

Горбик Ю.В.

Харьковский национальный автомо-  
бильно-дорожный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ  
АВТОМОБИЛЯ НА ТОПЛИВНУЮ  
ЭКОНОМИЧНОСТЬ НА ДОРОГЕ И НА СТЕНДЕ С  
БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ

УДК 629.113.004

Проанализированы вопросы моделирования условий функционирования транспортных машин при стендовых испытаниях. Предлагается методика и алгоритм проверки показателей топливной экономичности на стендах с беговыми барабанами.

**Ключевые слова:** функционирования транспортных машин, топливная энергетичность, методика, алгоритм проверки, стенд с беговыми барабанами.

**Введение.** Диагностирование систем автомобиля по технико-экономическим показателям – неотъемлемая составляющая эффективного его использования. Без регулярного выполнения диагностирования нельзя обеспечить продолжительность и качество работы ТМ.

С использованием моделирования можно решить следующие задачи диагностики:

- оценить качество функционирования ТМ;
- выдать рекомендации по видам и объёмам профилактического обслуживания и ремонта для данной ТМ;
- разработать рациональные варианты применения диагностических приборов и оборудования для различных узлов и систем ТМ, при моделировании их функционирования.

В науке известны такие виды моделирования, как физическое, математическое, имитационное и модульное. Физическое моделирование базируется на теории подобия и размерностей. В основе этой теории лежит утверждение о том, что если все соответствующие безразмерные характеристики (критерии) подобия для двух явлений одинаковы, то они физически подобны. Такие модели представляют одну из подгрупп моделей, у которых физическая природа изучаемых явлений сохраняется полностью или частично, как и в натурном образце. Применительно к ТМ может осуществляться физическое моделирование при определении (нормировании) расхода топлива, токсичности ОГ, КПД автомобиля, коэффициента сопротивления качению и сцепления с дорогой, эффективности тормозных систем, плавности хода и др.

Расход топлива – важнейший измеритель экономичности автомобиля. Для каждой модели автомобиля установлена государственная норма. Расход топлива тем меньше, чем совершеннее двигатель и трансмиссия и чем меньше внешние сопротивления

Математическая модель расхода топлива должна быть простой и не требовать знания особых параметров исследуемого автомобиля и специальных характеристик двигателя. Одновременно эта модель должна достаточно точно описывать процесс потребления топлива автомобилем и соответствовать современному уровню знаний по данной проблеме. Результаты расчётов расхода топлива с использованием данной математической модели должны с достаточной степенью точности совпадать с результатами дорожных и стендовых испытаний автомобиля на различных режимах движения.

**Анализ публикаций.** Основные принципы оценки топливной экономичности и нормирования расхода топлива заложены в работе [1], где с позиции системотехники и энергетического подхода рассмотрены конструктивные и эксплуатационные параметры эффективности работы транспортных средств

В работе [2] приведена методика оценки технического состояния автомобиля по изменению КПД автомобиля в целом и КПД составляющих агрегатов (двигателя, трансмиссии, подвески и колес). Приведены зависимости расчета КПД автомобиля и агрегатов на дороге и при стендовых испытаниях на беговых барабанах.

В работе [3] приведена новая методика расчета расхода топлива, основанная на определении 4-х коэффициентов полезного действия: индикаторного и механического КПД двигателя, КПД трансмиссии и колесного механизма (колеса и подвески).

В работе [4] предлагается использовать новый метод расчета расхода топлива в процессе диагностирования на стенде с беговыми барабанами, а в работе [5] приведен метод диагностирования по индикаторному расходу топлива в отдельных агрегатах автомобиля.

**Цель и постановка задачи.** Целью работы является дальнейшее совершенствование методики и разработка алгоритма диагностирования технического состояния автомобиля по изменению расхода топлива и КПД автомобиля.

**Материалы и результаты исследования.** Разработанные теоретические модели проверялись на автомобиле ГАЗ-33021 «Газель». Для этого была написана программа расчета расхода топлива и токсичности для данной марки автомобиля в среде Mathcad.

В общем виде расход топлива определяется по формуле

$$Q = K \cdot P_i / \eta_i \text{ л/100 км,} \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий основные параметры двигателя автомобиля и качество топлива.

Этот коэффициент определяется по формуле

$$K = 7,95 \cdot V_h \cdot i_0 \cdot i_k / H_u \cdot \rho_m \cdot r_k \text{ л м/Н,} \quad (2)$$

где  $V_h$  – рабочий объем цилиндров двигателя, л;

$i_0, i_k$  – соответственно передаточное число главной передачи и коробки передач;

$H_u$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$\rho_m$  – плотность топлива, кг/см<sup>3</sup>;

$r_k$  – радиус качения колеса, м.

Переменной величиной в рассматриваемом выражении является среднее передаточное число коробки передач, которое определяется по формуле

$$i_k = K_c \cdot i_{кп} \cdot V_{\max} / V_a, \quad (3)$$

где  $K_c$  – скоростной коэффициент,  $i_{кп}$  – повышенное передаточное число коробки передач,

$V_{\max}$  – максимальная (допускаемая) скорость движения автомобиля, км/ч;

$V_a$  – средняя техническая скорость движения автомобиля, км/ч.

Для автомобиля ГАЗ - 33021 (при  $V_{\max} = 100$  км/ч)

$$i_k = 0,53 \cdot 0,849 \cdot 100 / V_a \approx 45 / V_a.$$

С ухудшением дорожных условий коэффициент  $K$  будет возрастать. Например, на дороге 4 гр.

$$K = \frac{7,95 \cdot 2,445 \cdot 5,125 \cdot 1,667}{44000 \cdot 0,74 \cdot 0,31} = 0,0165,$$

а на дороге 5 гр. при  $V_a = 26$  км/ч  $K$  увеличивается до 0,0205.

Следующей переменной величиной является среднее индикаторное давление  $P_i$  кПа, которое складывается из среднего давления механических потерь на трение в двигателе  $P_n$  и среднего эффективного давления  $P_e$ .

В теории двигателей рекомендуется механические потери определять по формуле [6]

$$P_n = (a_n + b_n \omega_a), \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные для данного автомобиля коэффициенты,  
 $\omega_a$  – средняя скорость поршня в м/с.

Если известен ход поршня  $S_n$  и частота вращения коленвала  $n$ , тогда

$$P_n = (a_n + b_n \cdot 2S_n \cdot n / 60) = (a_n + 0,033 \cdot b_n \cdot S_n \cdot n) \text{ кПа.}$$

Для грузовых автомобилей средней грузоподъемности можно принять  $a_n = 50$  кПа, а  $b_n = 2,1$  кПа с м<sup>-1</sup>.

Из приведенной формулы для определения (1) можно получить более общее выражение, введя в зависимость другие частные значения КПД. Так как

$$\eta_e = \eta_i \cdot P_e / P_i, \quad (5)$$

то

$$\eta_i = \eta_e \cdot P_i / P_e.$$

Подставив это значение в последнюю формулу получим

$$Q = K \cdot P_e / \eta_i \cdot \eta_m \text{ л/100 км.} \quad (6)$$

Средне эффективное давление

$$P_e = 12,56 \frac{r_k}{V_h \cdot i_0 \cdot i_k \cdot \eta_m} \cdot P_k = K_i \cdot P_k / \eta_{mp}. \quad (7)$$

Введя значение  $P_e$  в предыдущую формулу, получим

$$Q = K \cdot K_i \cdot \frac{P_k}{\eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_n} \text{ л/100 км.}$$

Так как  $\eta_k = P_\delta / P_k$ , то  $P_k = P_\delta / \eta_k$ . После его подстановки в последнюю формулу получим новое выражение для определения расхода топлива:

$$Q = K \cdot K_i \cdot \frac{P_\delta}{\eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_n \cdot \eta_k} \text{ л/100 км.} \quad (8)$$

Произведение  $K \cdot K_i$  равно:  $\frac{7,95 \cdot V_h \cdot i_0 \cdot i_k}{H_u \cdot \rho_m \cdot r_k} \cdot 12,56 \frac{r_k}{V_h \cdot i_0 \cdot i_k \cdot \eta_m} \approx 100 / H_u \cdot \rho_m$ .

В окончательном виде упрощенная формула для расчета расхода топлива запишется так:

$$Q = \frac{100 \cdot P_\delta}{H_u \cdot \rho_m \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_n \cdot \eta_k} \quad (9)$$

или

$$Q = \frac{100 \cdot P_\delta}{H_u \cdot \rho_m \cdot \eta_a} \text{ л/100 км,} \quad (10)$$

где  $\eta_a$  – общий КПД автомобиля.

Последняя формула представлена в более простом виде и поэтому она может быть использована для диагностирования автомобилей. В технически исправных автомобилях общий КПД для бензиновых автомобилей изменяется в пределах 0,06...0,07, для дизельных – 0,010...0,012.

**Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів**  
 Technical service of agriculture, forestry and transport systems

Усилие, подведенное к дороге  $P_d$  можно имитировать, меняя нагрузку на барабанах ( $P_m$ ). Величина  $H_u \cdot \rho_m$  постоянная для данного вида топлива. Например, для бензина среднего качества  $44000 \cdot 0,74 = 32560$  кДж/л. Для дизельного топлива  $43500 \cdot 0,84 = 36540$  кДж/л. Если, например, для порожнего автомобиля ГАЗ-33021 эксплуатационная норма расхода топлива  $Q \approx 15,8$  л/100 км, а общий КПД  $\eta_a \approx 0,064$ , тогда усилие  $P_d$  на барабанах должно быть  $15,8 \cdot 32560 \cdot 0,064 / 100 = 329,24$  Н. Крутящий момент на барабанах  $M_b$  должен быть равен  $P_d \cdot r_b$  Нм.

Усилие, подведенное к дороге определяется по формуле

$$P_d = (G_a \cdot i + 0,077kF \cdot V_a^2 + 0,1 \cdot \delta \cdot G_a \cdot \dot{V}) = \text{Н} \quad (11)$$

$$= M_a (g \cdot i + 0,077kF \cdot V_a^2 / M_a + \delta \cdot \dot{V})$$

где  $i$  – предельный уклон дороги, %;

$\delta \cdot \dot{V}$  – усилие в Н, затрачиваемое на разгон автомобиля.

В теории автомобилей введен новый термин “шум ускорения” в  $\text{м/с}^2$ , который наиболее полно оценивает качество дорожного движения и определяется по формуле

$$K_d = (g \cdot i + 0,077kF \cdot V_a^2 / M_a + \delta \cdot \dot{V}) \text{ м/с}^2, \quad (12)$$

где  $M_a$  – масса автомобиля, кг;

$\delta$  – динамический коэффициент учета вращающихся масс.

Для автомобиля ГАЗ-33021

$$K_d = (9,81 \cdot 0,32 / V_a + 3,64 \cdot 10^{-5} \cdot V_a^2 + \delta \cdot \dot{V}) \text{ м/с}^2.$$

На дорогах 1-5 гр.  $K_d$  изменяется в пределах 0,13...0,20. При стендовых испытаниях второе и третье слагаемое принимаем равными нулю. Тогда силу  $P_d \approx 3,14 \cdot M_a / V_a$  Н.

При моделировании средних условий эксплуатации (35...40 км/ч) можно определить общий КПД автомобиля по формуле

$$\eta_a = \frac{100 \cdot P_d}{H_u \cdot \rho_m \cdot Q}, \quad (13)$$

где  $P_b$  – приведенное усилие на барабанах с учетом массы на заднем мосте,

$Q$  – замеряемый на стенде расход топлива в л/100 км, или  $Q_1$  в кг/ч по формуле

$$Q_1 = 0,1 \cdot Q \cdot V_a \cdot \rho_T.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 1-3. где расход топлива на стенде определялся при постоянном тормозном усилии. Данные графики позволяют подбирать тормозное усилие, при котором расходы топлива на стенде и на дороге одинаковы.

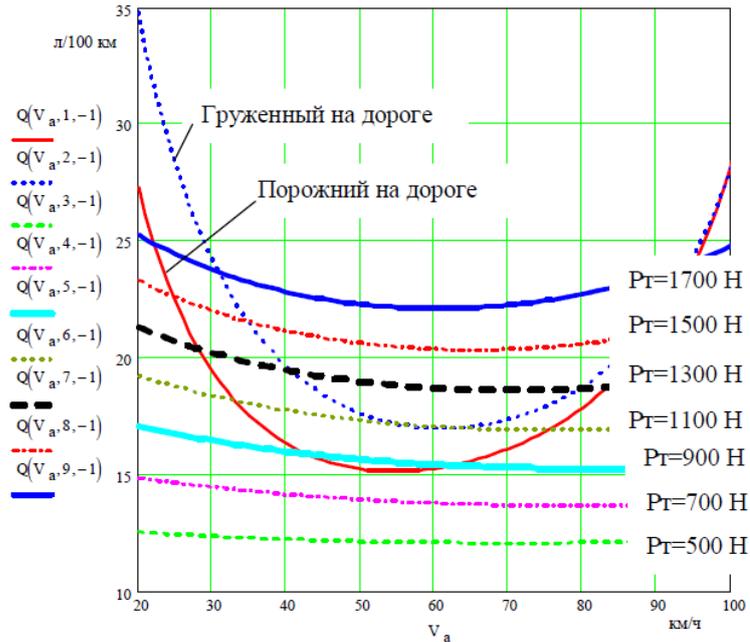


Рис. 1. Расход топлива автомобиля ГАЗ-33021 при движении по дороге полной и снаряженной массе, а также «движении» на имитационном стенде при заданной постоянной нагрузке.

На рис. 2-3 приведены графические зависимости расхода топлива, основной и дополнительной норм расхода топлива (соответственно) для дорожных и стендовых испытаний.

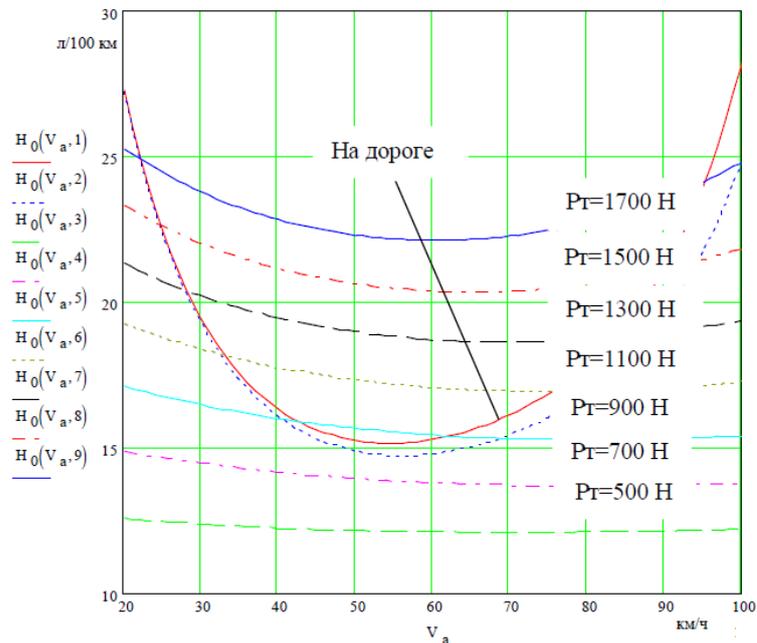


Рис. 2. Основная норма расхода топлива автомобиля ГАЗ-33021 при движении на дороге и на имитационном стенде при различной нагрузке.

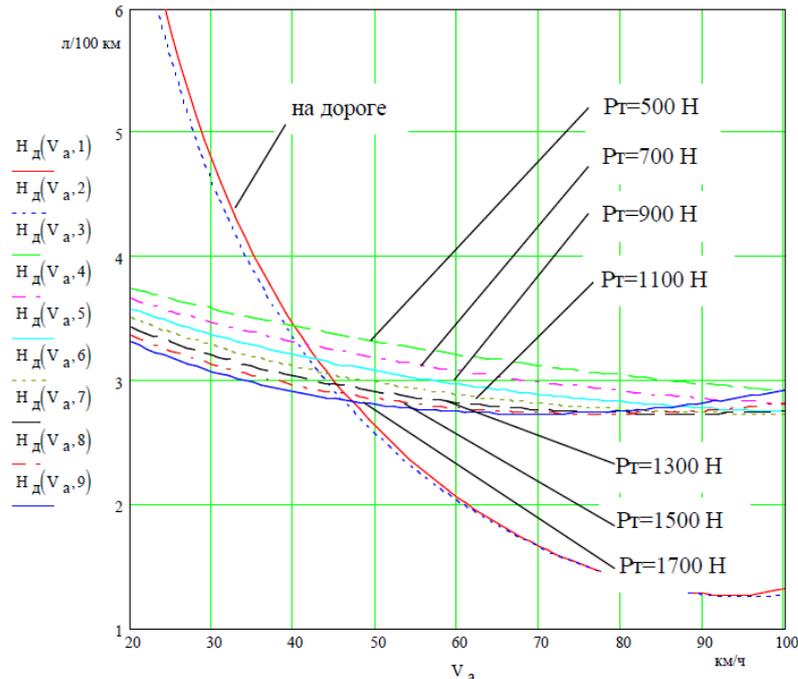


Рис. 3. Дополнительная норма расхода топлива автомобиля ГАЗ-33021 при движении по дороге и на имитационном стенде при различной нагрузке.

Результаты моделирования расхода топлива с использованием данной математической модели, в зависимости от тормозного момента стенда, с определённой степенью точности совпадают с результатами дорожных и стендовых испытаний автомобиля на различных режимах движения.

Предлагаемая методика позволяет предложить упрощенный алгоритм общего диагностирования ТМ.

Упрощенный алгоритм диагностирования можно представить так:

1. Если по результатам диагностирования получаем  $\eta_a \approx 0,062 \dots 0,064$  – автомобиль исправен. При этом принимаем, что эффективный КПД исправного двигателя равен примерно  $0,28 \cdot 0,66 \approx 0,18$ , КПД трансмиссии и шин –  $0,77 \cdot 0,46 \approx 0,35$ , а общий  $\eta_a = 0,18 \cdot 0,35 \approx 0,063$ .

2. Если,  $\eta_a$  меньше 0,062 – ищем неисправность.

3. Путем замера или визуально определяем, что давление воздуха в шинах нормальное и шум в редукторе заднего моста отсутствует. Предполагаем неисправность в двигателе (в системе питания или зажигания). Наибольшая вероятность снижения  $\eta_i$ . Этот КПД можно проверить по составу отработавших газов ( $\eta_i \approx 0,32 \cdot \alpha$ , а % CO есть функция  $\alpha$ ). Если замер CO показал, что его содержание достигает 6%, то это может быть при  $\alpha \approx 0,6$ . При таком значении  $\alpha$   $\eta_i$  снижается до 0,20 (вместо  $\sim 0,28$ ). Резкое снижение  $\eta_i$  свидетельствует о неисправности топливной системы или зажигания.

**Выводы.** Рациональное использование топлива на автомобильном транспорте может быть обеспечено за счет учета влияния различных факторов при расчетах и совершенствования методов диагностирования показателей их топливной экономичности на стендах с беговыми барабанами. Для обеспечения соответствия режимов испытаний ТМ реальным необходимо, с использованием полученных результатов коэффициента сопротивления качению колеса, подбирать нагрузочные режимы стендового диагностирования так, чтобы условия её работы максимально соответствовали дорожным условиям.

### **Литература**

1. Говорущенко Н.Я. Системотехника транспорта. / Н.Я. Говорущенко, А.Н. Туренко. - Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Харьков: РИО ХГАДТУ, 1999. – 468 с.
2. Кривошапов С.І. Розробка методики та алгоритму загального діагностування автомобілів за зміною коефіцієнта корисної дії. / Автореф. канд. техн. наук: 05.22.10. – Харків, ХДАДТУ, 1999. – 20 с.
3. Говорущенко Н.Я. Новая методика нормирования расхода топлива транспортных машин (метод четырех КПД) / Н.Я. Говорущенко, С.И. Кривошапов. // Автомобильный транспорт : Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ, 2004. - № 15.
4. Говорущенко Н.Я. Методы системного расчетно-аналитического и стендового диагностирования легковых автомобилей / Н.Я. Говорущенко, Ю.В. Горбик // Автомобильный транспорт: Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНАДУ, 2009. - № 25. – С. 58-61.
5. Говорущенко Н.Я. Методы диагностирования автомобилей по изменению общего и индикаторного расхода топлива и частных КПД в отдельных агрегатах. / Н.Я. Говорущенко, Ю.В. Горбик. // XVI научно-техническая конференция с международным участием «Транспорт экология – устойчивое развитие» - Варна: ТУ, 2010 – С. 442-450.
6. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для вузов по специальности “Двигатели внутреннего сгорания” / [Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивнин и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова]. – 4е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983 – 372 с.

**Y. Gorbik. Modeling in the test car on fuel efficiency on the road and on a roller dynamometer**

Analyzed issues of modeling of conditions of transport vehicles at the test bench. The technique and algorithm for checking the fuel economy on a roller dynamometer

**Keywords:** operation of transport vehicles, fuel-energy, methodology, validation algorithm, on rollers.

**References**

1. Govorushchenko NY System engineering of transport. / NY Govorushchenko, AN Turenko. - Ed. 2nd, Revised. and Podolny. - Kharkov: RIO HGADTU, 1999. - 468 p.
2. Krivoshapov S.I. Rozrobka techniques that algorithm zagalnogo diagnostuvannya avtomobiliv for zminoyu koefitsienta korisnoї diї. / Author. cand. tehn. Sciences: 05.22.10. - Kharkiv, HDADTU, 1999. - 20 p.
3. Govorushchenko NY The new technique of rationing of fuel consumption of transport vehicles (four-efficiency method) / NY Govorushchenko, SI Krivoshapov. // Road Transport: Coll. Scien. tr. - Kharkov: HNADU, 2004. - № 15.
4. Govorushchenko NY Methods of computational and analytical system and stand diagnose cars / NY Govorushchenko, Y. Gorbik // Road Transport: Coll. scientific. works. - Kharkov: HNADU, 2009. - № 25. - S. 58-61.
5. Govorushchenko NY Car diagnostics methods to change a general indicator and fuel consumption and efficiency in private individual units. / NY Govorushchenko, Y. Gorbik. // XVI Scientific Conference with international participation "Transport ecology - sustainable development" - Varna: TU 2010 - S. 442-450.
6. Internal combustion engines: theory and combined piston engines: the textbook for higher technical schools in the specialty "Internal Combustion Engines" / [DN Vyrubov, NA Ivashchenko VI Ivnin etc .; ed. AS Orlin, MG Kruglov]. - 4th ed. Revised. and ext. - M. : Mechanical Engineering, 1983 - 372 p.