

УДК 629.113

*В. П. Тарасик, О. В. Пузанова*

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА ЕГО ТОПЛИВНУЮ ЭКОНОМИЧНОСТЬ

UDC 629.113

*V. P. Tarasik, O. V. Puzanova*

## INFLUENCE OF VEHICLE MOTION MODE ON ITS FUEL ECONOMY

### Аннотация

Предложена методика исследования и оценки топливной экономичности автомобиля и КПД его двигателя. Приведены результаты моделирования и анализа на установившихся режимах движения и при разгоне. Показано влияние нагрузки двигателя на путевой расход топлива.

### Ключевые слова:

автомобиль, двигатель, трансмиссия, коробка передач, часовой, удельный и путевой расходы топлива, нагрузка и КПД двигателя.

### Abstract

A technique is proposed for studying and evaluating the fuel economy of a vehicle and the efficiency of its engine. The results of modeling and analyzing at steady-state driving modes and during acceleration are presented. The effect of engine load on the fuel consumption during driving is shown.

### Keywords:

vehicle, engine, transmission, gearbox, hourly and specific fuel consumption, load and engine efficiency.

Топливная экономичность автомобиля зависит от множества факторов – конструктивных и эксплуатационных. Конструктивные факторы обусловлены степенью совершенства рабочих процессов двигателя и трансмиссии, оцениваемой их КПД, совершенством внешней формы автомобиля, формирующей потери на преодоление сопротивления воздуха, рациональностью использования полной массы автомобиля, оцениваемой коэффициентом удельной грузоподъемности, параметрами и физическими свойствами материала шин, оказывающих влияние на сопротивление качению.

Значительное влияние на расход топлива оказывают эксплуатационные факторы: качество и состояние дорож-

ного покрытия, ширина проезжей части и количество полос, погодные условия, время суток, дорожные ограничительные знаки, плотность транспортного потока и его структурный состав, скоростные режимы движения.

Измерителем топливной экономичности автомобиля принят расход топлива в литрах на 100 км пройденного пути – *путевой расход топлива*  $Q_s$ , л/(100 км), а обобщающий показатель – *средний путевой расход топлива*  $Q_{ср}$ , определяемый при нормальном эксплуатационном режиме движения в наиболее типичных для данного автомобиля дорожных условиях.

Ввиду большого разнообразия эксплуатационных условий работы ав-



томобилей определение обобщающих показателей топливной экономичности представляет сложную и трудоёмкую задачу. Поэтому нормативными документами установлены частные оценочные параметры топливной экономичности, определяемые в конкретных дорожных условиях. Методики проведения испытаний по их определению изложены в ГОСТ 20306–90, ГОСТ Р 41.84–99, ГОСТ Р 41.101–99 и др.

Опыт эксплуатации автотранспортных средств показывает, что значительное влияние на расход топлива оказывают режимы движения, т. к. они определяют загрузку двигателя и рациональное использование его потенциальных свойств. Эффективность любого технического объекта, в том числе автомобиля и его двигателя, наиболее полно и однозначно может быть оценена величиной КПД. Поэтому при исследовании топливной экономичности целесообразно осуществлять анализ затраты энергии на выполнение транспортной работы и оценку КПД двигателя.

### Цель исследования

Целью исследования является анализ влияния режима движения автомобиля при выполнении транспортной работы на путевой расход топлива и КПД двигателя.

### Методика исследования

Исследования проведём на двух типовых примерах, используемых в теории движения автомобиля: на топливной характеристике установившегося движения  $Q_s = f(v)$  и характеристиках разгона  $v = f(t)$  и  $s = f(t)$ , получаемых на мерном участке, равном 2000 м по методике, предусмотренной ГОСТ 22576–90.

При построении топливной характеристики и характеристик разгона в качестве исходной информации об автомобиле используются внешние скоростные характеристики (ВСХ) мощности двигателя  $P_e = f(n_d)$  и вращающего момента  $M_e = f(n_d)$  и топливные характеристики часового расхода топлива  $G_e = f(n_d)$  и удельного расхода  $g_e = f(n_d)$  в функции частоты вращения вала двигателя  $n_d$ , об/мин. Характеристики  $G_e$  и  $g_e$  соответствуют работе двигателя на ВСХ.

В качестве объекта исследования примем легковой автомобиль LADA Vesta. Параметры автомобиля: полная масса  $m_a = 1670$  кг; максимальная мощность двигателя  $P_{e\max} = 78$  кВт при частоте вращения  $n_p = 6000$  об/мин; максимальный момент  $M_{e\max} = 148$  Н·м при частоте вращения  $n_M = 4000$  об/мин; удельный расход топлива при максимальной мощности  $g_{eP} = 280$  г/(кВт·ч); передаточное число главной передачи  $u_0 = 4,2$ ; передаточные числа коробки передач  $u_{kpi} = (3,636; 1,950; 1,357; 0,941; 0,784)$ ; время переключения передачи  $t_{\Pi} = 1$  с; радиус качения колеса  $r_k = 0,285$  м; лобовая площадь автомобиля  $A_d = 2,113$  м<sup>2</sup>; коэффициент сопротивления воздуха  $k_w = 0,2$  Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>; коэффициент сопротивления качению при малой скорости  $f_0 = 0,01$ .

На рис. 1, а приведены ВСХ двигателя  $P_e = f(n_d)$ ,  $M_e = f(n_d)$  и характеристика часового расхода топлива  $G_e = f(n_d)$ , а на рис. 1, б – удельного расхода топлива  $g_e = f(n_d)$ . Реальные характеристики двигателя  $M_e = f(n_d)$  и  $g_e = f(n_d)$  отображены кружками.



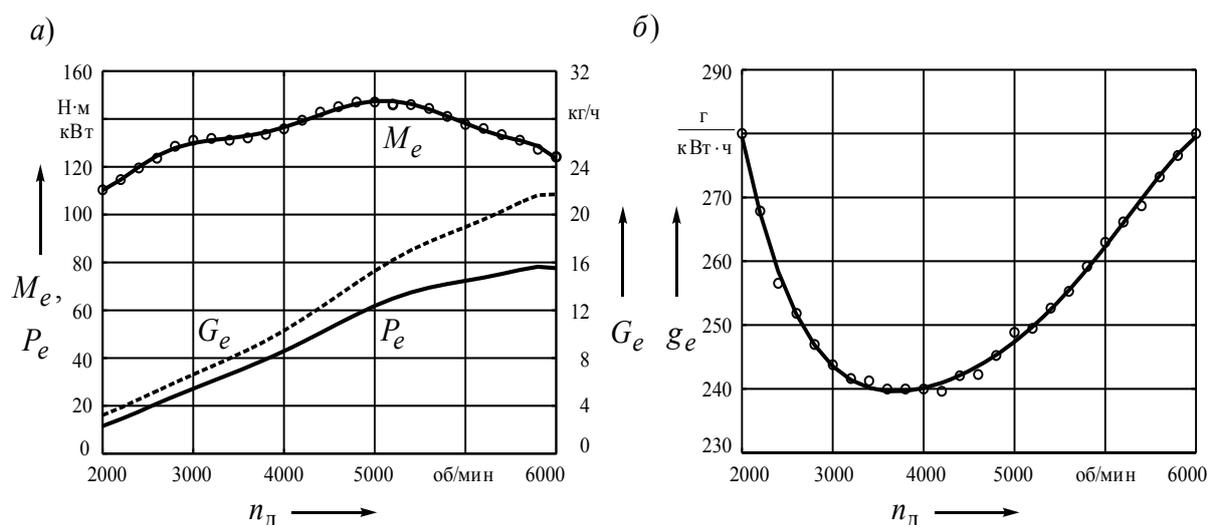


Рис. 1. Внешние скоростные характеристики двигателя (а) и характеристика удельного расхода топлива (б)

При реализации моделирования необходимы непрерывные функции характеристик двигателя, которые получают посредством регрессионного анализа исходных данных. Уравнение регрессии вращающего момента представлено в виде полинома седьмого порядка

$$M_e = M_P k_m (b_0 + b_1 E + b_2 E^2 + b_3 E^3 + b_4 E^4 + b_5 E^5 + b_6 E^6 + b_7 E^7), \quad (1)$$

где  $M_P$  – момент двигателя при максимальной мощности двигателя, Н·м;  $E$  – коэффициент относительной угловой скорости (частоты вращения) вала двигателя;  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_7$  – коэффициенты регрессии:  $b_0 = 2,59959$ ;  $b_1 = -34,7994$ ;  $b_2 = 267,821$ ;  $b_3 = -1014,878$ ;  $b_4 = 2116,415$ ;  $b_5 = -2462,820$ ;  $b_6 = 1496,234$ ;  $b_7 = -369,577$ .

В формулу (1) введен параметр  $k_m$ , предназначенный для изменения уровня номинальной мощности двигателя. Например, для двигателя мощностью 90 кВт  $k_m = 1$ , а при мощности 78 кВт  $k_m = 0,86667$ .

Характеристика удельного расхода топлива аппроксимирована полиномом пятого порядка

$$g_e = g_{eP} (b_{e0} + b_{e1} E + b_{e2} E^2 + b_{e3} E^3 + b_{e4} E^4 + b_{e5} E^5), \quad (2)$$

где  $b_{e0}, b_{e1}, b_{e2}, \dots, b_{e5}$  – коэффициенты регрессии:  $b_{e0} = 1,4638$ ;  $b_{e1} = -4,5521$ ;  $b_{e2} = 13,5377$ ;  $b_{e3} = -20,4324$ ;  $b_{e4} = 15,8788$ ;  $b_{e5} = -4,8976$ .

Значение  $E$  определяет скоростной режим двигателя и вычисляется из соотношения

$$E = \omega_d / \omega_P = n_d / n_P, \quad (3)$$

где  $\omega_d$  и  $n_d$  – угловая скорость и частота вращения двигателя на данном скоростном режиме соответственно;  $\omega_P, n_P$  – то же при максимальной мощности двигателя.

Проведём вначале оценку топливной экономичности автомобиля при установившихся режимах движения, для этого используем топливную характеристику  $Q_s = f(v)$ .

Путевой расход топлива  $Q_s$ , л/(100 км), определяется по формуле [1]

$$Q_s = \frac{100G_T}{3,6\nu\rho_T \cdot 10^{-3}}, \quad (4)$$

где  $G_T$  – часовой расход топлива двигателем, кг/ч;  $\nu$  – скорость автомобиля, м/с;  $\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup> (бензин 730 кг/м<sup>3</sup>; дизельное топливо 860 кг/м<sup>3</sup>).

Часовой расход топлива  $G_T$  связан с удельным расходом  $g_d$  на любом скоростном и нагрузочном режиме двигателя соотношением

$$G_T = g_d P_{д.н} \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

где  $P_{д.н}$  – мощность нагрузки двигателя, Вт.

В общем случае

$$P_{д.н} = |P_{в.о} + P_{тр} + P_{\psi} + P_w + P_j|, \quad (6)$$

где  $P_{в.о}$  – величина отбора мощности на привод вспомогательного оборудования двигателя;  $P_{тр}$  – мощность потеря в трансмиссии;  $P_{\psi}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление дорожных сопротивлений (сопротивление качению и уклон дороги);  $P_w$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха;  $P_j$  – мощность сопротивления разгону (при равномерном движении с постоянной скоростью  $P_j = 0$ ).

Составляющие выражения (6) находятся по известным формулам [1].

Значения  $G_T$  и  $g_d$  зависят от скоростного и нагрузочного режимов двигателя и вычисляются по формулам:

$$g_d = g_e k_{И} k_E; \quad (7)$$

$$G_T = G_e k_{И} k_E, \quad (8)$$

где  $g_e$  и  $G_e$  – удельный и часовой расходы топлива при работе двигателя с полной нагрузкой на внешней скоростной характеристике (ВСХ);  $k_{И}$  и  $k_E$  – коэффициенты влияния уровня нагрузки и скоростного режима двигателя на удельный и часовой расходы топлива двигателя соответственно.

Коэффициенты  $k_{И}$  и  $k_E$  определяются по эмпирическим формулам [2, 3]:

$$k_{И} = a_0 + a_1 И + a_2 И^2; \quad (9)$$

$$k_E = b_0 + b_1 E + b_2 E^2 + b_3 E^3, \quad (10)$$

где  $И$  – коэффициент использования мощности двигателя;  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, b_3$  – эмпирические коэффициенты.

Коэффициент  $И$  характеризует уровень нагрузки двигателя и равен отношению мощности нагрузки  $P_{д.н}$  к мощности двигателя  $P_e$  при работе его на ВСХ на данной частоте вращения вала двигателя  $n_{дi}$ :

$$И = P_{д.н} / P_e. \quad (11)$$

Значения коэффициентов  $a_0, a_1, a_2$  для соответствующих двигателей приведены в табл. 1.

Коэффициенты формулы (10):  $b_0 = 1,25$ ;  $b_1 = -0,99$ ;  $b_2 = 0,98$ ;  $b_3 = -0,24$ .

Предлагаемые формулы (4)–(11) позволяют построить топливную характеристику установившегося движения автомобиля  $Q_s = f(\nu)$ , определить значения путевого расхода топлива на всех передачах и оценить эффектив-



ность его использования посредством КПД двигателя.

Значение КПД двигателя на установившемся режиме при заданной постоянной скорости движения  $v_j = \text{const}$  равно отношению мощности нагрузки двигате-

ля  $P_{д.нi}$  к мощности потока тепловой энергии сжигаемого топлива  $P_{Ti}$ :

$$\eta_{д.уi} = P_{д.нi} / P_{Ti} \quad (12)$$

Табл. 1. Эмпирические коэффициенты формулы (9)

Двигатель	$a_0$	$a_1$	$a_2$
ЗИЛ-431410	0,174	0,429	0,397
ЯМЗ-236 (238)	0,188	0,640	0,172
КАМАЗ-740	0,234	0,461	0,305
Современный дизельный	0,200	0,440	0,360

Значение  $P_{Ti}$  зависит от расхода топлива  $Q_{Si}$ , л/с, на данном режиме и находится по формуле

$$P_{Ti} = Q_{Si} \rho_T C_T, \quad (13)$$

где  $C_T$  – теплотворная способность топлива (для бензина  $C_T = 45,5$  МДж/кг, для дизельного топлива  $C_T = 43,5$  МДж/кг).

Нагрузка двигателя  $P_{д.н}$  находится по формуле (6). При неустановившемся движении в этой формуле необходимо учитывать инерционную мощность  $P_j$ . Если разгон осуществляется с максимальной интенсивностью, как это предусмотрено ГОСТ 22576–90 при испытаниях по определению показателей тягово-скоростных свойств автомобиля,

двигатель работает с полной нагрузкой, поэтому  $P_{д.н} = P_e$ , а значение расхода топлива переменное. Поэтому КПД двигателя определяется за конечный интервал времени разгона  $t_k$ , учитывая при этом затрату топлива  $Q_{S,к}$ , использованную его тепловую энергию  $W_{Т.к}$  и выработанную двигателем механическую энергию  $W_{M,к}$ , а КПД вычисляется из соотношения

$$\eta_{д.к} = W_{M,к} / W_{Т.к} \quad (14)$$

Для определения параметров движения при разгоне автомобиля, расхода топлива и выработанной двигателем механической энергии используем систему дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{M_e u_{тр} \eta_{тр} / r_k - m_a g f_v - k_w A_d v^2}{\delta_{п.м} m_a}; \\ \frac{ds}{dt} &= v; \\ \frac{dQ_s}{dt} &= \frac{g_e M_e v u_{тр}}{3,6 \rho_T r_k \cdot 10^6}; \\ \frac{dW_M}{dt} &= P_e, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$



где  $v$  – скорость автомобиля, м/с;  $f_v$  – коэффициент сопротивления качению, зависящий от скорости [1];  $s$  – перемещение автомобиля, м;  $P_e = f(n_d)$  – функция мощности двигателя при работе его по ВСХ, кВт.

### Результаты исследования

Используя предлагаемые формулы (4)–(11), построим топливную характеристику установившихся режимов движения автомобиля  $Q_s = f(v)$  на всех передачах во всём диапазоне ско-

ростей, а также графики, отображающие нагрузку двигателя, позволяющие оценить её влияние на расход топлива и эффективность его использования.

На рис. 2 показаны характеристики мощности нагрузки двигателя  $P_{д.н}$  и её составляющих  $P_\psi$ ,  $P_w$ ,  $P_{тр}$ , а также мощности двигателя  $P_e$  на 3-й передаче (а) и на 5-й (б) в зависимости от скорости автомобиля  $v$ . Чем выше номер передачи, тем в одних и тех же условиях больше нагрузка двигателя.

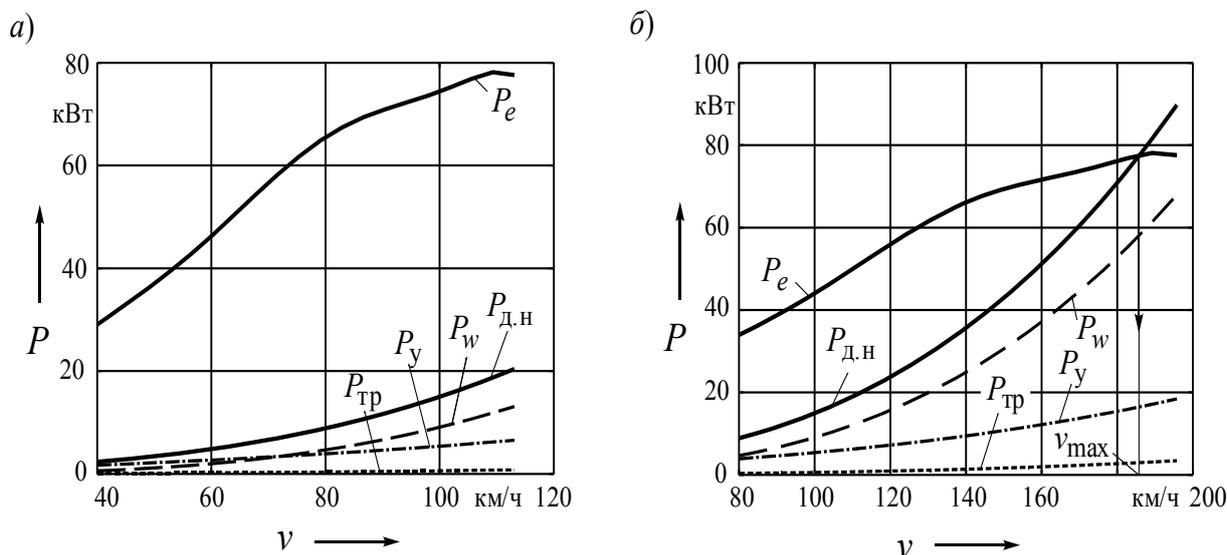


Рис. 2. Графики баланса мощности нагрузки двигателя на передачах

На рис. 3 изображены графики коэффициентов использования мощности  $\eta$  (а) и влияния уровня нагрузки  $k_{II}$  (б) на различных передачах и скоростях движения. Как следует из этих графиков, чем выше номер передачи и больше скорость автомобиля, тем полнее используется энергия двигателя.

Топливная характеристика автомобиля представлена на рис. 4. Очевидно, что с целью экономии топлива необходимо использовать в каждом конкретном случае возможную высшую передачу, т. к. при этом увеличивается

загрузка двигателя и наиболее рационально используется характеристика удельного расхода топлива.

На рис. 5, а показаны характеристики текущего расхода топлива  $Q_s$  на различных передачах в зависимости от скорости автомобиля, а на рис. 5, б – соответствующие им характеристики КПД  $\eta_{д.у}$ . Эти графики также подтверждают возможность обеспечения экономного расхода топлива посредством рационального использования передач.



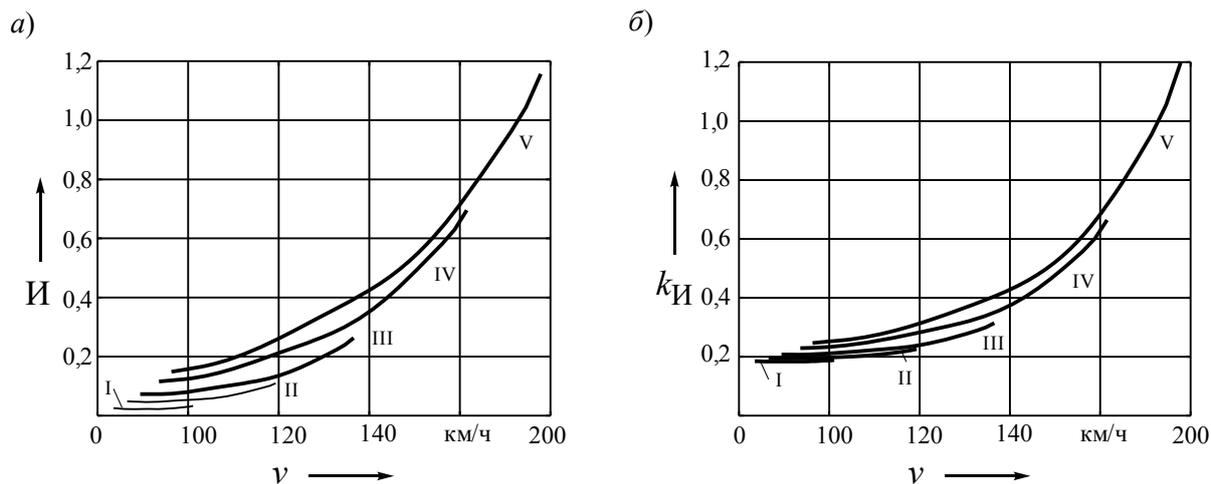


Рис. 3. Графики коэффициентов  $I$  и  $k_I$

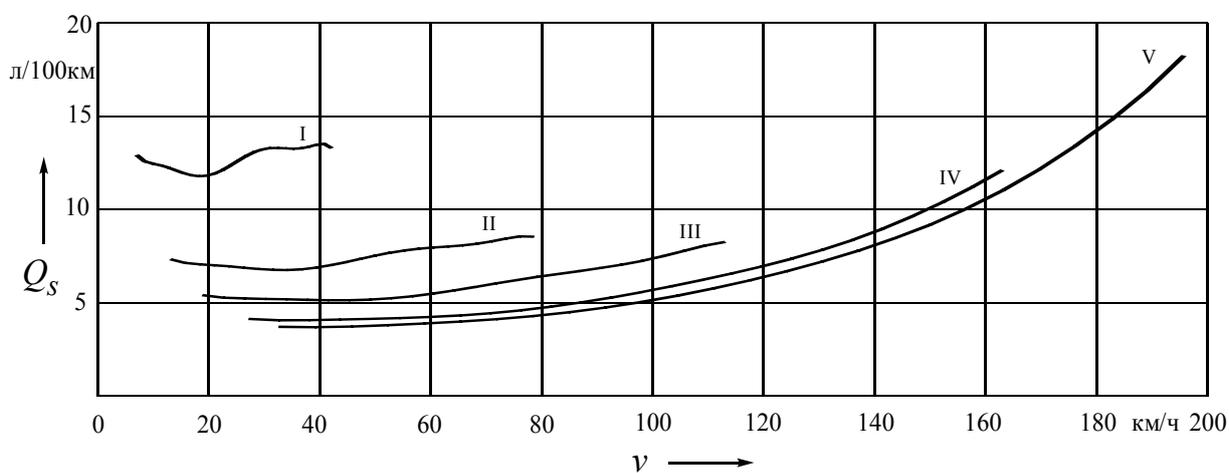


Рис. 4. Топливная характеристика установившегося движения автомобиля

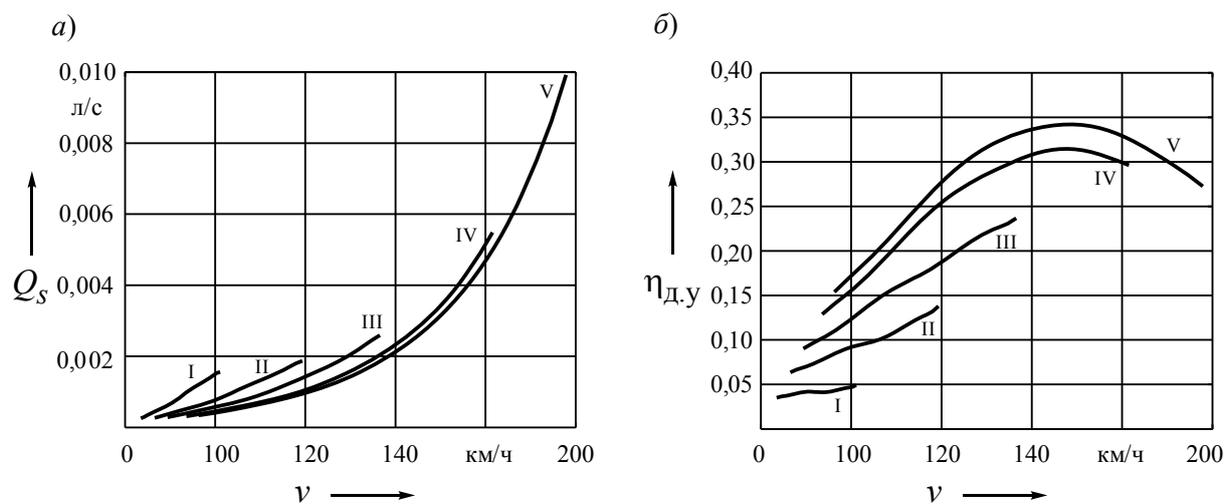


Рис. 5. Зависимости текущего расхода топлива (а) и КПД двигателя (б) от скорости на различных передачах



Рассмотрим характеристики, полученные на режиме разгона автомобиля на основе решения системы уравнений (15). На рис. 6, *a* изображены графики изменения скорости, а на рис. 6, *б* – перемещения автомобиля при последовательном переключении передач во время разгона. Энергия двигателя в этом случае используется полностью, поскольку он работает на ВСХ.

На рис. 7, *a* представлен график изменения во времени расхода топлива  $Q_s$ , а на рис. 7, *б* – реализации механической энергии двигателя  $W_M$ . Горизонтальные ступеньки на этих графиках соответствуют времени переключения передач  $t_{\Pi} = 1$  с, в течение которого расход топлива и энергия двигателя не учитывались.

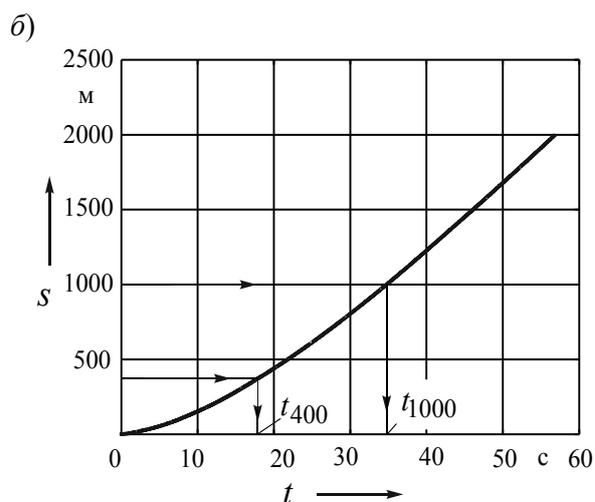
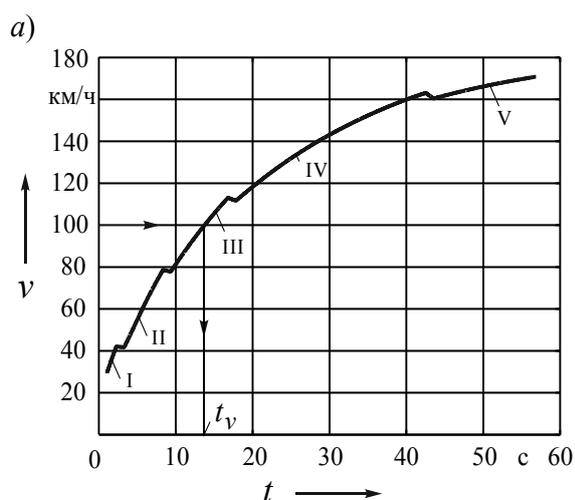


Рис. 6. Характеристики разгона автомобиля: *a* – изменение скорости; *б* – перемещение

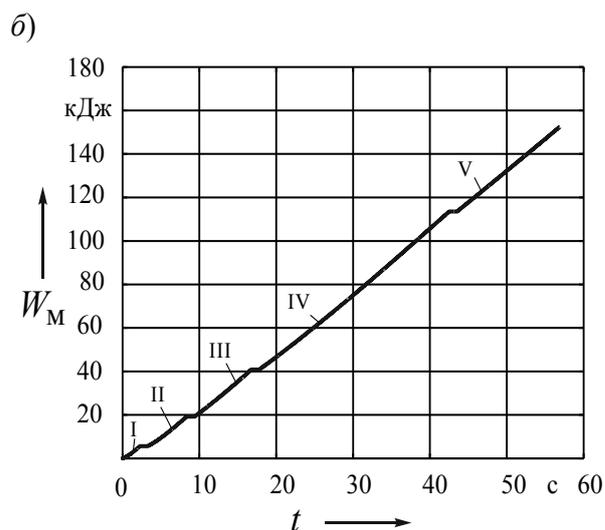
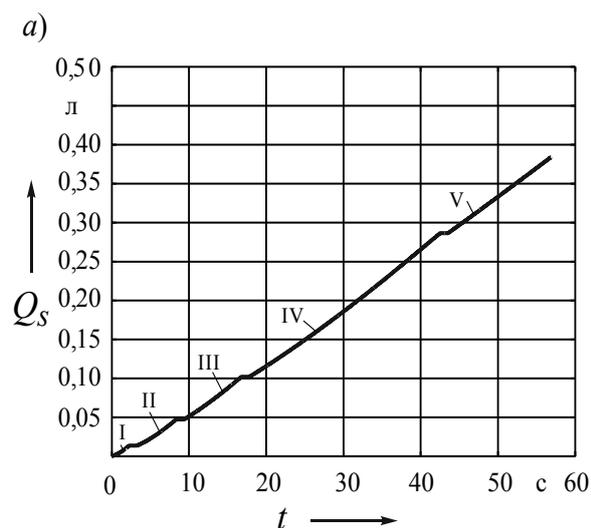


Рис. 7. Расход топлива (*a*) и реализация механической энергии двигателя (*б*) за время разгона автомобиля на участке, равном 2000 м

Из рис. 6, б следует, что при интенсивном разгоне с переключением передач согласно методике ГОСТ 22576–90 контрольный участок пути, равный 2000 м преодолён за время  $t_k = 56,86$  с. Суммарный расход топлива при этом составил  $Q_{S.K} = 0,3839$  л, а выработка энергии двигателя  $W_{M.K} = 3810$  кДж (см. рис. 7, а и б).

Тепловую энергию затраченного на разгон топлива вычислим по формуле

$$W_{T.K} = Q_{S.K} \rho_T C_T, \quad (16)$$

а усреднённое значение КПД двигателя за время разгона – по формуле (14).

В результате получены следующие значения искоемых параметров:  $W_{T.K} = 12751$  кДж;  $\eta_{D.K} = 0,299$ .

На рис. 8 показан график изменения во времени КПД двигателя  $\eta_D$  в процессе разгона автомобиля. Характер изменения  $\eta_D$  обусловлен тем, что с увеличением скорости движения после переключения на высшие передачи снижается интенсивность разгона, возрастают затраты топлива и снижается КПД.

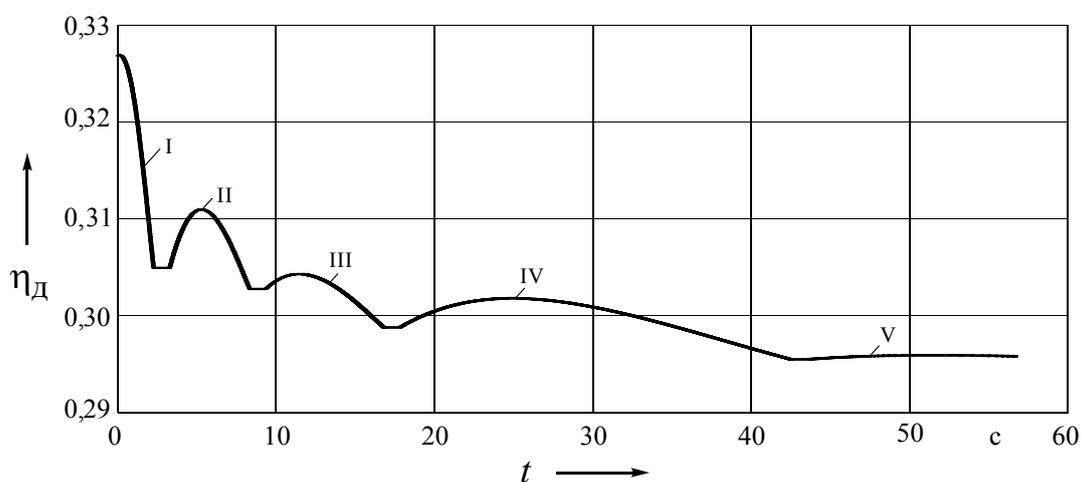


Рис. 8. Изменение КПД двигателя в процессе разгона автомобиля

## Выводы

1. Предложена методика оценки топливной экономичности установившихся и переменных режимов движения автомобиля и математические модели её реализации.

2. Приведены результаты анализа топливной экономичности автомобиля и КПД двигателя конкретного легкового автомобиля при движении в стандартных условиях – на основе топливной характеристики установившегося движения и характеристики разгона.

3. Показано, что путевой расход топлива при установившемся движении

существенно зависит от используемой передачи при заданной скорости движения, что обусловлено уровнем нагрузки двигателя и использования его энергии. Чем выше относительный уровень нагрузки, тем меньше путевой расход топлива. Для экономии топлива необходимо использовать как можно более высокий номер передачи.

4. При интенсивном разгоне с максимальной реализацией энергетических возможностей двигателя его КПД достигает наибольших значений, однако с увеличением скорости он несколько снижается вследствие возрастания относительных затрат топлива.



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Теория движения автомобиля: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
2. **Литвинов, А. С.** Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: учебник для вузов / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – Москва: Машиностроение, 1989 – 240 с.
3. **Гришкевич, А. И.** Автомобили. Теория: учебник для вузов / А. И. Гришкевич. – Минск: Вышэйшая школа, 1986. – 208 с.
4. **ГОСТ 20306–90.** Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – Москва: Изд-во стандартов, 1991. – 13 с.
5. **ГОСТ 22576–90.** Автотранспортные средства. Скоростные свойства. Методы испытаний. – Москва: Изд-во стандартов, 1991. – 32 с.

*Статья сдана в редакцию 15 января 2020 года*

**Владимир Петрович Тарасик**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

**Ольга Владимировна Пузанова**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-29-634-57-04.

**Vladimir Petrovich Tarasik**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
Tel.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

**Olga Vladimirovna Puzanova**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
Tel.: +375-29-634-57-04.