УДК 629.365

© А. А. Колин, аспирант
© С. Э. Силантьев, инженер
© П. С. Рогов, канд. техн. наук
© С. А. Сергиевский, канд. техн. наук
(Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия)
E-mail: kolinaa@nntu.ru, silantsevse@nntu.ru,
petr.rogov@nntu.ru, s.sergievskiy@nntu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-149-156

© А. А. Kolin, post-graduate student
© S. E. Silantsev, engineer
© P. S. Rogov, PhD in Sci. Tech.
© S. A. Sergievsky, PhD in Sci. Tech.
(Nizhny Novgorod State
Technical University n.a. R. E. Alexeev,
Nizhny Novgorod, Russia)
E-mail: kolinaa@nntu.ru, silantsevse@nntu.ru,
petr.rogov@nntu.ru, s.sergievskiy@nntu.ru

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЯ НА РАСХОД ТОПЛИВА В ЕЗДОВЫХ ЦИКЛАХ

INFLUENCE OF THE MAIN PARAMETERS OF THE CAR ON FUEL CONSUMPTION IN DRIVING CYCLES

Приведены результаты использования разработанной имитационной модели по оценке расхода топлива легким коммерческим автомобилем в дорожных циклах движения, проведены виртуальные испытания. Выполнен анализ влияния основных параметров автомобиля на расход топлива в циклах NEDC и WLTC. Установлены численные значения показателя среднего расхода топлива при вариации основных параметров конструкции. Показано распределение энергетических затрат во время движения автомобиля.

Ключевые слова: ездовые циклы NEDC и WLTC, расход топлива в циклах, КПД трансмиссии, легкий коммерческий автомобиль, имитационная модель.

The article presents the results of using the developed simulation model aimed at estimating the fuel consumption of a light commercial vehicle in road traffic cycles. There have been conducted virtual tests. The analysis of the influence of the main parameters of the car on fuel consumption in the NEDC and WLTC cycles is performed. There have been established numerical values of the average fuel consumption indicator through variation in the main design parameters. The distribution of energy consumption during the motion of the car is shown.

Keywords: NEDC and WLTC driving cycles, fuel consumption in cycles, transmission efficiency, light commercial vehicle, simulation model.

Введение

Расход топлива для многих потребителей — один из важнейших критериев при выборе модели автомобиля.

В связи с постоянным ростом цен на топливо и ухудшением экологической обстановки происходит увеличение интенсивности движения автомобильного транспорта. Разработка и внедрение методов определения оценки топливно-экономических и экологических свойств автомобиля на основе стандартизированных циклов — ключевая задача¹.

Наиболее распространенными являются: Новый европейский ездовой цикл (NEDC)², Американский ездовой цикл (FTP-75) и Японский ездовой цикл (JC-08). В 2017 г. в дополнение к рассмотренным вводится Всемирный гармонизированный ездовой цикл (WLTC)³, который основан на мировом статистическом исследовании режимов движения, характеризуется большими ускорениями и отсутствием участков установившегося движения [1].

² Правила ООН № 83.

³ Предложение по новым глобальным техническим правилам, касающимся всемирных согласованных процедур испытания транспортных средств малой грузоподъемности, ЕЭК ООН 2014 г.

¹ ГОСТ Р 58554–2019 Показатели энергоэффективности и экологии. Способы информирования потребителей.

Цель исследования — количественная оценка влияния различных параметров конструкции на топливную экономичность легкого коммерческого автомобиля с полной массой не более 3500 кг в ездовых циклах NEDC и WLTC.

Проведенные ранее исследования [2–9] указывают на основные методы повышения топливной экономичности автомобиля. К ним относятся снижение аэродинамического сопротивления, сопротивление качению шин и оптимизация характеристик трансмиссии. Все сказанное должно оказывать влияние на результат моделирования процесса движения в ездовых циклах. Ряд работ посвящен изучению и оптимизации передаточных чисел трансмиссии [10–14].

Методы расчета

Цикл NEDC состоит из одного городского цикла движения (или четырех простых городских циклов) и одного загородного. Движение по циклу осуществляется с помощью подробной операционной карты. В ней регламентированы применяемые передачи КПП на каждом из отрезков движения, а также ускорения транспортного средства.

Операционная карта и требования к движению в ездовом цикле NEDC содержатся в стандарте. Область применения стандарта — транспортные средства категорий M1, M2, N1 и N2, контрольная масса которых не превышает 2610 кг.

Схемы движения по простому городскому и загородному циклам, входящим в состав цикла NEDC, представлены на рис. 1 и 2.

Цикл WLTC, изображенный на рис. 3, разделен непродолжительными остановками на четыре фазы: Low, где автомобиль разгоняется максимум до 56,5 км/ч, Medium (76,6 км/ч), High (97,4 км/ч) и Extra High (131,6 км/ч).

Движение для каждой фазы настоящего цикла осуществляется с помощью операционной карты, выбор которой зависит от класса энерговооруженности транспортного средства. Фаза Extra High была исключена, что допустимо для исследуемого класса автомобиля. В цикле движения WLTC регламентируются основные требования по выбору моментов переключения передач.

Для моделирования движения автомобиля применили созданную имитационную модель.

Использовались следующие подходы к математическому описанию движения [15].

Неизвестным в случае моделирования цикла WLTC является ускорение автомобиля.

Ускорение транспортного средства находится по следующей формуле:

$$a_a = \frac{V_{j+1} - V_j}{3,6(t_{j+1} - t_j)}, \quad (1)$$

где a_a — ускорение автомобиля, м/с; V_j , V_{j+1} — соответственно начальное и конечное значения скорости на выделенном отрезке, км/ч; t_j , t_{j+1} — соответственно начальное и конечное время, с.

Переключение передач происходит согласно требованиям, описанным в работах [1, 2]. Определение начальной частоты вращения ДВС после переключения передачи проводится с учетом взаимосвязи скорости автомобиля и частоты вращения ДВС:

$$V = \frac{\omega_e r_k}{u_{tr}}. \quad (2)$$

Тяговая сила определяется по формуле

$$F_T = \frac{T_e u_{tr} \eta_{tr}}{r_k}, \quad (3)$$

где T_e — крутящий момент ДВС; u_{tr} — передаточное число трансмиссии; η_{tr} — КПД трансмиссии; r_k — радиус качения; ω_e — угловая скорость вала двигателя, рад/с.

T_e в общем случае является функцией, зависящей от положения педали акселератора и скорости ДВС, или $T_e = f(d, \omega_e)$. В математической модели T_e представляет массив данных $T_{e_{ij}}$ $i = 1 \dots 17$, $j = 1 \dots 11$.

Тяговую силу также можно определить по следующей зависимости:

$$F_T = F_f + F_w + \delta m_a a_a, \quad (4)$$

где F_T — тяговая сила на ведущих колесах; F_f — сила сопротивления качению; F_w — сила сопротивления воздуха; δ — коэффициент учета вращающихся масс; m_a — масса автомобиля; a_a — ускорение автомобиля.

Крутящий момент ДВС определялся с учетом (3) и текущей включенной передачи трансмиссии, определяемой с учетом (2). Удельный расход топлива в модели представляется с помощью массива данных $g_{e_{ij}}$ и является функцией крутящего момента и частоты вращения ДВС $g_e = f(T_e, \omega_e)$. Согласно выражениям (2–4) определялись значения T_e и ω_e . Для нахождения

Рис. 1. Схема движения по простому городскому циклу²

Рис. 2. Схема движения по загородному циклу²

Рис. 3. Схема движения по циклу WLTC

суммарного расхода топлива за цикл движения удельные значения расхода умножаются на время действия актуальных значений T_e и ω_e и далее суммируются. Неизвестные значения определяются согласно (5)–(7).

Сила сопротивления качению определяется по формуле

$$F_f = f m_a g, \quad (5)$$

где f — коэффициент сопротивления качению; g — ускорение свободного падения.

Сила сопротивления воздуха определяется следующим образом:

$$F_w = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_B \cdot A_B V^2, \quad (6)$$

где C_x — коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ_B — плотность воздуха; A_B — пло-

щадь поперечной проекции автомобиля; V — скорость автомобиля.

Коэффициент учета вращающихся масс определяется как

$$\delta = 1 + \frac{I_e u_{\text{тр}}^2 \eta_{\text{тр}}}{m_a r_k^2} + \frac{I_{\text{кп}} u_{\text{гп}}^2 \eta_{\text{гп}}}{m_a r_k^2} + \frac{\sum I_k}{m_a r_k^2}, \quad (7)$$

где I_e — момент инерции ДВС; $I_{\text{кп}}$ — момент инерции карданной передачи; $u_{\text{гп}}$ — передаточное число главной передачи; $\eta_{\text{гп}}$ — КПД главной передачи; I_k — момент инерции колеса с полуосью (при наличии).

Результаты работы

Созданная имитационная модель должна качественно реагировать на изменение входных данных, т. е. уменьшение компонента аэродинамического сопротивления будет способствовать снижению расхода топлива. Результаты моделирования для легкого коммерческого автомобиля представлены в табл. 1 и 2.

КПД коробки передач изменялось на 1 % для каждой передачи; начальные значения указаны в табл. 1 и 2.

Стоит отметить, что полученные результаты показывают неоспоримое влияние на показатель среднего расхода топлива. Увеличение КПД карданной передачи на 0,5 % приводит к снижению среднего расхода топлива на 0,36 % и, наоборот, для цикла NEDC и WLTC.

Увеличение КПД главной передачи и коробки переключения передач на 1 % для цикла NEDC приводит к снижению среднего расхода на 0,6 % и на 0,48 % соответственно. Для цикла WLTC изменение этих же параметров приводит к увеличению среднего расхода топлива на 0,72 % в первом случае и снижению показателя на 0,66 % во втором случае.

При уменьшении коэффициента аэродинамического сопротивления на 5 % средний расход становится меньше на 0,84 % в цикле NEDC и на 0,88 % в цикле WLTC.

Изменение коэффициента сопротивления качению оказывает меньшее влияние из рассматриваемых показателей. Так, при его варьировании в пределах 5 % средний расход изменяется в пределах 0,4 % в цикле движения NEDC и в пределах 0,66 % в WLTC.

Энергия, затрачиваемая на движение легкого коммерческого автомобиля, приведена в табл. 3.

Согласно табл. 3 стоит отметить, что энергия механических потерь в трансмиссии может достигать до 15 % от всей энергии, затрачиваемой на движение транспортного средства. Энергия аэродинамического сопротивления может достигать от 30 до 40 % всей затрачиваемой энергии для цикла NEDC и WLTC соответственно.

Таблица 1

Результаты влияния задаваемых параметров для цикла NEDC

Показатель	Значение	Изменение, %	Расход топлива, л/100 км	Изменение, л
Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,3738	5	16,87	0,14
	0,356	0	16,73	0
	0,3382	–5	16,59	–0,14
Коэффициент сопротивления качения	0,108	5	16,80	0,07
	0,103	0	16,73	0
	0,0098	–5	16,67	0,07
КПД главной пары	0,9797	1	16,63	–0,1
	0,97	0	16,73	0
	0,9603	–1	16,83	0,1
КПД карданной передачи	0,99495	0,5	16,67	–0,06
	0,99	0	16,73	0
	0,98505	–0,5	16,79	0,06
КПД коробки передач	I-0,96; II-0,96; III-0,96; IV-0,97; V-0,96; VI	1	16,65	–0,08
		0	16,73	0
		1	16,81	0,08

Таблица 2

Результаты влияния задаваемых параметров для цикла WLTC

Показатель	Значение	Изменение, %	Расход топлива, л/100 км	Изменение, л
Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,3738	5	13,79	0,12
	0,356	0	13,67	0
	0,3382	-5	13,55	-0,12
Коэффициент сопротивления качения	0,108	5	13,76	0,09
	0,103	0	13,67	0
	0,0098	-5	13,58	-0,09
КПД Главной пары	0,9797	1	13,57	-0,1
	0,97	0	13,67	0
	0,9603	-1	13,77	0,1
КПД карданной передачи	0,99495	0,5	13,62	-0,05
	0,99	0	13,67	0
	0,98505	-0,5	13,72	0,05
КПД коробки передач	I-0,96; II-0,96;	1	13,58	-0,09
	III-0,96; IV-0,97;	0	13,67	0
	V-0,96; VI	1	13,76	0,09

Выводы

Изменение коэффициента сопротивления качению оказывает меньшее влияние из рассматриваемых показателей. Так, при его варьировании в пределах 5 % средний расход меняется в пределах 0,4 % в цикле движения NEDC и в пределах 0,66 % в WLTC.

По результатам табл. 3 стоит отметить, что энергия механических потерь в трансмиссии может составлять до 15 % от всей энергии, затрачиваемой на движение транспортного средства. Энергия аэродинамического сопротивления может достигать от 30 до 40 % от всей затрачиваемой энергии для цикла NEDC и WLTC соответственно.

Исходя из результатов моделирования наибольшим потенциалом для снижения среднего расхода топлива легкого коммерческого автомобиля является улучшение его обтекаемости.

Увеличение КПД трансмиссии может оказать существенное влияние на средний расход топлива, но имеются ограниченные пределы улучшения данного показателя. Коэффициент сопротивления качению оказывает наименьшее влияние на исследуемый параметр. Все вышеперечисленные параметры могут быть оптимизированы совместно, что поможет достичь требуемого показателя топливной экономичности автомобиля.

В дальнейшем предстоит продолжить использовать разработанную имитационную модель для анализа влияния значений передаточных чисел трансмиссии на показатель топливной экономичности легкого коммерческого автомобиля.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных

Таблица 3

Расход энергии автомобиля в циклах NEDC и WLTC

Цикл движения	Общая энергия сопротивлению движения			Энергия механических потерь в трансмиссии			
	Энергия аэродинамического сопротивления, %	Энергия сопротивления качению, %	Энергия сопротивления разгону, %	Полуоси и ступицы, %	КПП, %	ГП, %	КП, %
NEDC	40,2	26,3	18,8	5,9	4,4	3,3	1,1
WLTC	30,7	26,8	28,4	5,1	4,5	3,3	1,1

систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года № 218).

Библиографический список

1. Горожанкин С. А., Савенков Н. В., Понякин В. В. Влияние передаточного числа главной передачи на топливную экономичность автомобиля в ездовом цикле // Вестник Сибирского гос. дорожного ун-та. 2018. № 1. С. 19–29.
2. Огороднов С. М., Тихомиров А. Н., Малеев С. И. Оценка возможности использования аналитических методов при исследовании топливной экономичности автомобилей // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. 2015. № 2. С. 53–62.
3. Огороднов С. М., Зезюлин Д. В., Макаров В. С., Малеев С. И. Разработка расчетно-экспериментальной методики оценки расхода топлива при движении автомобиля по заданному маршруту // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. 11 с.
4. Валеев Д. Х., Карабцев В. С. Пути снижения расхода топлива грузовых автомобилей // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. № 4. С. 33–39.
5. Гусаков С. В., Ощепков П. П. Сравнение испытательных ездовых циклов при оценке эксплуатационного расхода топлива двигателями легковых автомобилей // Журнал автомобильных инженеров. 2016. № 1. С. 42–47.
6. Евграфов А. Н., Кузовков Н. С. Повышение топливной экономичности легкового автопоезда путем улучшения его обтекаемости // Известия Московского гос. индустр. ун-та. 2010. № 3. С. 2–5.
7. Московкин В. В., Шкель А. С., Гуров М. Н. Основные резервы повышения топливной экономичности грузовых автомобилей // Вестник Московского гос. ун-та приборостроения и информатики. Серия: Машиностроение. 2009. № 27. С. 29–36.
8. Савенков Н. В. Повышение топливной экономичности автомобиля категории N1 оптимизацией параметров силовой установки // Транспорт Урала. 2016. № 1. С. 108–113.
9. Гусаков С. В., Марков В. А., Михрячев Д. В. Расчетно-экспериментальная методика корректировки ездового цикла для фазы движения транспортного средства в городских условиях // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. 2012. № 5. С. 23–30.
10. Филькин Н. М. Методика оптимизации передаточных чисел трансмиссии транспортной машины по критериям топливной экономичности и тягово-

скоростных свойств // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2014. № 3. С. 144–152.

11. Русаков С. С. Разработка методики оптимизации передаточных чисел механической трансмиссии легкового автомобиля с учетом режимов работы его двигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 2007. 30 с.

12. Савенков Н. В., Беспалый А. Н. Повышение топливной экономичности грузовых автомобилей путем оптимизации параметров механической ступенчатой трансмиссии // Промышленность и сельское хозяйство. 2020. № 4. С. 6–13.

13. Блохин А. Н. Разработка методики поиска рациональных передаточных чисел трансмиссии с учетом эксплуатационных свойств и назначения автомобиля: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2006. 256 с.

14. Савенков Н. В. Метод выбора передаточных чисел трансмиссии автомобиля категории N1 на основе ездового цикла // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та. 2016. № 2. С. 64–71.

15. Кравец В. Н. Теория автомобиля. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2013. 413 с.

References

1. Gorozhankin S. A., Savenkov N. V., Ponyakin V. V. *Vliyanie peredatochnogo chisla glavnoy peredachi na toplivnyuyu ekonomichnost' avtomobilya v ezdomom tsikle* [Influence of the main gear ratio on the fuel efficiency of the car in the driving cycle]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo dorozhnogo universiteta – Bulletin of the Siberian State Road Transport University*, 2018, no. 1, pp. 19–29.
2. Ogorodnov S. M., Tikhomirov A. N., Maleev S. I. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya analiticheskikh metodov pri issledovanii toplivnoy ekonomichnosti avtomobiley* [Evaluation of the possibility of using analytical methods in the study of fuel efficiency of cars]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Mashinostroyeniye – News of higher educational institutions. Ser.: Mechanical Engineering*, 2015, no. 2, pp. 53–62.
3. Ogorodnov S. M., Zezyulin D. V., Makarov V. S., Maleev S. I. *Razrabotka raschetno-eksperimental'noy metodiki otsenki raskhoda topliva pri dvizhenii avtomobilya po zadannomu marshrutu* [Development of computational and experimental methods for estimating fuel consumption when driving a car along a given route]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2014, no. 4, 11 p.
4. Valeev D. Kh., Karabtsev V. S. *Puti snizheniya raskhoda topliva gruzovykh avtomobiley* [The ways of reducing the fuel consumption of trucks]. *Mekhanika*

mashin, mekhanizmov i materialov – Mechanics of machines, mechanisms and materials, 2014, no. 4, pp. 33–39.

5. Gusakov S. V., Oshchepkov P. P. *Sravnenie ispytel'nykh ezdovykh tsiklov pri otsenke ekspluatatsionnogo raskhoda topliva dvigatelyami legkovykh avtomobiley* [Comparison of test driving cycles in the evaluation of operational fuel consumption of passenger car engines]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov – Journal of Automotive Engineers*, 2016, no. 1, pp. 42–47.

6. Evgrafov A. N., Kuzovkov N. S. *Povyshenie toplivnoy ekonomichnosti legkovogo avtopoezda putem uluchsheniya ego obtekaemosti* [Improving the fuel efficiency of a passenger car train by perfecting its wind shape]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta – Bulletin of Moscow State Industrial University*, 2010, no. 3, pp. 2–5.

7. Moskovkin V. V., Shkel' A. S., Gurov M. N. *Osnovnye rezervy povysheniya toplivnoy ekonomichnosti gruzovykh avtomobiley* [The main reserves for improving the fuel efficiency of trucks]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta priborostroeniya i informatiki. Seriya: Mashinostroenie – Bulletin of the Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics. Ser.: Mechanical engineering*, 2009, no. 27, pp. 29–36.

8. Savenkov N. V. *Povyshenie toplivnoy ekonomichnosti avtomobilya kategorii N1 optimizatsiei parametrov silovoy ustanovki* [Improving the fuel efficiency of a car of category N1 by optimizing the parameters of the power plant]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2016, no. 1, pp. 108–113.

9. Gusakov S. V., Markov V. A., Mikhryachev D. V. *Raschetno-eksperimental'naya metodika korrektsirovki ezdogo tsikla dlya fazy dvizheniya transportnogo sredstva v gorodskikh usloviyakh* [Calculation and experimental methodology for correcting the driving cycle for the phase of vehicle movement in urban conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Mashinostroenie – News of higher educational institutions. Ser.: Mechanical Engineering*, 2012, no. 5, pp. 23–30.

10. Fil'kin N. M. *Metodika optimizatsii peredatochnykh chisel transmissii transportnoy mashiny po kriteriyam toplivnoy ekonomichnosti i tyagovo-skorostnykh svoystv* [Method of optimizing the transmission ratios of a transport vehicle according to the criteria of fuel efficiency and traction-speed properties]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya – Transport. Transport Facilities. Ecology*, 2014, no. 3, pp. 144–152.

11. Rusakov S. S. *Razrabotka metodiki optimizatsii peredatochnykh chisel mekhanicheskoy transmissii legkovogo avtomobilya s uchetom rezhimov raboty ego dvigatelya. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Development of a methodology for optimizing the gear ratios of the mechanical transmission of a passenger car, taking into account the operating modes of its engine Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Tol'yatti, 2007, 30 p.

12. Savenkov N. V., Bepaliy A. N. *Povyshenie toplivnoy ekonomichnosti gruzovykh avtomobiley putem optimizatsii parametrov mekhanicheskoy stupenchatoy transmissii* [Improving the fuel efficiency of trucks by optimizing the parameters of the mechanical step transmission]. *Promyshlennost' i sel'skoe khozyaystvo – Industry and agriculture*, 2020, no. 4, pp. 6–13.

13. Blokhin A. N. *Razrabotka metodiki poiska ratsional'nykh peredatochnykh chisel transmissii s uchetom ekspluatatsionnykh svoystv i naznacheniya avtomobilya. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of a methodology for searching for rational transmission ratios taking into account the operational properties and purpose of the car. PhD in Sci. Tech. diss.]. Nizhniy Novgorod, 2006, 256 p.

14. Savenkov N. V. *Metod vybora peredatochnykh chisel transmissii avtomobilya kategorii N1 na osnove ezdogo tsikla* [Method of selecting gear ratios of the transmission of a car of category N1 on the basis of the driving cycle]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2016, no. 2, pp. 64–71.

15. Kravets V. N. *Teoriya avtomobilya* [The theory of the automobile]. Nizhniy Novgorod, Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. R. E. Alekseeva Publ., 2013, 413 p.