:

$$P_w = kF \cdot v^2 = 0,5 \rho C_x F \cdot v^2,$$

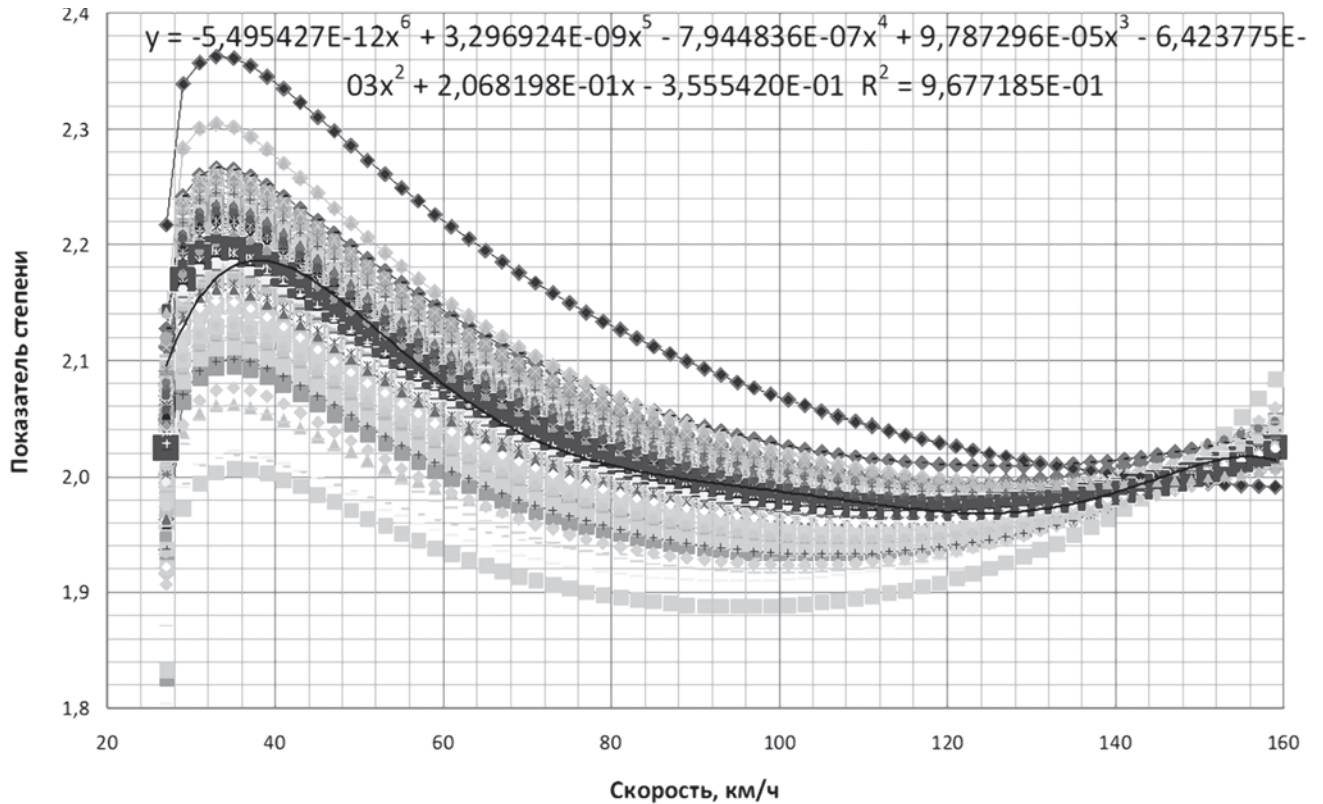


Рис. 1. Вариация показателя степени для случайной выборки автомобилей

где k — коэффициент обтекаемости ($k=0,5\rho C_x$, где ρ — плотность воздуха во время замера, кг/м^3); kF — фактор обтекаемости; C_x — коэффициент аэродинамического (лобового) сопротивления; F — лобовая площадь автомобиля, м^2 ; v — скорость автомобиля, м/с .

Два уточнения. Во-первых, показатель степени “2” — всего лишь общепринятое округление, а на самом деле — это довольно сложная функция от скорости $n(v)$ с большой вариацией значений, особенно при скоростях ниже 50 км/ч (рис. 1, 2) [3].

Во-вторых, входящая в формулу скорость v — это так называемая воздушная скорость v_b , то есть скорость

относительно окружающего воздуха — алгебраическая сумма скорости автомобиля v_a и скорости ветра v_w :

$$v_b = v_a \pm v_w.$$

Знак плюс соответствует движению против ветра, минус — по ветру.

Примечание: здесь и далее на поле диаграммы помещены уравнения аппроксимации зависимостей функции от аргумента в том виде, как их выводит программа Microsoft Excel. На некоторых рисунках дополнительно приведено значение R^2 — это квадрат корреляционного отношения, использованный в качестве показателя достоверности аппроксимации.

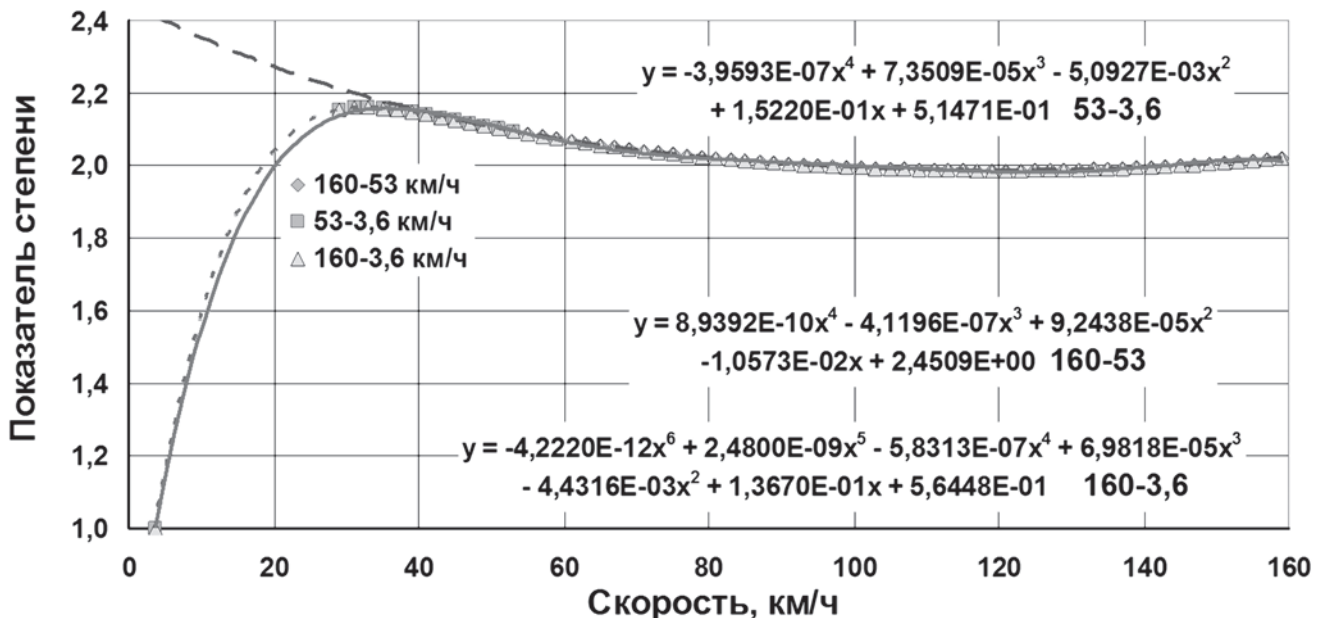


Рис. 2. Аппроксимация средней зависимости показателя степени в формуле сопротивления воздуха от скорости [3]

В справочнике [4] описана методика расчета C_x и коэффициента сопротивления качению ψ по замедлениям выбега автомобиля с двух скоростей: высокой (но не выше 100 км/ч) и низкой (в примере указаны скорости 57,5 и 12,5 км/ч; видимо, это не реальные значения — при таком сочетании скоростей результаты расчета будут ошибочны). В работе [5] методика развита, в частности, снято ограничение высокой скорости. Однако методика действует лишь при отсутствии ветра или после того, как измеренные замедления откорректированы на действие ветра. В статье [3] обоснован выбор двух указанных скоростей, но тоже при отсутствии ветра. В работе [6] была предложена методика расчета C_x , ψ и скорости ветра по замедлениям выбега автомобиля с двух скоростей — высокой и низкой и в двух направлениях — по ветру и против. Решение отыскивается методом последовательных приближений и не всегда удачно, особенно в части вычисления скорости ветра. Таким образом, задача определения скорости ветра в период эксперимента еще не решена.

Изучение свойств ветра

Для повышения эффективности экспериментов надо знать скорость и направление ветра. Эти данные можно получать с ближайшей метеостанции. Однако известно, что скорость ветра изменяется не только в течение месяца и суток, но и в считанные минуты и на большую величину [7]. Чтобы проверить эти сведения в наших условиях, были выполнены замеры ручным анемометром МС-13 (рис. 3) в обычный день с очень слабым ветром — до 3 м/с согласно прогнозам трех разных метеосайтов.

Анемометр держали включенным от 6 до 15 мин, снимая циферблат видеокамерой, а потом обработали видеозапись, выписывая показания прибора через каждые 25 делений шкалы единиц, то есть 25 м пути воздушного потока.

Результаты замеров откорректированы по градуировочному графику анемометра, использованного в экспериментах, и сведены в табл. 1.

Выполнено три записи: в начале участка дороги длиной 2 км, через 12 мин в конце участка и еще

раз в конце через 36 мин. Рассчитаны средние скорости на пути ветра 5 м (рис. 4). Строго говоря, для расчетов следует брать не среднее арифметическое, а среднее квадратическое значение; разница составит около 1%. Как видно из этих данных, вариация очень велика. Добавление числа замеров только увеличивает неопределенность результата и никак не помогает расчетчику в выборе значения скорости ветра для использования в расчетах.

Как видно из табл. 1, изменчивость ветра была значительной: за 36 мин средняя скорость снизилась от 2,98 до 1,36 м/с. Более того, на протяжении одного измерения (4...6 мин) скорость увеличивалась и уменьшалась в 2 раза, причем резкие изменения происходили за 3...10 с. Практически такие же результаты были получены на дороге, идущей по дамбе водохранилища: там в течение 2 мин ветер изменялся от 2,6 до 1 м/с и снова до 2,8 при средней скорости 1,75 м/с на уровне 1,6 м от дороги (рис. 4). В разных местах дороги ветер был разный: на западном конце — 2,74 м/с, посередине (через 16 мин) — 1,65 м/с, на восточном конце (еще через 12 мин) — 1 м/с. Неясно, это влияние разницы во времени или же специфика дороги, идущей вдоль водного зеркала на протяжении 1,75 км.

В свете сказанного следует ожидать, что во время дорожных испытаний ветер будет меняться не только на протяжении рабочего дня, но и от заезда к заезду. Можно вообразить себе бригаду наблюдателей с анемометрами в руках, расставленных вдоль трассы заездов на протяжении 1,5...3 км и регистрирующих параметры ветра либо через заданные промежутки времени, либо (по радиокоманде) во время проезда тестового автомобиля. Способ реальный, но крайне трудоёмкий и затратный (заметим, что даже такой способ не позволит восстановить картину ветра во время ранее проведенных испытаний, выполненных без детальной регистрации погодных условий).

Исследователи Принстонского университета (США) проводили эксперименты на взлетно-посадочной полосе местного аэропорта (длина 2 км). Расположенная вблизи полосы метеостанция регистрировала показания приборов каждую минуту (это было возможно, поскольку станция принадлежит университету и обслуживается его работниками) [8]. Но показания

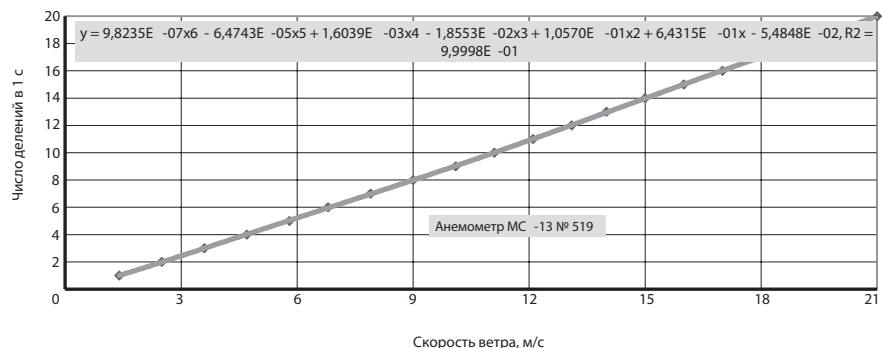


Рис. 3. Анемометр чашечный МС-13 № 519 и его градуировочный график

Анализ стабильности скорости ветра

Клип DSCF9869.AVI 13:47				Клип DSCF9870.AVI 14:00			
деления	секунды	делений/с	м/с	деления	секунды	делений/с	м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
2	0			85	0		
27	10,067	2,48336		110	8,167	3,0611	3,66823
52	21,566	2,1741	2,70672037	135	16	3,19163	3,809
77	31,7	2,46694	3,02557788	160	24,133	3,0739	3,68203
102	44,266	1,9895	2,50454884	185	34,733	2,35849	2,90772
127	56,633	2,02151	2,53968549	210	44,233	2,63158	3,20409
152	67,633	2,27273	2,81433116	235	54,033	2,55102	3,1168
177	81,833	1,76056	2,25219544	260	63,933	2,52525	3,08885
202	96,266	1,73214	2,22071907	285	76,199	2,03815	2,55794
227	115,299	1,31351	1,75237115	310	90,166	1,78993	2,28469
252	129,732	1,73214	2,22071907	335	100,199	2,49178	3,05253
277	148,665	1,32045	1,76021504	360	109,699	2,63158	3,20409
302	168,098	1,28647	1,72177408	385	118,299	2,90698	3,50188
327	184,331	1,54007	2,00701127	410	126,765	2,95299	3,55156
352	202,565	1,37107	1,81735081	435	135,899	2,73703	3,31821
377	219,831	1,44793	1,90381413	460	145,199	2,68817	3,26536
402	233,564	1,82043	2,31838884	485	155,632	2,39624	2,94877
427	247,298	1,8203	2,31824196	510	165,698	2,48361	3,04367
452	263,164	1,5757	2,04678574	535	175,865	2,45894	3,01688
Средняя скорость v			2,27916415	560	185,898	2,49178	3,05253
СКО (σ)			0,394918077	585	196,465	2,36586	2,91573
Клип DSCF9875.AVI 14:36				610	207,665	2,23214	2,77008
34	0			635	218,564	2,29379	2,83728
84	58,966	0,92027	1,30212363	660	228,564	2,5	3,06146
109	79,866	1,19617	1,61922848	685	239,431	2,30054	2,84464
134	107,099	0,918	1,29949564	710	250,597	2,23894	2,77749
159	130,799	1,05485	1,45756072	735	261,664	2,25897	2,79933
184	155,165	1,02602	1,42438779	760	275,431	1,81594	2,31342
209	187,331	0,77722	1,13515574	785	291,63	1,54331	2,01062
234	213,965	0,93865	1,32344437	810	304,864	1,88907	2,3941
259	243,531	0,84557	1,21516858	835	315,397	2,37349	2,92403
284	275,164	0,79031	1,15052148	860	324,83	2,65027	3,22433
309	303,064	0,89606	1,27399655	885	335,563	2,32927	2,87591
334	322,363	1,2954	1,73188862	915	350,963	1,94805	2,45901
357	341,597	1,1958	1,61880372	Средняя скорость v			2,98578
Средняя скорость v			1,36245029	СКО (σ)			0,408336
СКО (σ)			0,196476				

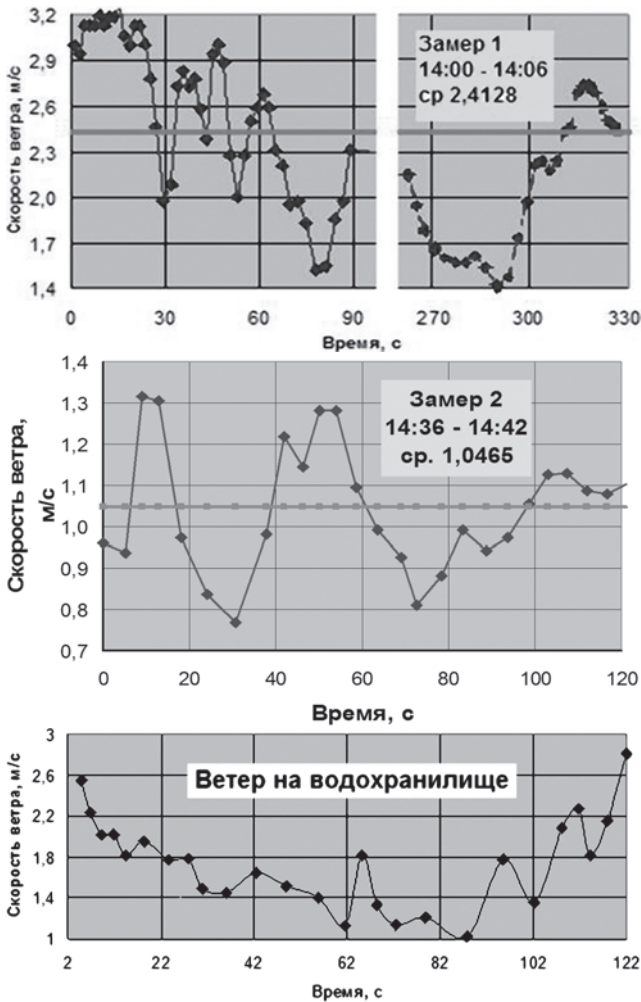


Рис. 4. Вариация средних значений скорости ветра на последовательных интервалах пути по 5 м (две разные дороги)

снимались в одной точке, ближе к концу полосы, и не отражали состояния ветра на другом ее конце.

Представленные ранее результаты наших исследований замерены на высоте крыши автомобиля. Но точка приложения равнодействующей сил сопротивления воздуха (“центр давления”) находится заметно ниже, причем у каждого автомобиля на своей высоте.

Наконец, вблизи земной поверхности скорость ветра падает. Общая картина описывается плавной кривой (рис. 5, слева), в реальности в приземном слое высотой до 1,5 м картина не столь гладкая (рис. 5, справа, данные А. Подольской и П. Яшкиной).

Таким образом, нет смысла определять скорость ветра традиционными прямыми измерениями — это сопряжено с серьезными трудовыми и денежными затратами и не дает желаемого результата из-за большой неопределенности каждого показателя. Когда интерес представляет не посекундная картина ветра, а его воздействие на автомобиль, то нужно отыскивать хотя бы косвенные методы интегральной оценки такого воздействия в течение конкретного заезда.

Восстановление картины ветра по данным выбега автомобиля

Выше [6] упомянут способ, включающий в себя выполнение пары мерных заездов с разго-

ном и выбегом в прямом и обратном направлениях с минимальной паузой между ними. В каждом заезде регистрируются параметры разгона и выбега, в частности, средние замедления за период движения накатом от скорости v_1 до скорости v_2 . Скорость ветра в метрах в секунду и коэффициент сопротивления воздуха вычисляют по следующим формулам:

$$v_w = \frac{m \cdot \delta \cdot (j_1 - j_2)}{4kF \cdot v_1}; \quad C_x = \frac{2 \cdot m \cdot (\delta \cdot j_1 - g \cdot K_v \cdot \psi_2)}{\rho \cdot F \cdot (v_1 \pm v_2)^2},$$

где m — масса автомобиля, кг; δ — коэффициент учета вращающихся масс автомобиля; j_1 и j_2 — замедления при скоростях v_1 и v_2 соответственно; $g=9,81$ м/с² — ускорение свободного падения в месте проведения испытаний; K_v — коэффициент, учитывающий изменение сопротивления качению при повышении скорости от v_2 до v_1 [5]; ψ_2 — коэффициент суммарного дорожного сопротивления при скорости v_2 .

Поскольку искомым коэффициентом C_x неявно входит в коэффициент обтекаемости k , задачу приходится решать методом последовательных приближений, начиная с предполагаемого значения C_x .

Коэффициент ψ_2 вычисляют приближенно по среднему замедлению выбега на этой скорости в двух направлениях и при значении C_x , полученном на предыдущей итерации. Составленная по этой методике программа в редакторе Excel дает решение после 5–6 итераций.

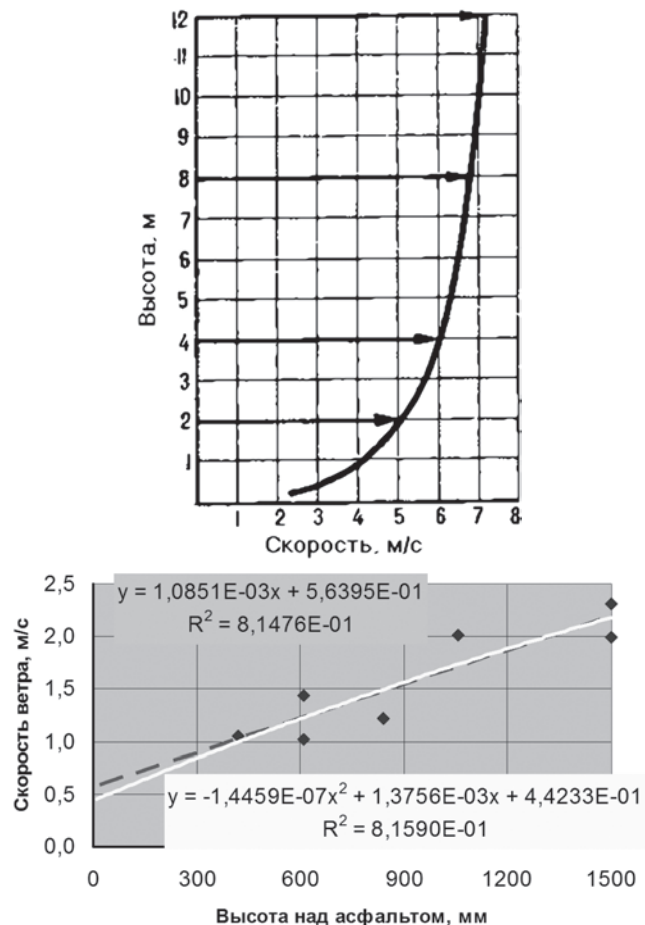


Рис. 5. Скорость ветра на разной высоте

Таблица 2

Формулы для расчета поправки к коэффициенту сопротивления качению при разных коэффициентах профильности шины (H/V)

H/V, %	Формула аппроксимации средних значений
40	$\Delta f = 8,3777 \cdot 10^{-7} V^3 - 5,4961 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,3969 \cdot 10^{-3} V - 0,013570$
45	$\Delta f = 8,1858 \cdot 10^{-7} V^3 - 5,4766 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,4697 \cdot 10^{-3} V - 0,015217$
50	$\Delta f = 6,4538 \cdot 10^{-7} V^3 - 4,5962 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,3340 \cdot 10^{-3} V - 0,014033$
55	$\Delta f = 5,3018 \cdot 10^{-7} V^3 - 3,9205 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,2148 \cdot 10^{-3} V - 0,013960$
60	$\Delta f = 4,8065 \cdot 10^{-7} V^3 - 3,7010 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,2039 \cdot 10^{-3} V - 0,014048$
65	$\Delta f = 3,4114 \cdot 10^{-7} V^3 - 2,8714 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,0476 \cdot 10^{-3} V - 0,013509$
70	$\Delta f = 3,3771 \cdot 10^{-7} V^3 - 2,8832 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,0792 \cdot 10^{-3} V - 0,014189$
Все	$\Delta f = 6,0376 \cdot 10^{-7} V^3 - 4,3065 \cdot 10^{-5} V^2 + 1,2691 \cdot 10^{-3} V - 0,014051$

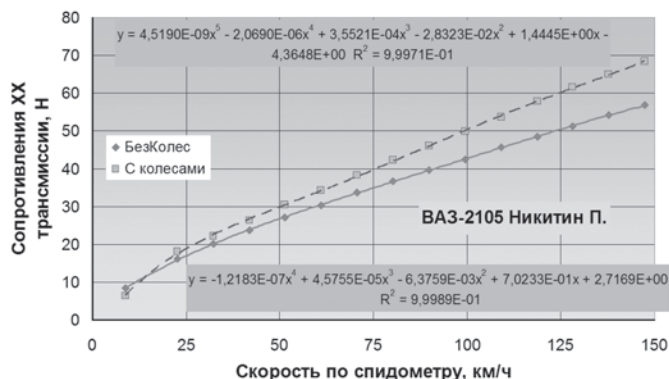
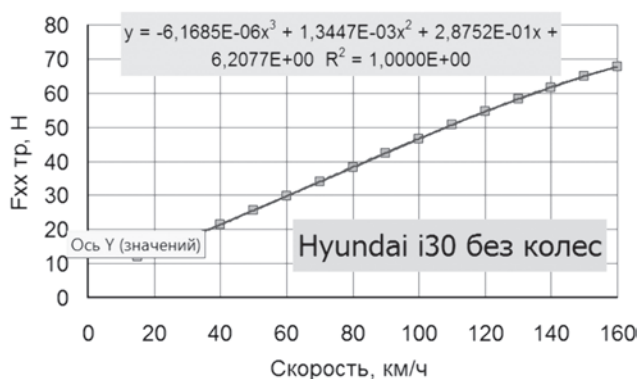


Рис. 6. Сопротивления холостого хода трансмиссии: а — переднеприводный Hyundai i30; б — заднеприводный VAZ-2105

Таблица 3

Уравнения зависимости коэффициента сопротивления качению от скорости

Индекс скорости по [3]	График	Расчетные формулы
HR, VR, WR, ZRT	Нижн.	$f = 1,24762E-07v^2 - 3,07143E-06v + 1,25095E-02$
	0,2	$f = 1,13333E-07v^2 + 5,85714E-07v + 1,28095E-02$
	0,4	$f = 1,01905E-07v^2 + 4,24286E-06v + 1,31095E-02$
	Средн.	$f = 9,61905E-08v^2 + 6,05714E-06v + 1,32613E-02$
	0,6	$f = 9,04762E-08v^2 + 7,90000E-06v + 1,34095E-02$
	0,8	$f = 7,90476E-08v^2 + 1,15571E-05v + 1,37095E-02$
	Верхн.	$f = 6,76190E-08v^2 + 1,52143E-05v + 1,40095E-02$
SR, TR	Нижн.	$f = 1,40190E-07v^2 - 4,40000E-06v + 1,13338E-02$
	0,2	$f = 1,74400E-07v^2 - 6,02857E-06v + 1,17871E-02$
	0,4	$f = 2,08610E-07v^2 - 7,65714E-06v + 1,22405E-02$
	Средн.	$f = 2,25714E-07v^2 - 8,47143E-06v + 1,24671E-02$
	0,6	$f = 2,42819E-07v^2 - 9,28571E-06v + 1,26938E-02$
	0,8	$f = 2,77029E-07v^2 - 1,09143E-05v + 1,31471E-02$
	Верхн.	$f = 3,11238E-07v^2 - 1,25429E-05v + 1,36005E-02$
ECO	Нижн.	$f = 1,55429E-07v^2 - 1,05143E-05v + 8,56857E-03$
	0,2	$f = 1,51467E-07v^2 - 9,92000E-06v + 9,35162E-03$
	0,4	$f = 1,47505E-07v^2 - 9,32571E-06v + 1,01347E-02$
	Средн.	$f = 1,45524E-07v^2 - 9,02857E-06v + 1,05262E-02$
	0,6	$f = 1,43543E-07v^2 - 8,73143E-06v + 1,09177E-02$
	0,8	$f = 1,39581E-07v^2 - 8,13714E-06v + 1,17008E-02$
	Верхн.	$f = 1,35619E-07v^2 - 7,54286E-06v + 1,24838E-02$

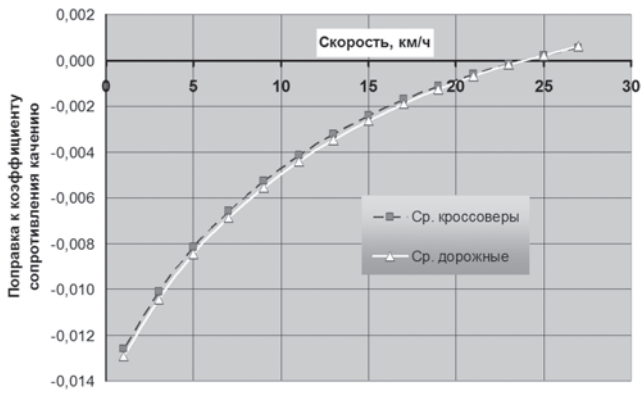


Рис. 7. Поправки к коэффициенту сопротивления качению для шин дорожных автомобилей и кроссоверов

Предложенная программа основана на усовершенствованной математической модели выбега, которая отличается от общепринятой тем, что в ее систему уравнений введены сопротивление холостого хода трансмиссии (рис. 6), переменный показатель степени в формуле сопротивления воздуха (рис. 2), 21 вариант зависимости коэффициента сопротивления качению от скорости (табл. 2) и поправка Δf , учитывающая резкий спад сопротивления качению при скоростях ниже 27 км/ч (рис. 7, табл. 3).

Основой расчета остается тот же метод последовательных приближений, но в качестве исходных величин использовано время выбега в двух противоположных направлениях [9].

Новая программа дает лучшее приближение к экспериментальным данным, чем общепринятая (рис. 8): $\sigma=0,030$ ($\sigma/v=0,068$) против $0,068$ ($\sigma/v=0,155$) м/с² в расчете по обычной модели.

Расчетное время выбега вычисляется методом конечных разностей, что позволяет вводить в программу любые модели составляющих. Программа содержит два связанных листа Excel с одинаковым содержанием. Единственное отличие состоит в том, что при вводе на первом листе предполагаемой скорости ветра она переносится на второй лист с обратным знаком. Далее вычисляются таблицы времени достижения автомобилем ряда скоростей при движении по ветру (лист 1) и против ветра (лист 2) и выводится разность времени выбега. Расчет заканчивается, когда расчетная разность скоростей совпадет с определенной в эксперименте (с заданной точностью).

Результатом расчета является не полная скорость ветра, а ее проекция на ось движения автомобиля, приложенная в его центре давления.

Случай двух дорог

Если испытания проводятся на двух пересекающихся дорогах, можно восстановить и полный вектор скорости ветра, то есть модуль и направление.

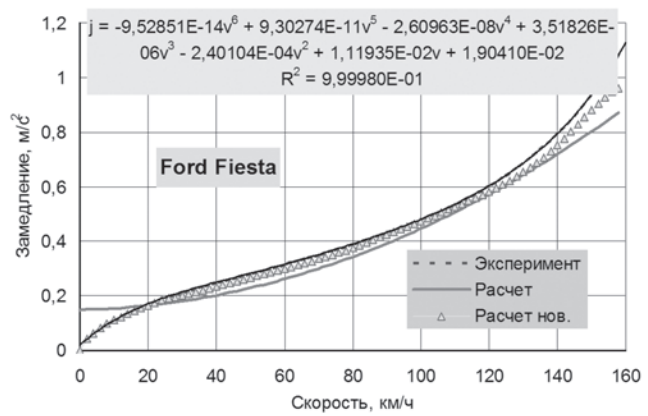


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных данных выбега автомобиля Ford Fiesta с расчетами по общепринятой модели и по новой

Многие эксперименты мы проводим на дороге, идущей по дамбе водохранилища, которая состоит из двух частей — длинной (1750 м, азимут 98°) и короткой (750 м, азимут 45°). Используем материалы наших испытаний автомобиля Ford Fiesta (рис. 9).



Рис. 9. Автомобиль Ford Fiesta на длинном участке дамбы



Рис. 10. Схема построения вектора скорости ветра

Для восстановления полного вектора скорости ветра вычисляют его проекции на оси движения автомобиля по двум дорогам, а затем эти векторы складывают. Такая обработка результатов трех групп заездов автомобиля Ford Fiesta дала значения скорости ветра 3,22; 2,18 и 1,30 м/с с азимутами 244,6; 255,7 и 267,7°. Эти результаты не противоречат данным метеонаблюдений.

По сводкам местной метеостанции, в день испытаний ветер менялся от штиля в 8:00 до юго-западного (225°) со скоростью 3 м/с в 14:00. Заезды выполнялись с 10:20 до 12:20. Данных за этот период нет. По аналогии с соседними метео-

станциями, можно считать, что направление ветра менялось от западного (270°) до юго-западного, а скорость — от 2 до 4 м/с. Наблюдательная площадка метеостанции находится ниже дороги, высота флюгера и ветромера от центра давления автомобиля (0,7...0,8 м) — около 5 м. Скорость ветра v_2 на уровне центра давления h_2 [10]

$$v_2 = v_1 (h_2 / h_1)^{0,2},$$

где v_1 — скорость ветра, измеренная на высоте h_1 .

Кроме того, следует учесть точность показателей в сводках: скорость ветра приводится в целых метрах в секунду (то есть $\pm 0,5$ м/с), а направление — в румбах (то есть $\pm 0,5 \cdot 360/8 = \pm 22,5^\circ$). Тогда

$$v_{0,7} = (1,5 \dots 4,5) \cdot (0,7 / 5)^{0,2} = 1,0 \dots 3,0 \text{ м/с.}$$

Проекция вектора ветра на длинный участок дороги составит

$$(1 \dots 3) \cos(98 - (45 \dots 90)) = 0,6 \dots 1,8 \text{ м/с.}$$

Неопределенность результата недопустимо велика.

В нашей методике скорость определяется по проезду мимо стандартного ограждения с шагом элементов 30, 4, 3, 2 и 1 м, а также по показаниям приемника спутниковых сигналов, индицируемым с шагом 0,5 км/ч. Время определяется по шкале программы Virtual Dub с шагом 0,033 с. В используемой программе длительность выбега вычисляется методом конечных разностей. Относительная погрешность при шаге сетки 5 км/ч — менее 0,1%. Длительность оцениваемого интервала скоростей — 30...50 с.

Результаты проверки по случаю, показанному на рис. 10: в эксперименте время выбега по длинной дороге от 121,7 до 90 км/ч составило 18,5 с, по стандартному расчету — 20,02 с, по уточненной здесь модели — 18,66 с (относительные ошибки 8,2 и 0,86 % соответственно). На короткой дороге время выбега от 50 до 20 км/ч составило 48,0 с в прямом направлении, 47,7 с — в обратном направлении, по стандартному расчету — 56,9 с, по уточненной модели — 46,95 с (относительные ошибки 18,5 и 2,2 % соответственно).

Таким образом, уточненная модель и предложенная здесь методика снижают погрешность учета действия ветра и расчета времени выбега в 8...9 раз. Не требуется прямых измерений, сведения их в один комплекс и преодоления неопределенности каждого отдельного результата. Необходимая информация о картине ветра в каждом блоке замеров получается без дополнительных экспериментов, то есть без затрат труда и времени. Получить такую информацию для ранее выполненных экспериментов общепринятым методом просто невозможно.

Список литературы

1. Фаробин Я. Е. Школы Е. А. Чудакова и его учеников / Я. Е. Фаробин // Автомобильная промышленность.— 1996.— № 7, 8, 10.
2. Говорущенко Н. Я. Основы теории эксплуатации автомобилей / Н. Я. Говорущенко.— К.: Вища школа, 1971.— 232 с.
3. Измерение аэродинамического сопротивления движению автомобиля дорожным методом / Э. Х. Рабинович, В. П. Волков, Е. А. Белогуров, Д. В. Никитин [Электронный ресурс] // 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.— 1 CD-ROM.
4. BOSCH. Автомобильный справочник: пер. с англ.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: ЗАО “КЖИ “За рулем”, 2004.— 992 с.
5. Рабинович Э. Х. Определение сопротивлений движению автомобиля методом однократного выбега / Э. Х. Рабинович, З. Э. Кемалов, А. В. Сосновый // Автомобильный транспорт: сб. науч. трудов.— Харьков, ХНАДУ, 2008.— Вып. 22.— С. 46–48.
6. Расчет коэффициентов сопротивления движению по выбегу автомобиля при наличии ветра / В. П. Волков, Э. Х. Рабинович, Е. А. Белогуров [и др.] // Там же.— 2009.— Вып. 24.— С. 36–40
7. Швень Н. И. Особенности режима ветра на территории Украины и их связь с глобальными изменениями атмосферной циркуляции и другими факторами: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.30. / Н. И. Швень.— СПб: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, 2006.— 167 с.
8. Zeit T. Cai. Experimental Studies in Ground Vehicle Coastdown Testing // Princeton University [Электронный ресурс].— Режим доступа: <https://www.asee.org/public/.../8/.../>
9. Определение параметров ветра по данным выбега автомобиля / Э. Х. Рабинович, В. П. Волков, М. Х. Буравцев, С. П. Тарасов // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: Міжнар. наук.-техн. конф., 20–21 квітня 2016 р.— Харків: ХАІ, 2016.
10. Мосейчук В. В. Зависимость скорости ветра от высоты мачты / [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://vetrogenerator.com.ua/komplekt/mast/179-zavisimost-skorosti-vetra-ot-vysoty-machty.html>.