

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РАСХОДА ТОПЛИВА ПРИ ДВИЖЕНИИ АВТОМОБИЛЯ ПО ЗАДАННОМУ МАРШРУТУ

Огороднов С.М., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Малеев С.И.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, ГСП-41, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24), e-mail: makvl2010@gmail.com

В статье произведен анализ работ по оценке расхода топлива автомобилей. Рассмотрены основные факторы, влияющие на показатели топливной экономичности. Выбраны характерные маршруты для проведения экспериментальных заездов. Предложена и опробована методика определения углов наклона продольного макропрофиля дорожной поверхности для выбранных участков. Описано оборудование, используемое при проведении испытаний. Приведены экспериментально полученные данные по распределению скоростей движения автомобиля, а также по распределению углов наклона продольного макропрофиля дорожной поверхности на выбранных участках. Разработана модель и проведены виртуальные испытания с использованием программного пакета GT-SUITE. Произведен анализ результатов натурных испытаний и компьютерного моделирования, который показал, что применение данной расчетно-экспериментальной методики на стадии проектного расчета и доводочных работ вполне обоснованно.

Ключевые слова: легкий коммерческий автомобиль, расход топлива, макропрофиль, топливно-экономическая характеристика.

DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL METHODOLOGY FOR EVALUATING FUEL CONSUMPTION OF VEHICLE WHEN MOVING ON SPECIFIED ROUTE

Ogorodnov S.M., Zezulin D.V., Makarov V.S., Maleev S.I.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, street Minina, 24), e-mail: makvl2010@gmail.com

In the article the analysis of publications about the evaluation the fuel consumption of vehicles has been produced. The main factors influencing indicators of the fuel efficiency have been considered. Specific routes for experimental runs have been chosen. Methodology for determining the angles of inclination of the longitudinal macrorelief of the road surface for selected routes has been proposed. Experimental data on the distribution of vehicle velocities on the specified routes have been presented. Virtual modeling of vehicle movement using a software GT-SUITE has been conducted. Comparison of test results with the calculation results has proved the usefulness of the proposed methodology at the design stage and finishing work.

Keywords: light commercial vehicle, fuel consumption, macrorelief, fuel-economic characteristics.

При оценке эффективности работы, выполняемой транспортным средством (ТС), в связи с постоянным ростом стоимости топлива для двигателя, все большее значение приобретают показатели топливной экономичности. Стоимость топлива может составлять более 30% всех затрат на эксплуатацию автомобиля, и эта часть затрат продолжает увеличиваться. Поэтому при выборе потребителем модели ТС показатели эксплуатационного расхода топлива могут приобретать решающее значение.

Оценка расхода топлива при разработке новых моделей ТС или их модернизации, несмотря на сложность процесса, становится одной из важнейших задач, решение которой обеспечивает сравнение эффективности использования различных двигателей или вариантов трансмиссии на стадии проектных работ, снижение издержек на доводочные работы и повышение конкурентоспособности модели автомобиля.

Известны статистические методы, используемые при расчете норм расхода топлива, устанавливаемых для эксплуатирующихся автомобилей. Методы основаны на статистической обработке результатов длительных практических исследований расхода топлива большим количеством однотипных ТС при движении по определенному маршруту. Такой подход позволяет учесть реальные дорожные условия, нагрузочные и скоростные режимы движения и определить основные составляющие расхода топлива в процессе выполнения транспортной работы. Статистический подход к решению проблемы позволяет получить достаточно достоверную оценку расхода топлива в условиях эксплуатации, но возможен только на стадии завершения проектных работ и не избавлен от элементов субъективизма, обусловленных влиянием на характер движения ТС личностных свойств водителей, интенсивности дорожного движения и других факторов, не связанных с конструктивными особенностями автомобиля.

Возможности известных теоретических методик расчета расхода топлива, например [3], несмотря на неоспоримую логику алгоритма расчета, ограничены вследствие идеализации условий работы силового агрегата и движения автомобиля, но могут использоваться в качестве расчетных методов в первом приближении. Основным недостатком метода следует считать заложенную в алгоритме методики неопределенность указаний о выборе степени дискретизации функции плотности вероятности коэффициента сопротивления дороги, существенно влияющую на точность определения расхода топлива. Недостатком методики можно считать и отсутствие указаний о выборе закона распределения скоростей при движении автомобиля на различных передачах, несмотря на то что многие частные и обобщающие показатели, используемые при оценке тягово-скоростных свойств и топливной экономичности ТС, являются функцией скорости.

На рис. 1 показана последовательность определения расхода топлива графоаналитическим методом [3] при движении автомобиля по заданному маршруту. Для определения расхода топлива предварительно рассчитываются динамическая $D=f_1(V_a)$ и топливно-экономическая $Q_s=f_2(V_a)$ характеристики автомобиля, и задается характеристика макропрофиля маршрута движения в виде функция плотности вероятности коэффициента сопротивления дороги. На рисунке 1 видно, что при заданном значении функции, однозначно определяющем величину силы сопротивления дороги, движение возможно с разными скоростями, например соответствующими точкам пересечения горизонтальной линии BA с кривой динамического фактора D_{III} .

В соответствии с методикой [3] рекомендуется выбирать большее значение скорости, что не всегда осуществимо и не в полной мере соответствует движению в реальных условиях. Приведенный пример свидетельствует о необходимости адекватного решения указанных проблем при разработке практической методики расчета расхода топлива.

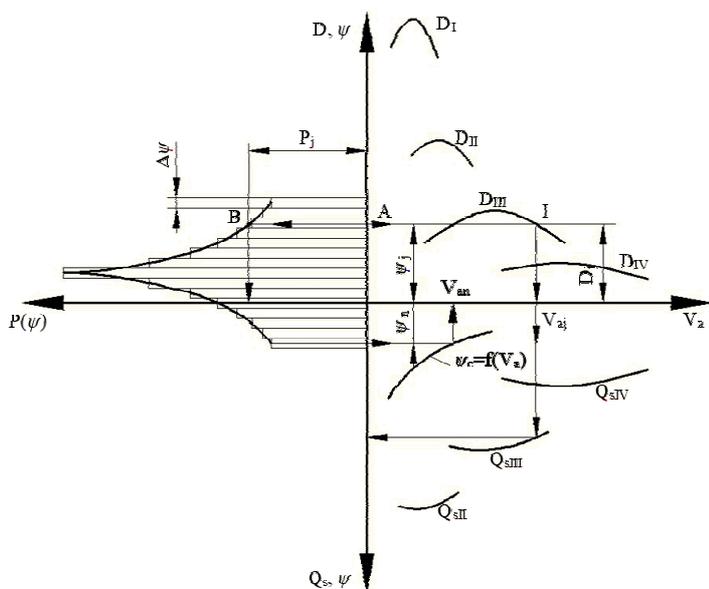


Рис. 1. Графоаналитический метод определения расхода топлива на заданном маршруте.

Практическая методика расчета расхода топлива при движении по заданному маршруту должна обеспечивать расчет основных характеристик тягово-скоростных свойств и топливной экономичности автомобиля с использованием реальных характеристик макропрофиля пути и скоростного режима.

На скорость движения автомобиля влияет большое количество различных факторов. В результате анализа за режимов движения ТС в условиях эксплуатации при разработке расчетно-экспериментальной методики было

признано необходимым по возможности исключить влияние на скорость автомобиля интенсивности транспортного потока и факторов, связанных с организацией его движения. Возмущение, действующее на колеса автомобиля и формируемое микропрофилем поверхности [2; 4; 5; 9; 10], для большинства дорог I, II и III категорий с асфальтобетонным покрытием на скорость движения влияет мало.

Принятые допущения приближают условия движения автомобиля к идеализированным, зависящим в большей степени от динамических характеристик автомобиля. При выполнении указанных условий вероятность совпадения результатов аналитических расчетов расхода топлива и полученных экспериментально может быть увеличена.

Существенным недостатком, при выполнении прочих требований, может оказаться манера езды водителя, но и эта особенность может контролироваться с учетом задания на испытание.

Наиболее значимым фактором, характеризующим условия движения автомобиля по заданному маршруту и влияющим на расход топлива, остается сопротивление движению, зависящее от величины сопротивления качению колес автомобиля и угла продольного уклона поверхности дороги. Поэтому при оценке топливной экономичности ТС должны быть определены характеристики выбранных маршрутов.

Коэффициент сопротивления движению (дороги) определяется выражением $\psi = f \pm \alpha$, где ψ – коэффициент сопротивления дороги, f – коэффициент сопротивления качению, α – величина продольного уклона поверхности дороги, рад.

Углы продольных уклонов поверхности дороги даже в относительно равнинной местности могут достигать значений $\alpha = \pm 0,075$ рад, в то время как коэффициент сопротивления качению для дороги с асфальтобетонным покрытием не превышает значений $f = (0,015 - 0,020)$.

При экспериментальном определении характеристик маршрутов и параметров работы силового агрегата практически удалось избежать влияния на режим движения автомобиля факторов, обусловленных дорожной обстановкой. Для проведения эксперимента выбиралось наиболее подходящее время, а для повышения точности результатов учитывались только показания приборов, относящиеся к движению на автомобильных дорогах вне городов. Предложенный подход к аналитической оценке топливной экономичности автомобилей при движении по заданному маршруту обеспечивает возможность объективного вмешательства в конструкцию силового агрегата и автомобиля в целом на всех стадиях проектных и доводочных работ. Одновременно обеспечивается адекватное воспроизведение условий движения ТС при моделировании с помощью программных комплексов (ПК). Для оценки точности метода и выработки требований к степени дискретизации параметров, используемых при расчетах, экспериментальным путем получены характеристики распределения коэффициентов сопротивления дорог маршрутов и некоторых параметров автомобиля.

Для исследования топливной экономичности автомобиля были выбраны маршруты с разной холмистостью на загородных дорогах Нижегородской области. Нижегородская область включает в себя 48 районов, различных по растительности, рельефу и наличию овражно-балочной сети. Предварительно выполненные аналитические исследования и опыт авторов работы позволили установить, что для получения адекватных результатов при аналитических исследованиях топливной экономичности характеристики макропрофиля дорог должны быть получены для участков маршрута определенной протяженности.

Для холмистой или сильно пересеченной местности длина измеряемого участка маршрута должна составлять не менее 50...60 км, а замеры необходимо выполнять при движении автомобиля в прямом и обратном направлениях. Для местности с малым числом холмов, крутых спусков и подъемов и неразвитой овражно-балочной сетью построение адекватных характеристик плотности распределения продольных углов обеспечивается при длине маршрута до 30...40 км в одну сторону. Увеличение длины маршрутов практически не влияет на характеристики распределения продольных углов макропрофиля дороги. Предложенная методика измерения характеристик микропрофиля отражает свойства реальных маршрутов и позволяет получить симметричные характеристики плотности распределения. При проведении эксперимента по оценке влияния характеристик макропрофиля и распределения скоростей движения на величину расхода топлива были выбраны пять маршрутов с наиболее характерными, но различными рельефами местности.

В качестве объекта исследования использовался легкий коммерческий автомобиль ГАЗель NEXT с дизельным двигателем CUMMINS ISF 2.8 с электронным блоком управления, в состав которого входит шина CAN, предназначенная для передачи команд управления и информации. Сигналы шины CAN выведены на диагностический разъём в салоне автомобиля, что позволяет с помощью дополнительного оборудования Electronic control module (ECM) регистрировать следующие параметры: мгновенный расход топлива, частоту вращения коленчатого вала, скорость автомобиля. Регистрация географических координат и уклонов дороги на мерном участке выполняется с помощью приложения «Google Планета Земля». Замеры параметров макропрофиля производились с помощью оборудования Racelogic VBOX 20SL3.

В результате испытаний получена информация в виде файлов системы Racelogic VBOX 20SL3. Файлы обработаны в программе постобработки Racelogic – Performance Tools. Использование этой программы позволяет импортировать данные в формат «*.kml» для работы в программе «Google Планета Земля» (рис. 2).

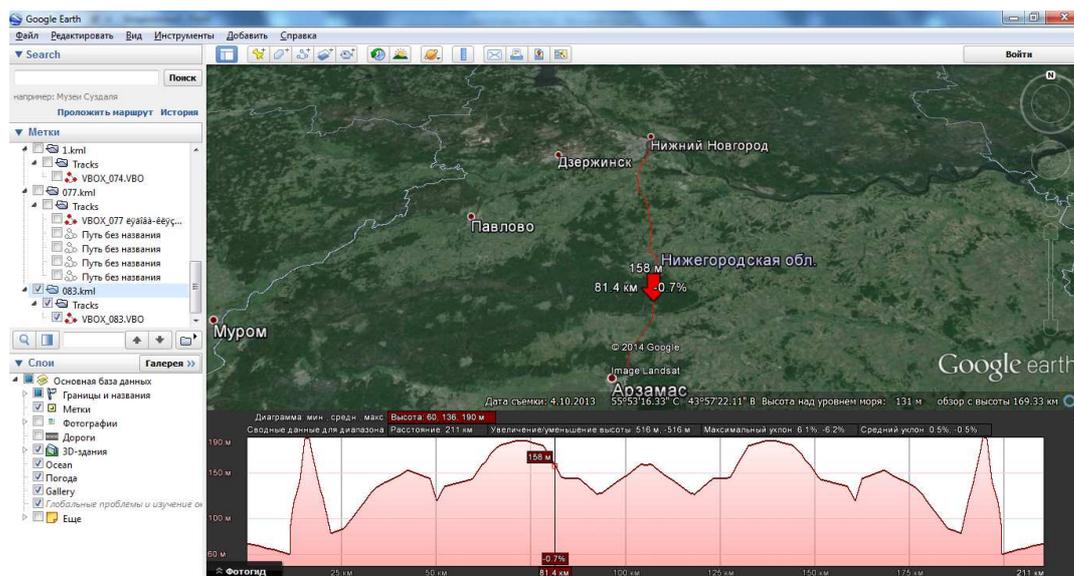


Рис. 2. Рельеф маршрута № 5 в программе «Google Планета Земля».

Полученные зависимости «пробег – высота над уровнем моря» достаточны для построения характеристик плотности распределения продольных углов макропрофиля и, в последующем, коэффициентов сопротивления дорог выбранных маршрутов движения. Данные об относительном пробеге автомобиля на различных скоростях и относительном пробеге на различных передачах в коробке передач (КП) получены путем обработки результатов записи с устройства ECM.

Методика состоит из следующих основных этапов:

- выписка исходной информации о продольном профиле (деление маршрута на участки с синхронным определением значений уклонов для каждого из них);

- распределение участков маршрута по группам в зависимости от величины уклона и расчет количества участков в каждой группе (частотность попадания участков в каждую группу);
- оформление конечных результатов в виде таблиц и графиков с последующей аналитической обработкой;
- построение функций плотностей распределения углов продольного макропрофиля дороги.

Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена с помощью программного комплекса (ПК) MATLAB. Пример обработки результатов эксперимента показан на рисунке 3. Результаты обработки экспериментальных данных для маршрута № 5 приведены на рисунке 4. Среднеквадратические величины углов продольных уклонов дорог маршрутов 1-5 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Среднеквадратические величины углов продольных уклонов дорог

Маршрут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
СКО, рад	0,005	0,02	0,021	0,007	0,022

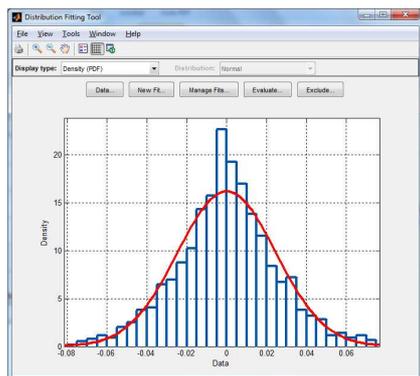


Рис. 3. Пример обработки распределения уклонов на маршруте №5 в ПК MATLAB.

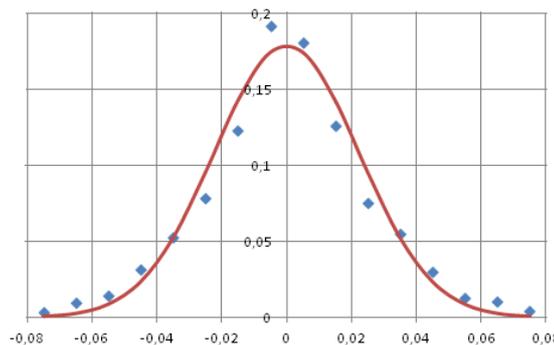


Рис. 4. Плотность вероятности продольных углов макропрофиля дороги, маршрут №5.

Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые маршруты содержат признаки двух типов макропрофиля - ровная дорога (маршруты 1, 4) и холмистая дорога (маршруты 2, 3, 5).

В настоящее время исследователи располагают методами и аппаратной базой, позволяющими непосредственно получать характеристики работы двигателя, коробки передач (КП), скорости движения и другие параметры при движении автомобиля в течение длительного времени в реальных условиях эксплуатации. Использование сигналов шины CAN с дополнительным оборудованием ЕСМ позволяет получать в реальном времени массивы основных параметров, характеризующих режимы движения, рассчитываемые с помощью методи-

ки [3], тем самым исключить часть расчетов и получить достоверные данные о скоростях и передачах, на которых происходит движение автомобиля.

Относительным пробегом считаем отношение протяженности части маршрута, пройденной автомобилем на данной передаче, к общей протяженности выбранного маршрута. Номер передачи, на которой двигался автомобиль, определялся по соотношению частоты вращения коленчатого вала двигателя и скорости движения путем сравнения полученных значений с известными передаточными числами КП. В процессе обработки результатов испытаний показания приборов, не несущие полезной информации (остановка или стоянка автомобиля, отсутствие кинематической связи между валами двигателя и КП), не учитывались. В результате обработки экспериментальных данных были получены данные о распределении относительных пробегов автомобиля на различных скоростях и различных передачах в коробке передач. На рисунке 5 представлен пример относительного распределения пробега автомобиля по маршруту № 2 на различных передачах.

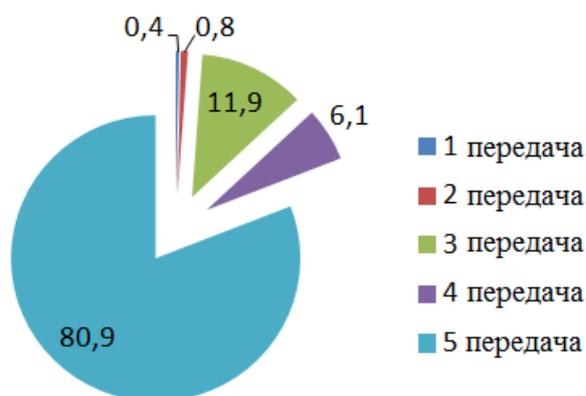


Рис. 5. Распределение пробега автомобиля в % на различных передачах в КП (маршрут № 2).

До настоящего времени в некоторых работах, посвященных исследованию нагрузочных режимов автомобиля, считается, что относительные пробеги на передачах могут быть вычислены в соответствии с характером изменения скорости автомобиля, приблизительно описываемым нормальным законом распределения [6]. Необходимо отметить, что характер распределения относительных пробегов на различных скоростях, выявленный при испытаниях, не соответствует теоретическим представлениям о нормальном законе распределения скоростей движения [6].

Основное отличие полученных экспериментальных данных от известной методики расчета относительных пробегов состоит в увеличении доли пробега на пятой передаче и снижении доли пробега на третьей и четвертой передачах. Логическое объяснение этого факта может быть связано с увеличением скорости движения автомобилей вне города вследствие увеличения удельной мощности двигателя. Результаты эксперимента, касающиеся характера распределения скоростей движения, подтверждаются близкой по тематике поставленных задач работой, выполненной в МГТУ им. Н.Э. Баумана [1].

Результатами статистической обработки экспериментов при движении по заданным маршрутам являются массивы распределения относительных пробегов на различных передачах и скоростях. На рисунке 6

представлена графическая интерпретация распределения относительных пробегов на различных передачах и скоростях в виде гистограммы (маршрут № 2).

В результате обработки материалов экспериментальных исследований были установлены величины относительных пробегов автомобиля и распределение скоростей движения на каждой из передач для заданных маршрутов движения. Необходимо признать, что выполненные экспериментальные исследования достаточно сложны и трудоемки. При их проведении требуется синхронизировать регистрацию параметров нескольких существенно отличающихся в физических проявлениях процессов. Одновременно необходимо регистрировать параметры работы двигателя, коробки переключения передач, скорость движения и географические координаты местоположения автомобиля.

Относительный пробег автомобиля

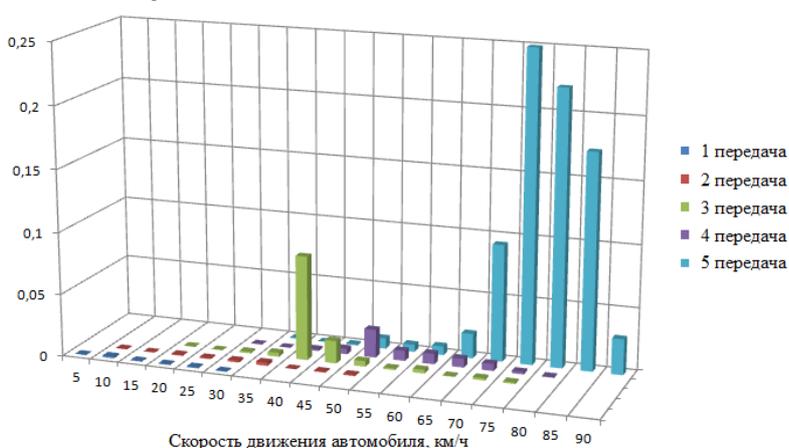


Рис. 6. Графическая интерпретация распределения относительных пробегов, маршрут № 2.

Полученные результаты использованы для расчета расхода топлива на заданном маршруте. При расчете расхода топлива на маршруте вводится допущение о постоянстве скорости движения в пределах выделенных интервалов (шагов) диапазона её изменения. В первом приближении принят шаг, по скорости равный 5 км/ч.

Построение топливно-экономических характеристик выполняется с использованием программного комплекса компании Gamma Technologies Inc (GTI) – GT-SUITE с пакетом приложений, являющимся мощным инструментом, позволяющим решать широкий спектр задач моделирования режимов работы двигателей с анализом их производительности, динамики автомобиля и др. Пример использования данного программного продукта показан в [7] и [8].

Расчет расхода топлива выполнен средствами Microsoft Office Excel. Для упрощения задания исходных параметров массивы данных топливно-экономических характеристик обрабатываются методом наименьших средних квадратов и аппроксимируются параболическими зависимостями. Графическая интерпретация аппроксимации массивов данных топливно-экономических характеристик установившегося движения приведена на рисунке 7. Процедура расчета расхода топлива при движении по заданному маршруту начинается с расчета значений путевого расхода топлива для граничных значений скоростей выделенных интервалов в пределах выявленных в процессе испытаний диапазонов её изменения. Затем рас-

считывается суммарный относительный расход топлива при движении на каждой из передач в расчете на 1 км пути в соответствии с выражением:

$$Q_{отн} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n S_i \cdot Q_{Si},$$

где: S_i – значение относительного пробега на выбранной передаче при заданной скорости, Q_{Si} – значение путевого расхода топлива при движении на выбранной передаче с заданной скоростью.

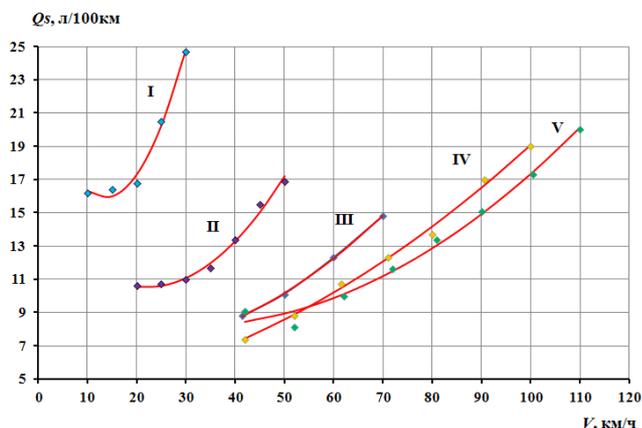


Рис. 7. Топливно-экономическая характеристика установившегося движения (асфальто-бетонное покрытие).

Расход топлива, полученные в результате моделирования движения автомобиля и при выполнении испытательных пробегов.

Расход топлива при движении по заданному маршруту рассчитывается в соответствии с выражением: $Q = S \cdot Q_{отн}$, где: S – длина маршрута, $Q_{отн}$ – суммарный относительный расход топлива в расчете на 1 км пути.

Расчет расхода топлива выполнен для маршрутов с характерными особенностями рельефа местности № 1 (ровный) и № 2 (холмистый).

В таблице 2 приведены значения расходов

Таблица 2

Расход топлива при виртуальном и реальном движении автомобиля

№ маршрута	Расход топлива, л		Относительная погрешность
	моделирование	эксперимент	
1	3,42	3,47	1,57%
2	7,07	7,32	3,47%

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования расчетно-экспериментальной методики оценки расхода топлива автомобиля при движении по заданному маршруту на стадии проектных и доводочных работ и могут служить основой для разработки усовершенствованной теоретической методики расчета расхода топлива в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Список литературы

1. Бутарович Д.О. Распределение относительных пробегов лёгких коммерческих автомобилей по результатам дорожных испытаний / Д.О. Бутарович, А.А. Смирнов // Журнал Автомобильных инженеров. – 2013. - № 6 (83).
2. Вахидов У.Ш. Математическое описание дорог типа «stone-road» / Вахидов У.Ш., Макаров В.С., Беляков В.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. - URL: www.science-education.ru/103-6376.
3. Кравец В.Н. Теория автомобиля : учеб. пособие / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Н. Новгород, 2013. – 413 с.
4. Макаров В.С. Математическая модель поверхности дорожно-грунтовых оснований, насыщенных характерными повторяющимися дискретными препятствиями / Макаров В.С. [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. - URL: www.science-education.ru/111-10472.
5. Огороднов С.М. Обоснование методов решения задачи оценки усталостной долговечности деталей и узлов подвески автомобилей / Огороднов С.М. [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. - URL: www.science-education.ru/110-9695.
6. Цитович И.С. Зубчатые колеса автомобилей и тракторов: проектирование и расчет / И.С. Цитович, В.А. Вавуло, Б.Н. Хваль. – Минск : Изд-во Мин-ва высш., средн. и проф. образования БССР, 1962. – 396 с.
7. Gaines L. Estimation of Fuel Use by Idling Commercial Trucks / Gaines L., Vyas A., Anderson J.L. // Submitted for presentation at and inclusion in the compact disc of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C. January 22–26, 2006.
8. Stamatelos A.M. Simulation and experimental validation of steady state operation of a turbocharged, common rail HDI Diesel engine running on biodiesel blends / Stamatelos A.M., Stapountzis H., Papadimitriou C. // Tesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science of the Department of Mechanical Engineering University of Thessaly. Volos, February, 2010.
9. Zezyulin D. Modeling Of Roads Impacts For Life Prediction Of Light Commercial Vehicles Parts / Zezyulin D., Makarov V., Belyaev A., S. Ogorodnov, V. Belyakov // FISITA 2014 World Automotive Congress, the Netherlands, Maastricht, 2-6 June - F2014-LWS-040. - URL: <http://www.fisita2014.com/test/programme/sessions/F2014-LWS-040>.
10. Zezyulin D. Methodology of Roadway Impacts Modeling to Predict the Fatigue Life of Vehicles / Zezyulin D., Makarov V., Ogorodnov S., Belyakov V. // Acta Technica Jaurinensis. – 2014. - Vol. 7, No. 3, pp. 267-279, DOI: 10.14513/actatechjaur.v7.n3.277.

Рецензенты:

Молев Ю.И., д.т.н., профессор кафедры «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

Беляков В.В., д.т.н., профессор кафедры «Автомобили и тракторы», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.