

УДК 629.3.018

В.П. Волков,  
Э.Х. Рабинович,  
А.В. Маковецкий,  
М.Х. Буравцев,  
В.А. Зуев

## Дорожное диагностирование автомобиля

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

На результаты дорожного диагностирования автомобиля решающим образом влияет продольный профиль дороги. Самыми удобными средствами измерения продольного профиля в эксплуатации являются приемники спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС. Трудоемкость и затраты времени можно резко сократить, если записать скорость свободного скатывания по исследуемому спуску контрольного автомобиля с известными данными. Оба метода не дают требуемой точности измерения уклонов, но их приходится использовать, пока не найдены более точные и экономически оправданные методы и средства.

**Ключевые слова:** дорога, диагностирование автомобиля, измерение уклона, скорость, GPS/ГЛОНАСС, свободное скатывание, точность

### Введение

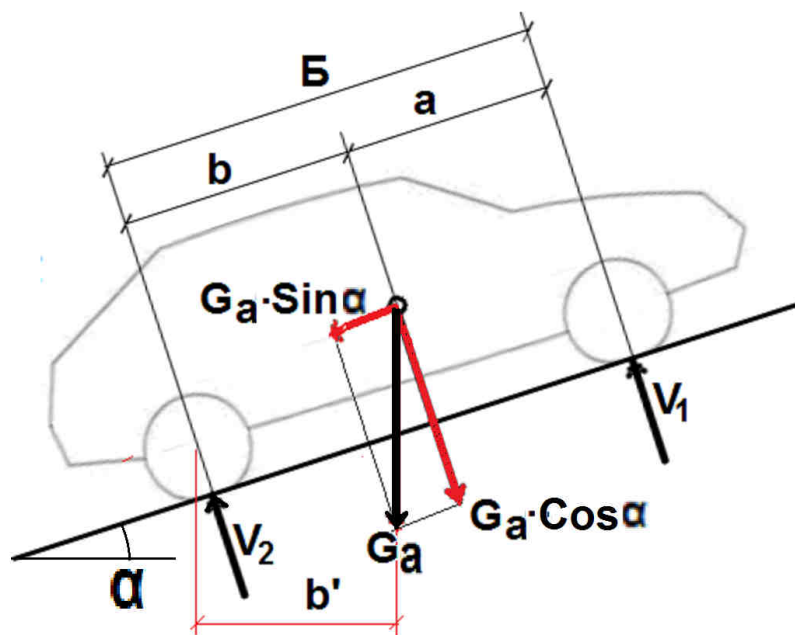
Годы разрухи украинской экономики не прошли даром и для автотранспорта. Отрасль осталась без тяговых диагностических стендов. Водители обращаются на СТО лишь при явных отклонениях от нормы – а это может быть снижение тяговых свойств и на 50, и на 70 %. Разумеется, при этом возрастает расход топлива, а это уже государственная проблема в стране, которая испытывает нехватку собственных нефтепродуктов и вынуждена импортировать их, порой даже в ущерб своей независимости. Поэтому разработка бесстендовых средств диагностирования тяговых свойств – задача важная и актуальная. Особенно нужны методы и средства, которые могут применять сами водители автомобилей без закупки дорогого оборудования – это дорожное диагностирование с помощью бытовых средств (телефон с секундомером и видеокамерой, навигатор или другой приемник спутниковых сигналов).

### 1 Анализ последних исследований и публикаций

Дорожные испытания автомобилей – обязательная составляющая автомобильной науки и создания новых транспортных средств. Применение дорожных испытаний для диагностирования автомобилей в эксплуатации разработано гораздо слабее, да и рекомендуется пользователям в формах, недоступных рядовому водителю, например, измерение максимальной скорости – а это нарушение ПДД. В последние годы исследователи ХНАДУ уделяли большое внимание этому направлению, в частности – сопротивлению движению современных автомобилей [1, 2]. Опыт показал, что проверка по общепринятым рекомендациям требует прямых горизонтальных участков дороги длиной 2...3 км – а доступны в лучшем случае участки до 500 м. Интенсивно разрабатываются методы и нормативы диагностирования автомобилей по разгону на понижающих передачах и выбегу с 50 до 20 км/ч [3]. Но все же массовый, основной вид движения автомобиля – это езда по дороге с уклоном. Горизонтальных дорог в наших местностях почти нет. Когда требуется действительно горизонтальная

поверхность, например, для рекордных заездов, выезжают на высохшие соляные озера. Исследования движения по уклону прямо связаны с практикой и потому актуальны.

**Теория** движения по уклону проста. Силовой баланс дополняется скатывающей силой  $P_{\alpha} = \pm G_a \cdot \sin \alpha$ , сумма вертикальных реакций опоры на колеса уменьшается, до  $V_1 + V_2 = G_a \cdot \cos \alpha$ , несколько изменяется распределение весовых нагрузок по осям и, соответственно, реакции опоры:  $V_1 = G_a \cdot b \cdot \cos \alpha / B$ ;  $V_2 = G_a \cdot (B - b \cdot \cos \alpha) / B$  (рис. 1).



Обозначения:

$\alpha$  – угол наклона дорожного полотна к горизонту,  
 $\sin \alpha = i$  – уклон;  
 $G_a$  – вес автомобиля,  
 $B$  – колесная база,  
 $a$  и  $b$  – расстояния от осей колес до центра масс автомобиля;  
 $V_1$  и  $V_2$  – нормальные реакции опоры на колесах передней и задней осей соответственно.

Рис. 1. Схема сил, действующих на автомобиль на дороге с уклоном

Последнее важно при анализе разгона автомобиля на нижних передачах, когда уменьшение нормальной реакции может вызвать пробуксовку ведущих колес (передних на подъеме, задних на спуске).

Далее, при свободном скатывании от малой начальной скорости по спуску с постоянным уклоном должно происходить монотонное возрастание скорости до ее стабилизации в момент, когда сопротивления движению уравниваются со скатывающей силой. Однако в реальности наблюдаются нерегулярные колебания скорости. Это заставляет предполагать, что уклон дороги – величина не постоянная.

Очевидно, что сегодня первоочередная задача исследований в этой области сводится к измерению реального угла  $\alpha$  и его вариации по длине мерного участка, т.е. к построению продольного профиля дороги. В дальнейшем могут вызвать интерес более тонкие эффекты, например, изменение прогибов подвески и, соответственно, дополнительное перераспределение весовой нагрузки; особенности поведения ветра в приземном слое и его различие в зоне подъемов и спусков дороги...

Известны способы определения продольного уклона участка автомобильной дороги с помощью геодезических инструментов. Для определения продольного профиля трассы используется теодолитная, тахеометрическая съемка и нивелирование поверхности. К недостаткам этих способов следует

отнести большую трудоемкость и низкую производительность измерения. В связи с этим геодезические инструменты применяются в основном при проектировании автомобильных дорог. В прикладных задачах для измерения уклонов используют различные способы и устройства, например, водяной уровень, пузырьковые уровни, механические и электронные эклиметры и инклинометры, трехосные датчики ускорений, а также косвенные методы, например, оценку уклона по скорости движения контрольного автомобиля, для которого установлена зависимость этой скорости от известных уклонов при фиксированном положении органа управления подачей топлива [4]. В последние годы все чаще используются приемники спутниковых сигналов, хотя у них точность измерения высот неудовлетворительна. Хорошим примером сочетания разных методов является работа [5], в которой описано измерение уклона дороги с помощью емкостных датчиков ускорений, сигналов GPS/GLONASS и водяного уровня. Получен средний уклон  $3^\circ$  со средней погрешностью  $0,2^\circ$  и максимальной  $0,47^\circ$  (соответственно 8,8 и 15,6%).

В ряде случаев использована дорога с номинальным уклоном  $17\text{‰}$  (около  $1^\circ$ ), но для наших задач описанные погрешности слишком велики. Чтобы получить точность измерения расхода топлива 1 %, нужно иметь погрешность менее 0,5, если же ограничиться точностью 3 %, то можно допустить погрешность до  $1,6\text{‰}$  (т.е. около  $0,1^\circ$ ).

При торможении вклад скатывающей силы невелик по сравнению с действием тормозных сил. Так, если тормозная система сообщает автомобилю замедление  $5,8\text{ м/с}^2$ , то добавка от скатывающей силы ( $j_\alpha = 9,81 \cdot i / \delta$ , где  $\delta$  – коэффициент учета вращающихся масс) составит менее  $10i$ , т.е. при уклонах от  $1^\circ$  до  $4^\circ$  – от 0,2 до 0,6  $\text{м/с}^2$ . Однако на мокрой или скользкой дороге с коэффициентом сцепления около 0,1, где тормозная сила создает замедление всего  $0,95\text{ м/с}^2$ , этот вклад будет намного ощутимее – 20...60 %.

**Задача исследования** – повысить точность определения продольного профиля мерного участка дороги доступными средствами, т.е. приемниками спутниковых сигналов и анализом сопротивлений движению автомобиля.

## 2 Методика и результаты наших исследований

В течение ряда лет мы испытываем автомобили на участке дороги 1 класса длиной около 2,5 км с уклоном  $17\text{‰}$  (по паспорту дороги). Поведение автомобилей при движении накатом на спуске давало повод предположить, что уклон этот непостоянный. Измерения приемником Magellan SporTrak подтвердили эту мысль (рис. 2, слева). Более поздние измерения приемником Triton 500 также показали отклонения от линейности, но в других местах и с явной зависимостью от скорости. Правая диаграмма на рис. 2 – это фрагмент записи ряда заездов после обработки штатной программой Vantage Point фирмы Magellan. Первый от начала отсчета треугольник – это график подъема на уклон при движении с севера на юг и последующего спуска от южной точки разворота обратно к начальной северной точке разворота. Более темное поле под ним ограничено сверху графиком скорости, которая составляла в среднем 40 км/ч. Провал под вершиной треугольника – это выполненный на меньшей скорости разворот для движения в обратном направлении.

В следующем заезде выполнялась проверка автомобиля по разгону в двух направлениях. Шел разгон до 100 км/ч, затем выбег примерно до 45 км/ч,

разворот и разгон с последующим выбегом в обратную сторону. График высоты далек от треугольника, судить по нему о продольном профиле дороги нельзя.

В последнее время мы использовали двухсистемный приемник GPS/ГЛОНАСС модели Garmin eTrex 30 с барометрическим альтиметром.

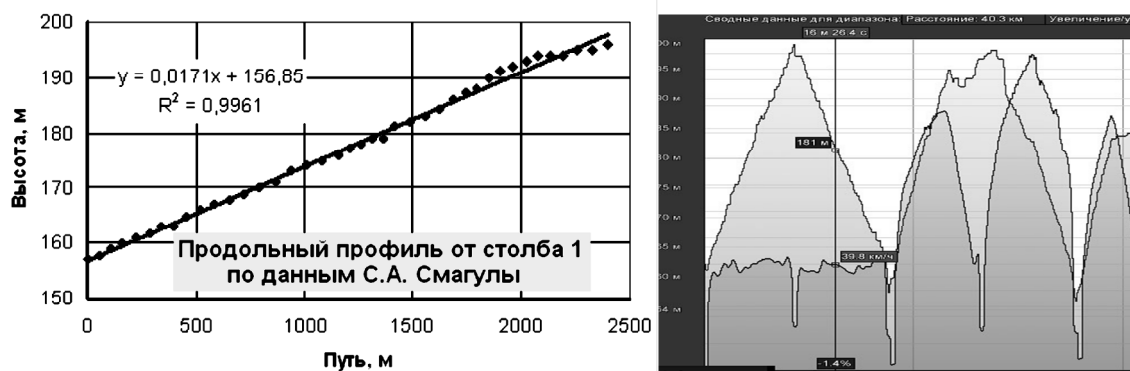


Рис. 2. Продольные профили, снятые приемниками SporTrak (слева) и Triton 500

Точность замера высот альтиметром выше, чем дают спутниковые сигналы. Совершенствуя методику математической обработки записей, удалось улучшить разрешающую способность приблизительно с 3 футов (ок. 0,9 м) до 0,48 м – именно такова высота ступенек на диаграмме зависимости высоты от пути, т.е. удаления от начала отсчета, например, одной из точек разворота. Совершенствование методики обработки включало в себя использование выходных сигналов не в привычных и удобных форматах .plt и .kml, а в формате .grx, в котором сигнал имеет значительно больше разрядов и не округлен. Это потребовало дополнительных трудоемких расчетов, но повысило разрешение. Далее в полученный график высот вносились поправки, отражающие общее изменение атмосферного давления (по внешним данным). В общем повышенная чувствительность к изменениям атмосферного давления усложняет и сами измерения, и их обработку, но это окупается повышением точности.

После ряда проб мы выбрали следующую процедуру снятия продольного профиля дороги: оператор с приемником находится внутри автомобиля. Приоткрыто окно с подветренной стороны (т.е. если ветер дует справа, то открывать надо окно с левой стороны, опуская стекло на 40...50 мм). Это нужно для уравнивания давления воздуха в салоне с атмосферным. Автомобиль должен двигаться с постоянной скоростью 30 км/ч или менее с как можно меньшими отклонениями скорости, без резких маневров. Высказанное в [5] мнение о целесообразности выполнения замеров на высокой скорости нашим опытом не подтверждается.

Замеры выполнить при проезде в прямом и обратном направлении с минимальными паузами. Количество пар замеров – две или более. После разворота автомобиля для движения в противоположном направлении поднять стекло с наветренной стороны и опустить с подветренной. Не рекомендуется выполнять замеры с остановками в каждой точке – у нас при этом падала точность и возрастал разброс результатов. Желательно находить подробные сведения об изменении атмосферного давления в данной местности.

При обработке данных считать искомыми точками моменты изменения индикации высоты. Обычно результаты измерения при движении на север и на юг

заметно различаются, например, при движении на юг получен средний уклон дороги 0,01736, на север – 0,01794. Однако это различие может измениться при введении поправок на атмосферное давление. После внесения всех поправок приняты следующие характеристики уклона изученного участка дороги: среднее значение  $m=18,228$  ‰, среднеквадратичное отклонение  $\sigma=0,54$  ‰; профиль близок к линейному, однако возможны заметные отклонения: по правилу двух сигм 95,4 % всех возможных случайных значений уклона лежат в пределах  $\pm 1,08$  ‰, т.е. уклон может составлять от 17,14 до 19,31 ‰.

В некоторых задачах линейное представление продольного профиля может оказаться слишком упрощенным. Чтобы проверить это предположение, зависимости высоты от пути были аппроксимированы полиномами шестой степени (рис. 3). Расхождения кривых регрессии, полученных в разные дни, очевидны, но форма их явно подобна. Видимо, вариация уклона действительно имеет место и поверхность дороги – не идеальная плоскость. Так что нужны измерения более точными средствами, поскольку все описанные результаты получены на пределе возможностей приемника спутниковых сигналов.

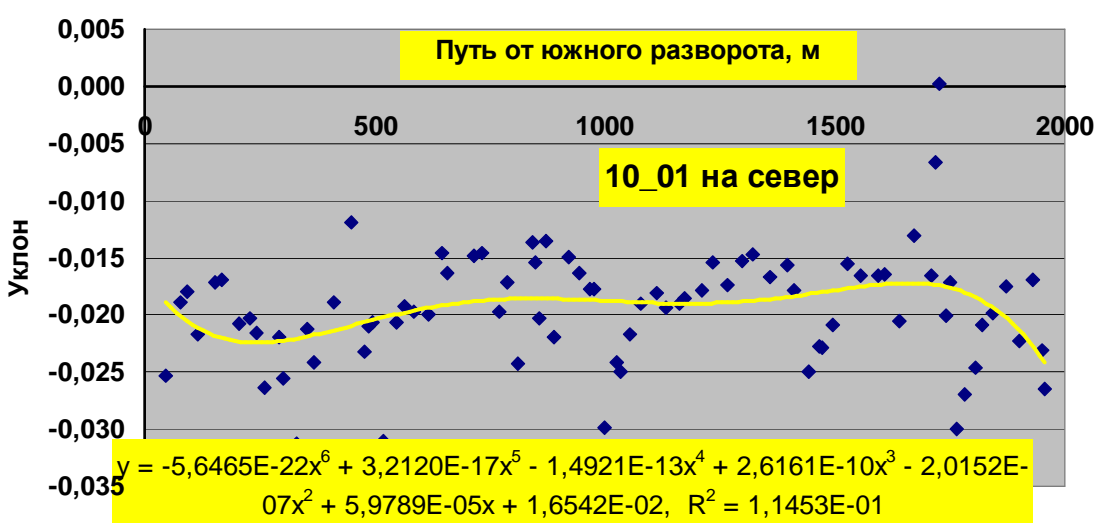
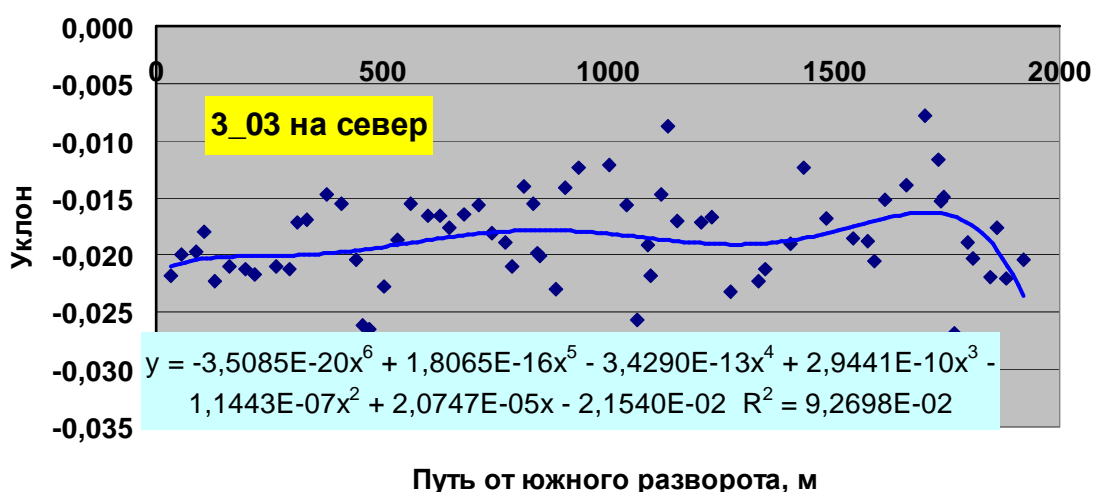


Рис. 3. Продольный профиль мерного участка дороги по замерам приемника спутниковых сигналов Garmin eTrex 30 в двух экспериментах

Было решено использовать в качестве независимой проверки упомянутое выше свободное скатывание автомобиля на спуске. Контрольный автомобиль Hyundai i30 был установлен в начале спуска, кратковременным включением двигателя выведен из состояния покоя, после чего начал свободное скатывание при разомкнутом сцеплении. Диаграмма скорости скатывания показана на рис. 4, где приведены три массива точек: Garmin – необработанные, сглаженные по трем точкам – и снятые приемником Magellan Triton и сглаженные по десяти точкам. Расхождения между двумя сглаженными массивами незначительны.

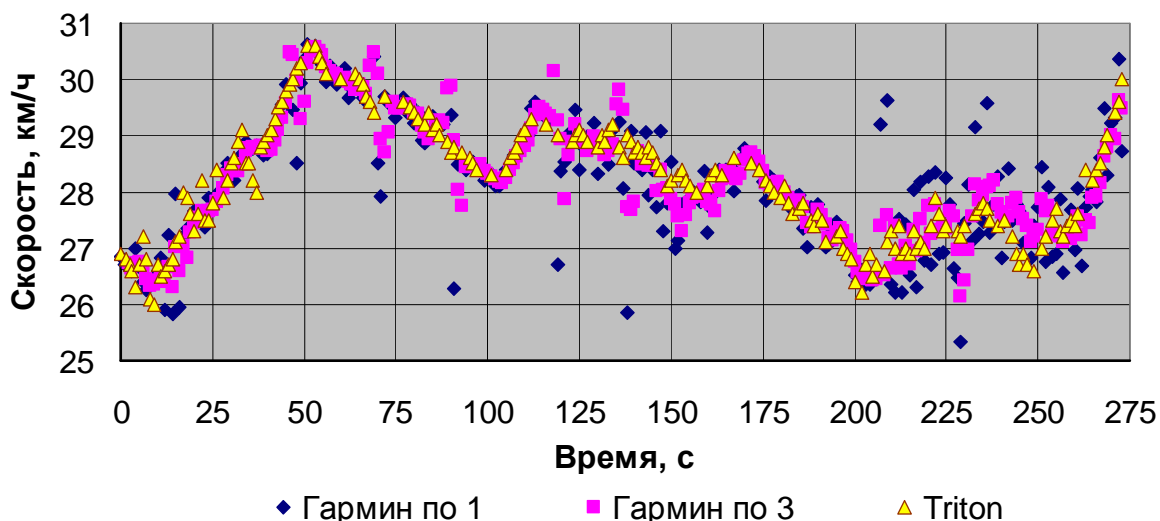


Рис. 4. Свободное скатывание автомобиля Hyundai i30 на спуске

На рис. 5 приведена сглаженная по десяти точкам диаграмма ускорения в функции пути.

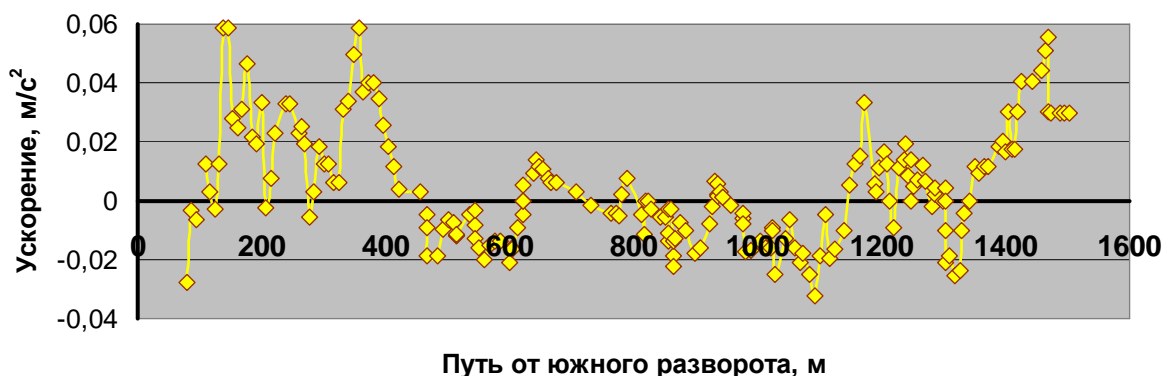


Рис. 5. Ускорение свободного скатывания автомобиля Hyundai i30

Чтобы получить по ускорениям значения уклонов, нужно выполнить ряд предварительных расчетов. Составим расчетное уравнение.

$$j = \frac{P_i - P_f - P_{xx} - P_w}{\delta \cdot m} \quad (1)$$

где  $P_i$  – скатывающая сила, Н;

$P_f$  – сила сопротивления качению, Н;

$P_{xx}$  – сопротивление холостого хода трансмиссии, Н;

$P_w$  – сопротивление воздуха, Н;

$m$  – масса автомобиля в рассматриваемом случае, кг;

$\delta$  – коэффициент учета вращающихся масс.

Формулы для расчета сил:

$$P_i = G_a \cdot i = m \cdot g \cdot \sin \alpha; \quad P_f = m \cdot g \cdot f; \quad P_w = 0,5 \rho \cdot C_x \cdot F \cdot \left( \frac{v_a}{3,6} + v_w \right)^n, \quad (2)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$F$  – лобовая площадь автомобиля, м<sup>2</sup>;

$v_a$  и  $v_w$  – скорость автомобиля, км/ч, и ветра, м/с, соответственно;

$n$  – показатель степени.

После очевидных преобразований формула для расчета уклона приобретает вид

$$i = \frac{\delta \cdot j + (P_{xx} + P_w) / m}{g} + f. \quad (3)$$

Сопротивления холостого хода трансмиссии в ньютонах в зависимости от скорости приняты по данным В.А. Зуева:

$$P_{xx} = -5,8364E-06 \cdot v^3 + 0,0012723v^2 + 0,27204v + 5,8735 \quad (4)$$

Изменение показателя степени  $n$  в зоне скоростей от 1 до 15 м/с (от 3,6 до 54 км/ч) описывается усредненным по 84 автомобилям выражением

$$n = -3,9593E-07 \cdot v^4 + 7,3509E-05 \cdot v^3 - 0,0050927 \cdot v^2 + 0,1522 \cdot v + 0,51471 \quad (5)$$

Данные контрольного автомобиля Hyundai i30 в состоянии эксперимента: масса с людьми и приборами – 1515 кг,  $C_x = 0,33$ ,  $F = 2,2$  м<sup>2</sup>; установлены зимние шины Fulda Montero 2 195/65 R15 91T M+S. Принята следующая зависимость коэффициента сопротивления качению от скорости (наша обработка данных из [5]):

$$f = 3,11238 \cdot 10^{-7} v^2 - 1,25429 \cdot 10^{-5} v + 1,36005 \cdot 10^{-2}. \quad (6)$$

По рекомендациям [6] вычислен понижающий коэффициент 0,89, учитывающий уменьшение сопротивления качению при неполной нагрузке на шины.

Результаты расчета уклона по скорости скатывания автомобиля приведены на рис. 6 в сопоставлении с представленными выше вариантами продольного профиля. Как видно из диаграммы, аппроксимирующие кривые двух экспериментов с использованием более дорогого приемника Garmin близки друг к другу на большей части пути автомобиля (расхождение порядка 1 промилле), но заметно (до 5 ‰) расходятся в начале и в конце диаграммы. Кривая, построенная по скорости скатывания автомобиля, близка по форме к экспериментальной кривой от 10.01.16, но показывает несколько меньшие уклоны – на 3...5 ‰.

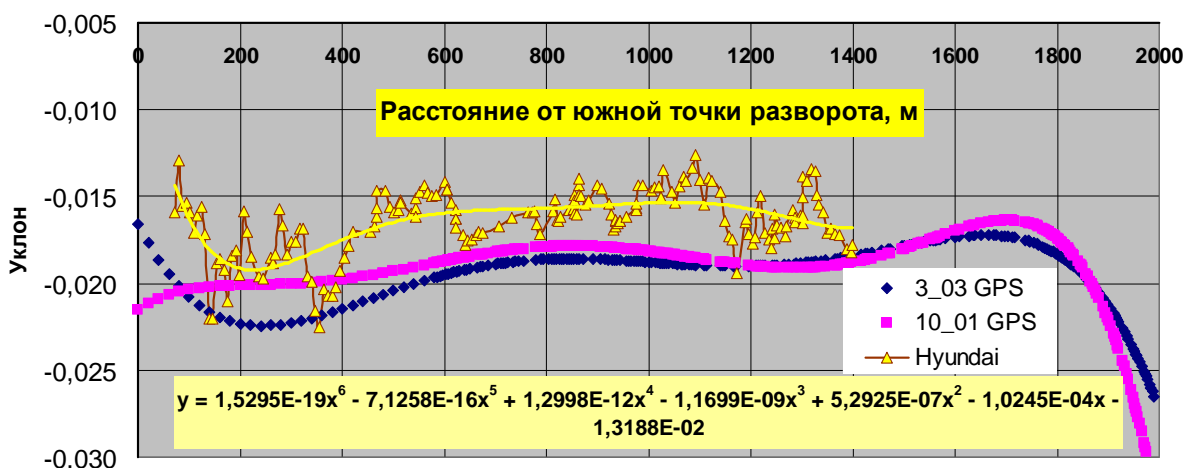


Рис. 6. Варианты продольного профиля мерного участка дороги, построенные по замерам приемником Garmin в двух экспериментах, и по вариациям скорости скатывания автомобиля Hyundai i30

Задачу можно упростить, используя замедления выбега на одном и том же участке дороги и при одной и той же скорости, но в разных направлениях – на подъем ( $j_{up}$ ) и на спуск ( $j_{dn}$ ). Система уравнений в этом случае

$$\begin{cases} P_i - P_f - P_{xx} - P_w = \delta \cdot m_a j_{up} \\ -P_i - P_f - P_{xx} - P_w = \delta \cdot m_a j_{dn} \end{cases} \quad (7)$$

Отсюда при отсутствии ветра

$$i = \sin \alpha = \delta \cdot (j_1 - j_2) / (2 \cdot g). \quad (8)$$

На одном и том же участке дороги при средней скорости 29 км/ч средние замедления составили  $j_{up} = 0,31241$  и  $j_{dn} = 0,00402$  м/с<sup>2</sup>. Соответствующий уклон  $i = 0,016104$ . Скорость ветра во время испытаний была 1,0...1,2 м/с, направление  $\pm 60^\circ$  от перпендикуляра к оси дороги. С учетом возможного влияния ветра  $i = 0,0161 \pm 0,0003$ . Расчеты с использованием показаний альтиметра таких средних уклонов не давали. Остается открытым вопрос, какой из методов более надежен.

Это заставляет продолжать поиск более точных методов и средств измерения уклона дороги в эксплуатации. Одно из направлений такого поиска –



уточнение фактического коэффициента сопротивления качению, поскольку именно оно сильнее других факторов влияет на результат расчета уклона.

### Выводы

На результаты дорожного диагностирования автомобиля решающим образом влияет продольный профиль дороги. Самыми удобными средствами измерения продольного профиля в эксплуатации являются приемники спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС. Трудоемкость и затраты времени можно резко сократить, если записать скорость свободного скатывания по исследуемому спуску контрольного автомобиля, данные которого известны. Оба метода не дают требуемой точности измерения уклонов, но их приходится использовать, пока не найдены более точные и экономически оправданные методы и средства.

### Список литературы

1. Экспериментальное определение сопротивлений движению автомобиля / Рабинович Э.Х., Волков В.П., Зуев В.А., Белогуров Е.А. // ЕКОВАРНА '2008. С. 379-386
2. Рабинович Э.Х. Измерение тягово-скоростных показателей автомобиля по времени разгона на разных передачах. / Рабинович Э.Х., Волков В.П., Зыбцев Ю.В. // Український метрологічний журнал. — 2012. — №4. — С.25-30.
3. Patent RU 1796903 : cl. **G01C7/04** // [Электронный ресурс] Доступ: <http://www.findpatent.ru/patent/179/1796903.html>
4. Scientific-practical conference "Alternative Energy Sources in the Transport and Technological Complex: Problems and Prospects of Rational Use" (Voronezh, 2014) / Shein V.S. et al. Determination of the Inclination of a road... pp. 163-168.
5. Automotive Handbook BOSH, Robert Bosch GmbH 4th edition // <http://www.libex.ru/detail/book262735.html>
6. Reimpell J. The Automotive Chassis: Engineering Principles / Reimpell J., Stoll H., Betzler J. Translated from the German. Second English Edition. – Butterworth-Heinemann, 2001. Woburn MA (USA). 444 p.

Поступила в редакцию 13.06.2016

## Vehicle on Road Diagnostics

Results of diagnosing of cars on the road are influenced in a decisive way by a vertical alignment of road, i.e. the average size and a variation of inclination. Receivers of satellite signals of GPS/GLONASS are the most convenient means for measurement of a vertical alignment in operation. Labor and time expenses can be reduced if to write down the speed of free rolling on the studied descent of the car with the known specs. Both methods don't give the required accuracy of measurement of inclination, but they should be used, more exact and economically justified methods and means aren't found yet.

**Key words:** road, car test, measurement of inclination, speed, GPS/GLONASS, free rolling, accuracy

## Дорожнє діагностування автомобіля

На результати дорожнього діагностування автомобіля дуже впливає поздовжній профіль дороги. Найзручнішими засобами виміру поздовжнього профілю в експлуатації є приймачі супутникових сигналів GPS/ГЛОНАСС. Трудомісткість і витрати часу можна скоротити, якщо записати швидкість вільного скочування по досліджуваному спуску контрольного автомобіля, дані якого відомі. Обидва методи не дають необхідної точності виміру ухилів, але їх доводиться використовувати, поки не знайдені більше точні й економічно виправдані методи й засоби.

**Ключові слова:** дорога, діагностування автомобіля, вимір ухилу, швидкість, GPS/ГЛОНАСС, вільне скочування, точність

### Сведения об авторах:

**Волков Владимир Петрович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра технической эксплуатации и сервиса автомобилей, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет.

**Рабинович Эрнест Хаимович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра технической эксплуатации и сервиса автомобилей, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет.

**Маковецкий Андрей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра автомобилей и транспортной инфраструктуры, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Буравцев Михаил Хаимович** – инженер, кафедра технической эксплуатации и сервиса автомобилей, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет.

**Зуев Владимир Александрович** – инженер, кафедра технической эксплуатации и сервиса автомобилей, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет.