

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ ПО ВРЕМЕНИ РАЗГОНА НА РАЗНЫХ ПЕРЕДАЧАХ

**Э.Х. Рабинович**, кандидат технических наук, доцент Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ)

**В.П. Волков**, доктор технических наук, профессор ХНАДУ, г. Харьков

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



Э.Х. Рабинович

В.П. Волков

Ю.В. Зыбцев

*Анализируется возможность проверки автомобиля по разгону на понижающих передачах. Показано, что нормативы параметров проверки и ее результат существенно зависят от массы объекта во время измерений, поэтому нельзя рассчитывать нормативы на основе общих паспортных данных для автомобилей этой модели.*

*The ability of testing the car by starting on reduced gears is analyzed. It was shown that standard parameters of testing and the result depend on mass of the object during the measurement significantly, that's why standards cannot be calculated on the basis of registration certificate for this model of the car.*

### Введение

При эксплуатации показатели автомобилей постоянно меняются, причем чаще в сторону ухудшения. Изменения необходимо отслеживать, особенно те, что повышают расход топлива. Однако сегодня сеть СТО не обеспечивает качественной проверки тяговых и экономических свойств автомобиля из-за недостатка тяговых стендов. Поэтому важно совершенствовать методы измерения нужных показателей на дороге, особенно их варианты, доступные для работников транспорта, то есть не требующие сложного или чрезмерно дорогого оборудования.

### Анализ публикаций. Задачи исследования

Основы метода дорожных испытаний заложены в трудах создателей теории автомобиля [1, 2] и повторяются с некоторыми уточнениями и конкретизацией в различных работах, в том числе и учебных пособиях [3]. Однако наши исследования последних лет [4] показали, что теория автомобиля далеко не завершена и требует развития и совершенствования.

В диссертации [5] большое внимание было уделено методам определения сопротивлений движению по замедлению выбега автомобиля с помощью простых измерительных средств – спидометра и фотоаппарата или мобильного телефона с видеокамерой. Выяснилось, что реальная картина сопротивлений не укладывается в общепринятые модели, и это следует учитывать при расчетах пути и времени выбега и разгона.

Практические рекомендации работы [5] были ориентированы на дорожные испытания на прямой передаче или (у легковых автомобилей с передним приводом и двухвальной коробкой передач) близкой к ней, например, четвертой. Однако такие испытания требуют длинных прямых горизонтальных участков дороги. Так, разгон автомобиля Chevrolet Aveo от 60 до 120 км/ч с последующим выбегом не укладывался в доступный участок дороги длиной 1,7 км [6]. На обычных дорогах общего пользования, где предполагается проверка автомобилей в эксплуатации, даже такая длина горизонтального участка – редкость.

В силу сказанного приходится рассматривать два варианта: либо проводить испытания на негоризонтальной дороге, либо выполнять разгоны на понижающих передачах, а выбеги – с меньших скоростей.

В первом варианте возможны два случая: постоянный или переменный уклон дороги на нужном участке. Первый случай, с точки зрения теории, тривиален, не создает особых затруднений и время от времени нами применяется [7]. Второй случай значительно сложнее: нужно знать продольный профиль дороги с привязкой к хорошо видимым ориентирам. Попытки обрабатывать совместно полученные по сигналам GPS диаграммы разгона или выбега  $v(S)$  и диаграммы высот над уровнем моря  $h(S)$  к успеху не привели, по-видимому, из-за низкой точности измерения высоты приемником GPS и сложностей совмещения точек на двух диаграммах.

Выбег автомобиля с малых скоростей исследовался в ХНАДУ [8]. Получены интересные результаты, но исследования только начаты, их нужно продолжать.

Расчет разгонов на понижающих передачах – хрестоматийная задача теории автомобиля. Однако ее решение в рамках общепринятых моделей

дает заметные отклонения от эксперимента. Поэтому представляется необходимым решить следующие задачи:

- проанализировать возможные отклонения реальных характеристик автомобиля от паспортных и их влияние на показатели разгона;
- включить в общепринятую теорию неустановившегося движения автомобиля описанные нами ранее уточнения: более сложную зависимость сил сопротивления воздуха от скорости и резкое снижение сопротивлений движению на малых скоростях;
- изучить возможные отклонения в поведении автомобиля при разгоне и их влияние на показатели разгона.

Настоящая статья посвящена решению первой задачи.

### Расчет разгона и выбега автомобиля

Цель расчета – получить численные описания процессов разгона и выбега в функции времени, что позволит обосновывать контрольные значения времени и пути разгона и выбега как параметров дорожного диагностирования автомобиля.

Все расчеты динамики автомобиля базируются на уравнении тягового баланса

$$P_k = P_w + P_\psi + P_j, \quad (1)$$

где  $P_k$  – тяговая сила, которая численно равна тангенциальной силе на ведущих колесах, создаваемой приводом автомобиля;  $P_w$  – сила сопротивления воздуха;  $P_\psi$  – сила суммарного дорожного сопротивления;  $P_j$  – преодолеваемая сила инерции.

$$P_k = \frac{M_e(n) \cdot i_k \cdot i_0 \cdot \eta_{\text{мп}}}{r_k},$$

где  $M_e$  – эффективный крутящий момент двигателя, Н·м (существенно зависит от частоты вращения коленвала  $n$ );  $i_k$  – передаточное число коробки передач;  $i_0$  – передаточное число главной передачи;  $r_k$  – динамический радиус колеса (радиус качения без проскальзывания), м;  $\eta$  – коэффициент полезного действия трансмиссии.

Строго говоря,  $\eta$  заметно зависит от включенной передачи, передаваемого момента и частоты вращения входного вала, но обычно в тяговых расчетах принимают постоянное значение КПД трансмиссии. Вопрос требует дополнительного изучения.

Динамический радиус снижается на малых скоростях до 0,95 от значения при 60 км/ч [9, рис. 5.88], и это может сказаться при испытаниях автомобиля на понижающих передачах. Впрочем, на этот счет существует и противоположное мнение [9, с. 271, прим. ред.], так что вопрос нуждается в дальнейшем исследовании.

Эффективный крутящий момент двигателя определяется по внешней скоростной характеристике. Передаточное число коробки передач должно соответствовать расчетному случаю.

По существу, уравнение (1) представляет собой обобщенную формулу трех законов Ньютона. Это станет понятнее, если переписать его в таком виде:

$$P_k - P_w - P_\psi = P_p = m_{\text{а.пр}} \cdot a,$$

где  $m_{\text{а.пр}}$  – приведенная к контакту колеса с дорожной массой автомобиля (с учетом приведенных масс двигателя, трансмиссии и колес), кг;  $a$  – ускорение автомобиля, м/с<sup>2</sup>.

Приведенную массу можно подсчитать по несколько преобразованной формуле проф. Г.В. Зимелева [2]:

$$m_{\text{а.пр}} = m_a + \frac{J_{\text{eng}}}{r_k^2} (i_k \cdot i_0)^2 + \frac{\sum J_k}{r_k^2},$$

где  $J_{\text{eng}}$  – момент инерции подвижных частей двигателя и постоянно связанных с ним частей трансмиссии, кг·м<sup>2</sup>;  $\sum J_k$  – сумма моментов инерции колес с шинами, ступицами, тормозными дисками (или барабанами), а для ведущих колес – с учетом постоянно связанных с ними частей трансмиссии, кг·м<sup>2</sup>.

Сопротивление воздуха

$$P_w = \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot F \cdot v^\alpha}{3,6^2},$$

где  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – лобовая площадь автомобиля;  $v$  – скорость, км/ч.

Показатель степени при скорости ( $\alpha$ ) обычно принимают равным 2, но наши исследования дают основания считать его зависящим от скорости [4, 10]. Плотность воздуха обычно принимают в общих расчетах 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

Значения  $C_x$  и  $F$  можно найти, например, на сайте [carfolio.com](http://carfolio.com) или на сайтах изготовителей. При отсутствии данных лобовую площадь легкового автомобиля можно рассчитать приближенно по формуле

$$F = \gamma \cdot B \cdot H,$$

где  $B$  – габаритная ширина автомобиля (без наружных зеркал), м;  $H$  – габаритная высота автомобиля (без рейлингов на крыше, антенн и т.п.), м;  $\gamma$  – коэффициент заполнения.

У современных легковых автомобилей всех типов  $\gamma$  варьирует от 0,78 до 0,87; среднее значение по 355 автомобилям – 0,836 (наши данные); сайт [carspector.com](http://carspector.com) использует значение 0,84, некоторые американские источники – 0,85. Приводимое в отдельных учебниках в качестве среднего значение 0,78...0,80 устарело.

Значения  $C_x$  приводятся в литературе по результатам продувки в аэродинамической трубе. Как указывает проф. А.Н. Евграфов, на дороге сила сопротивления воздуха выше на 5...10 % [11]. В расчетах это можно учитывать соответствующим повышением значения  $C_x$ . Однако и здесь реальность вносит свои поправки. По нашим данным,

различие между объявленным и реальным значениями составляет для легковых автомобилей в среднем 20...25 % [12].

Достаточно неопределенными являются и массовые показатели автомобиля. Например, для автомобиля Opel Omega В Caravan справочник НИИАТ дает значения приведенной массы от 1665 до 1762 кг, для Volkswagen Passat 3BG – от 1442 до 1673 кг (а при разных двигателях от 1420 до 1698 кг). Даже для крохотного Daewoo Matiz 0,8 приводятся значения от 770 до 843 кг. По данным взвешивания 550 автомобилей перед полигонными испытаниями расхождение с паспортными значениями варьирует от -178 до +286 кг.

Неопределенными являются массы сменяемых частей. Например, у шин размера 185/70 R14 масса варьирует от 7,1 до 8,7 кг. Масса дисков варьирует от 3,77 до 6,95 кг. Значит, комплект из пяти колес может иметь массу от 54,5 до 78 кг.

Приведенные (маховые) массы колес, трансмиссии и двигателя в технических характеристиках вообще не указываются.

Наконец, масса испытателя может колебаться от 55 до 120 кг, а с вещами – и больше.

Как правило, пользователь автомобиля всех этих тонкостей не знает. Приведенные сведения подтверждают актуальность выбранной задачи исследования: оценить влияние вариации массовых показателей автомобиля на результаты дорожного диагностирования. Критерием пригодности вариантов можно принять наличие такой разницы во времени разгона и (или) выбега, которую можно уверенно оценить при ручной засечке времени на секундомере мобильного телефона.

Дальнейшие расчеты выполнены на примере автомобиля Volkswagen Passat B4 с кузовом седан и двигателем 2,0 л (позднее мы сможем сопоставить их результаты с экспериментом). Внешняя скоростная характеристика двигателя принята по данным шведского исследовательского института

Rototest [13] и для удобства аппроксимирована полиномом четвертой степени (рис. 1). Как в [5], будем считать предельно допустимым снижение крутящего момента на 15 %.

Другие данные автомобиля:

- снаряженная масса седана с двигателем 2,0 л – 1155 кг [14], 1310 кг (по техпаспорту); другие варианты в литературе: 1180, 1190, 1225 кг;
- шины Michelin Energy Saver 185/70 R14 88T (560 кг, 190 км/ч), радиус динамический  $r_k=0,298$  м (вычислен по шинному калькулятору TRC), глубина рисунка протектора 7,6 мм, момент инерции диска с шиной  $I_k=0,7655$  кг·м<sup>2</sup> (наш расчет), приведенная масса  $m_{пр}=8,62$  кг; момент инерции ведомого колеса с тормозным диском 0,806 кг·м<sup>2</sup>, приведенная масса  $m_{пр}=9,08$  кг;
- двигатель модели 2E бензиновый, 4-цилиндровый, рабочий объем 2 л; мощность номинальная 85 кВт / 115 л.с. / 5400 мин<sup>-1</sup>; крутящий момент максимальный 166 Нм / 3200 мин<sup>-1</sup>; момент инерции 0,1484 кг·м<sup>2</sup> [3]; 0,247 кг·м<sup>2</sup> [15];
- кожух сцепления и диск ведомый (диаметр 228 мм); момент инерции по крутящему моменту – 0,087 кг·м<sup>2</sup> [15], по диаметру диска – 0,073 кг·м<sup>2</sup>;
- момент инерции ведомой части трансмиссии  $I_{тр}=0,7 \cdot I_k=0,461$  кг·м<sup>2</sup> [3], приведенная масса  $m_{пр}=5,22$  кг;
- передаточные числа коробки передач: I 3,778; II 2,105; III 1,345; IV 0,971; V 0,795;
- передаточное число главной передачи 3,945;
- объем топливного бака 70 л;
- коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_x=0,29$  [16], лобовая площадь 2,09 м<sup>2</sup> (наш расчет:  $0,84 \cdot 1,46 \cdot 1,705=2,0910$ ).

Расчетные случаи такие:

1) снаряженная масса автомобиля (то есть с полной заправкой всех емкостей) 1310 кг; масса водителя с вещами 120 кг, шины новые, колесные диски стальные, момент инерции каждого колеса 0,659 кг·м<sup>2</sup>; общая масса 1430 кг; момент

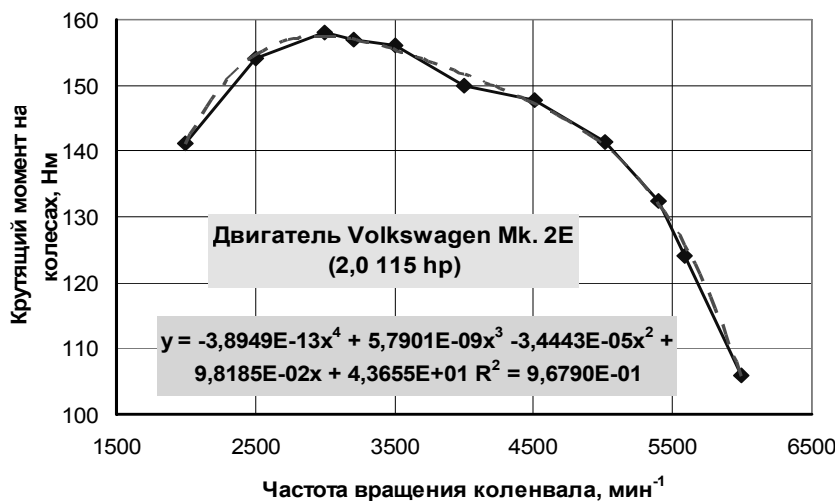


Рис. 1. Крутящий момент привода автомобиля Volkswagen, приведенный к коленчатому валу (двигатель Mk. 2E, привод передний, 5-ступенчатая МКП)

инерции двигателя со сцеплением – по верхней оценке  $0,334 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;

2) автомобиль тот же, масса водителя с вещами 120 кг, но в баке только 10 л бензина (минус  $60 \cdot 0,75 = 45 \text{ кг}$ ), шины изношены до допустимого предела, диски легкосплавные (минус  $4 \cdot 2 = 8 \text{ кг}$ ), общая масса  $1310 + 120 - 45 - 8 = 1377 \text{ кг}$ ; из-за износа шин момент инерции каждого колеса уменьшен на 20 % и составляет  $0,527 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; момент инерции двигателя со сцеплением – по нижней оценке  $0,221 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;

3) предыдущий вариант, но масса водителя с вещами 60 кг; общая масса 1317 кг;

4) предыдущий вариант, но снаряженная масса автомобиля 1155 кг, то есть на 155 кг меньше,  $1317 - 155 = 1162 \text{ кг}$ .

Расчеты выполнялись в пакете Microsoft Excel методом численного интегрирования с шагом скорости 10 км/ч.

На рис. 2 приведены результаты расчета времени разгона для трех расчетных случаев, для каждого – в двух вариантах: двигатель развивает

100 % крутящего момента и 85 %. Из рисунка видно, что при разных массах автомобиля поля работоспособного и неработоспособного технического состояния двигателя сливаются, что не позволяет надежно различить эти состояния, то есть поставить диагноз. Следовательно, при дорожном диагностировании необходимо знать фактическую массу автомобиля. Доверять паспортным значениям или тем, что указаны в техталоне, нельзя.

На рис. 3 показаны диаграммы разгона на IV передаче для автомобиля с номинальной снаряженной массой 1310 кг и фактической массой по случаям 1 и 2.

Здесь поля допустимого и недопустимого состояния автомобиля разделены промежутком времени 2,7 с, но для повышения надежности диагноза следует знать хотя бы ориентировочно массовые характеристики автомобиля и водителя, модель и степень износа шин. Иначе возможна значительная неопределенность: так, если получено время разгона 21,5 с – это симптом уже неработоспособности или еще допустимого состояния?

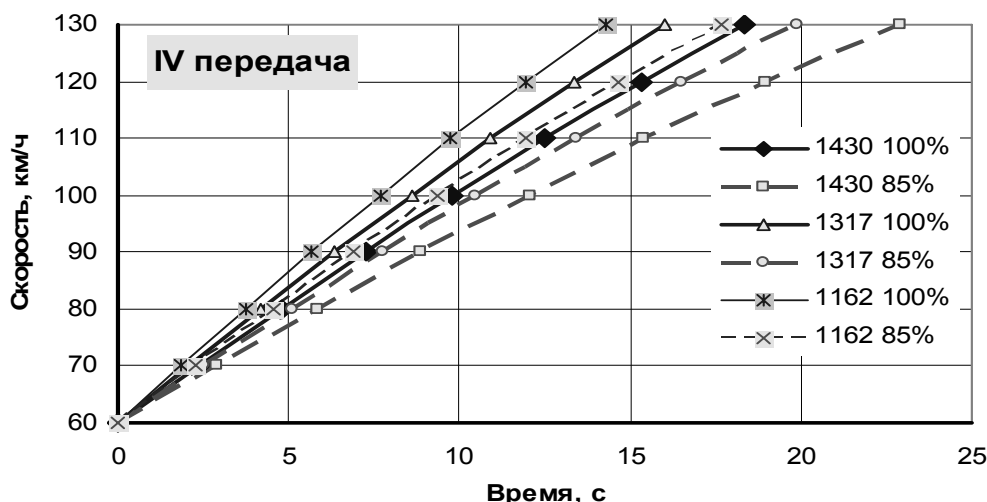


Рис. 2. Расчетное время разгона автомобиля Volkswagen Passat B4 для трех случаев массы автомобиля и двух вариантов технического состояния двигателя

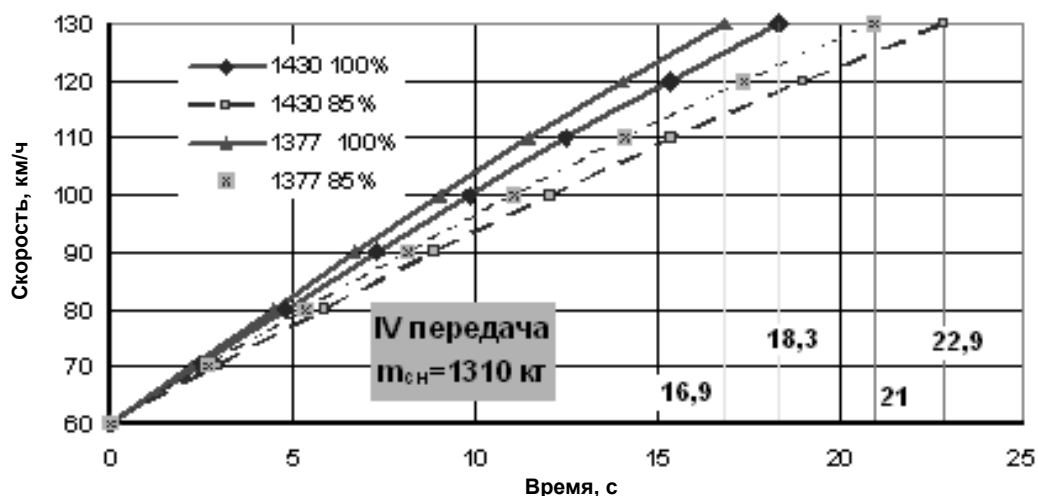


Рис. 3. Расчетные диаграммы разгона на IV передаче

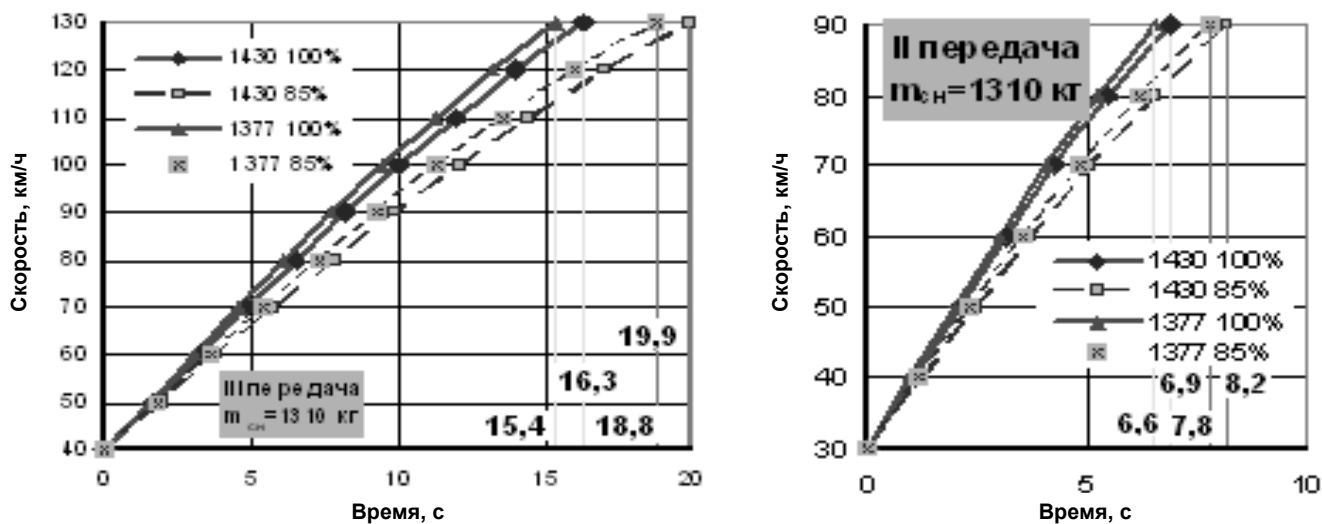


Рис. 4. Расчетные диаграммы разгона автомобиля на III и II передачах

Аналогичные расчеты были выполнены для случаев разгона на III и II передачах (рис. 4).

Разброс меньше, чем на IV передаче, хотя и не устранен полностью. Общее время разгона и на III, и на II передачах достаточно велико для ручной засечки. Путь разгона на III передаче для вариантов 1430 кг, 100 и 85 % составляет 355 и 437 м соответственно, на II передаче (разгон до 90 км/ч) – 78 и 94 м. Диагностирование на II передаче несколько затруднено кратковременностью процесса, но зато охватывает больший диапазон оборотов коленвала – до 6600 мин<sup>-1</sup>, что полнее характеризует состояние двигателя.

Наибольшие требования к длине горизонтального участка предъявляет проверка выбега. Действительно, в нашем примере путь выбега со 130 км/ч достигает 2420 м. Однако при отсутствии такого участка можно ограничиться выбегом с 50 км/ч до нуля (652 м) или даже с 50 до 20 км/ч (528 м).

На I передаче разгон с 10 до 50 км/ч в двух вариантах состояния двигателя длится 3,0 и 3,56 с. Разница слишком мала для ручной засечки времени, так что I передачу не следует использовать для дорожного диагностирования.

### Выводы

1. При отсутствии горизонтального участка дороги большой длины диагностировать состояние силового агрегата по разгону можно на III и II передачах, но не на I передаче.
2. Вариация массовых характеристик автомобиля серьезно влияет на время и путь разгона, из-за чего возможна ошибочная трактовка результатов дорожного диагностирования. Поэтому желательно определять фактическую массу автомобиля.
3. При обосновании эталонных значений времени разгона следует вычислять разные значения для разных фактических масс.
4. Поскольку фактическая масса автомобиля и приведенные массы вращающихся частей часто

неизвестны, желательно найти простые способы оценки этих показателей, доступные для инженерно-технических работников автотранспорта.

5. Все приведенные расчеты выполнены по общепринятым моделям сопротивлений. При разработке реальных эталонных значений следует учитывать более сложную зависимость коэффициентов сопротивлений от скорости.

6. Расчетные результаты необходимо проверить в экспериментах.

### Список литературы

1. Чудаков Е.А. Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 463 с.
2. Зимелев Г.В. Теория автомобиля / Г.В. Зимелев. – М.: Маш. изд., 1959. – 312 с.
3. Методика расчета тягово-скоростных свойств и топливной экономичности автомобиля на стадии проектирования: учеб. пособие / Д.Е. Вохинов, В.В. Коновалов, В.В. Московкин [и др.]. – М.: МГАПИ, МГТУ “МАМИ”, 2000. – 43 с.
4. Рабинович Э.Х. Оценка коэффициентов сопротивлений движению автомобиля по пути выбега / Э.Х. Рабинович, В.П. Волков, Е.А. Белогуров // Украинський метрологічний журнал. – 2010. – № 4. – С. 47–52.
5. Белогуров Е.А. Динамические методы диагностирования автомобиля в дорожных условиях: автореф. дис.... к.т.н. / Е.А. Белогуров. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – 23 с.
6. Определение сопротивлений движению автомобиля Chevrolet Aveo методом выбега / Э.Х. Рабинович, В.П. Волков, Е.А. Белогуров, В.В. Белошицкий // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – Вып. 28. – С. 18–22.
7. Никитин П.А. Дорожные испытания автомобиля ВАЗ-2105 / П.А. Никитин // Труды 73-й междунар. студенч. науч. конф. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – С. 216–219.

8. Сопротивление движению легкового автомобиля на малых скоростях / В.П. Волков, Э.Х. Рабинович, Е.А. Белогуров [и др.] // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2012. – Вип. 25. – С. 214–220.
9. Раймпель Й. Шасси автомобиля. Амортизаторы, шины и колеса: пер. с нем. / Й. Раймпель; пер. с нем. В.П. Агапова. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
10. Сопротивление движению легкового автомобиля на скоростях 30...160 км/ч / В.П. Волков, Э.Х. Рабинович, Е.А. Белогуров [и др.] // Міжвузівський збірник (за галузями знань “Машинобудування та металообробка”, “Інженерна механіка”, “Металургія та металознавство”). – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. – Вип. 36. – С. 46–51.
11. Петрушов В.А. Мощностной баланс автомобиля / В.А. Петрушов, В.В. Московкин, А.Н. Евграфов; под общ. ред. В.А. Петрушова. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
12. Статистический анализ сопротивлений движению легкового автомобиля при выбеге / В.П. Волков, Э.Х. Рабинович, Е.А. Белогуров, Э.А. Кондратьев // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. – Севастополь, 2012. – Вип. 13. – С. 16–19. – (Сер. Машиноприладобудування та транспорт).
13. Rototest research institute. Powertrain performance graphs. Golf 2.0-97 (85 kW) STR-97031401 (<http://www.rri.se/popup/performancegraphs.php?ChartsID=335>).
14. Volkswagen Passat B3/B4/: Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту. – М.: Издат. дом “Третий Рим”, 2007. – 244 с.
15. Иванов С.Н. Аппроксимирующие зависимости для определения моментов инерции / С.Н. Иванов, П.И. Баженов // Автомобильная промышленность. – 1992. – № 10. – С. 19–20.
16. Homepage von Rüdiger Cordes. Cw-Werte von 1082 Fahrzeugen... ([http://rc.opelgt.org/frame.php?a=2&s1=kopf.html&h1=90&s2=rechnereien/cw.php&h2=1\\*](http://rc.opelgt.org/frame.php?a=2&s1=kopf.html&h1=90&s2=rechnereien/cw.php&h2=1*)).