

# Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.436

## Расчетно-экспериментальная методика корректировки ездового цикла для фазы движения транспортного средства в городских условиях

**С.В. Гусаков, В.А. Марков, Д.В. Михрячёв**

*Проведен анализ испытательных ездовых циклов, используемых для оценки токсичности отработавших газов. Рассмотрена зависимость расхода топлива от средней скорости движения автомобиля. Предложен модифицированный испытательный цикл, более точно описывающий фазу городского движения автомобиля.*

**Ключевые слова:** автомобиль, дизельный двигатель, испытательный ездовой цикл, топливная экономичность, выбросы с отработавшими газами.

*The analysis of experimental drive cycles used to estimate the exhaust toxicity has been carried out. The relationship between a fuel consumption and a vehicle's average speed is considered. A modified experimental cycle describing the vehicle motion phase more precisely is proposed.*

**Keywords:** vehicle, diesel engine, experimental drive cycle, fuel consumption, exhaust gases emissions.

Основными требованиями, предъявляемыми к двигателям внутреннего сгорания мобильных энергетических установок в современных условиях, являются требования к их топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ). Для оценки токсично-



**ГУСАКОВ**

**Сергей Валентинович**  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой  
«Теплотехника и тепловые  
двигатели» (РУДН)



**МАРКОВ**

**Владимир Анатольевич**  
доктор технических наук,  
профессор  
кафедры «Теплофизика»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



**МИХРЯЧЁВ**

**Дмитрий Владимирович**  
аспирант кафедры  
«Теплотехника и тепловые  
двигатели» (РУДН)

сти ОГ двигателей транспортных средств разработаны различные испытательные стационарные и ездовые циклы, отражающие распределение режимов работы двигателей в реальных условиях их эксплуатации. Однако в последнее время в связи с бурным ростом числа транспортных средств и изменившейся ситуацией на городских автомобильных магистралях эти испытательные циклы уже не в полной мере отражают современные условия движения автомобилей в мегаполисах. Это затрудняет оценку показателей токсичности ОГ, а также топливной экономичности двигателей транспортных средств.

Правила оценки токсичности ОГ и картерных газов, единые для государств Европы (Правила № 15 и № 49), были введены Европейской Экономической комиссией ООН в 1970 г. В нашей стране нормирование токсичности ОГ началось в 1970 г. ГОСТ 16533—70 устанавливал нормы содержания монооксида уг-

лерода в ОГ двигателей на режиме холостого хода как у новых, выпускаемых заводами автомобилей, так и у находящихся в эксплуатации. С 2000 г. в странах Европейского экономического сообщества введены Правила 83.03, в соответствии с которыми методика испытаний на соответствие требованиям по токсичности ОГ легковых и грузопассажирских автомобилей массой до 3,5 т состоит в имитации движения транспортного средства в соответствии с стандартизованным ездовым циклом *New European Drive Cycle (NEDC = 4 цикла ECE 15 + цикл EUDC*, рис. 1, а, б).

Фаза городского движения (*ECE 15*) была включена в 1974 г. в отраслевой стандарт Министерства автомобильной промышленности на методы определения выбросов вредных веществ автомобильными двигателями внутреннего сгорания [1].

В таблице 1 приведены параметры испытательного цикла согласно ОСТ 37.001.054—74.

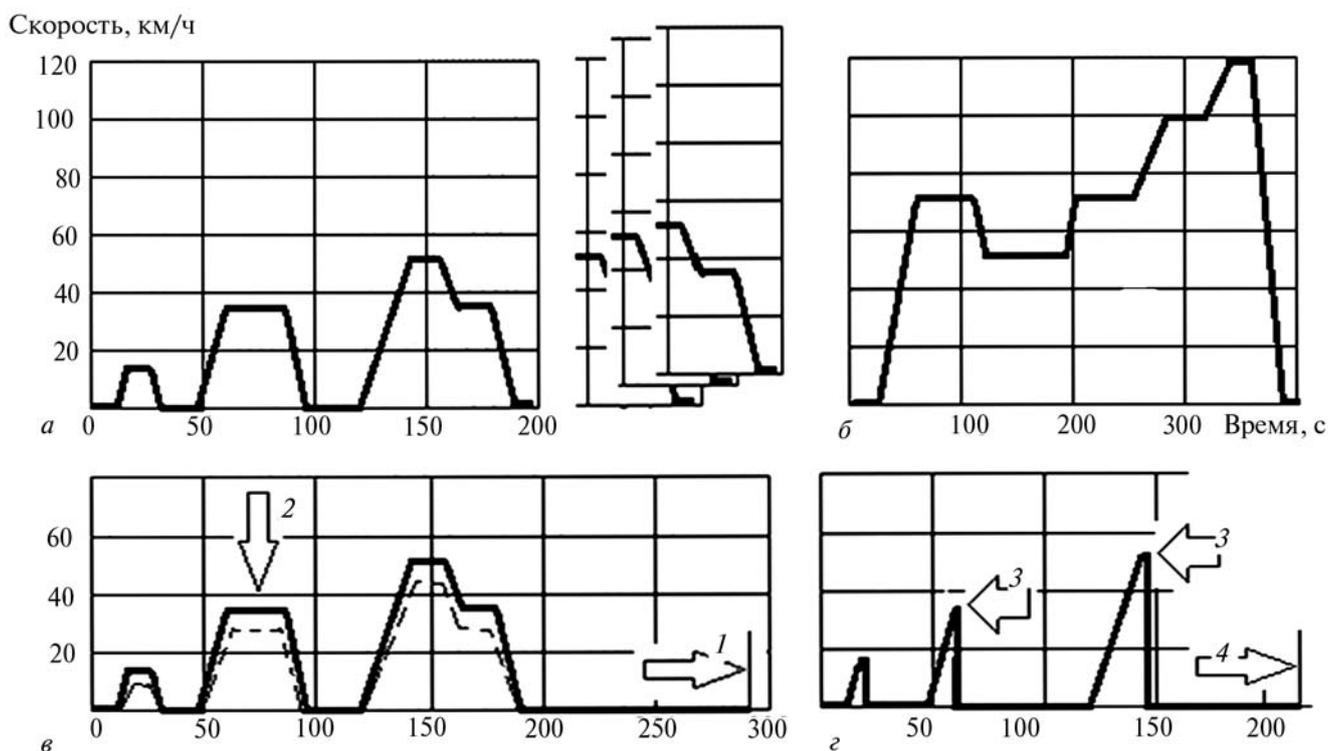


Рис. 1. Составляющие стандартного и модифицированного европейского ездового цикла:

а — городская фаза движения *ECE 15*; б — фаза движения в пригороде; в — изменение фазы городского движения за счет увеличения времени простоя и за счет снижения скоростного режима; г — модернизированная городская фаза движения; 1 и 4 — окончание фазы городского движения в стандартном и модифицированном цикле соответственно; 2 — участок с постоянной скоростью движения в стандартном цикле; 3 — участок с пиковой скоростью движения в модернизированном цикле

Таблица 1

**Ездовой цикл при испытаниях для определения выброса автомобилями вредных веществ**

Режим работы	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	Скорость, км/ч	Продолжительность режима, с		Суммарное время, с
			Часть режима	Режим в целом	
Холостой ход	—	—	11	11	11
Разгон	1,04	0—15	4	4	15
Постоянная скорость		15	8	8	23
Замедление	–0,69	15—10	2	2	25
Замедление с выключенным сцеплением	–0,92	10—0	3	3	28
Холостой ход	—	—	21	21	49
Разгон	0,83	0—15	5	12	54
Переключение передач	—	—	2		56
Разгон	0,94	15—32	5		61
Постоянная скорость	—	32	24	24	85
Замедление	–0,75	32—10	8	11	93
Замедление с выключенным сцеплением	–0,92	10—0	3		96
Холостой ход	—	—	21	21	117
Разгон	0,83	0—15	5	26	122
Переключение передач	—	—	2		124
Разгон	0,62	15—35	9		133
Переключение передач	—	—	2		135
Разгон	0,52	35—50	8		143
Постоянная скорость	—	50	12	12	155
Замедление	–0,52	50—35	8	8	163
Постоянная скорость	—	35	13	13	176
Переключение передач	—	—	2	2	178
Замедление	–0,86	32—10	7	7	185
Замедление с выключенным сцеплением	–0,92	10—0	3	3	188
Холостой ход	—	—	7	7	195

В фазу городского движения (см. рис. 1, а и табл. 1) входят режимы работы двигателя автомобиля на холостом ходу при остановках транспортного средства, разгон автомобиля, его движение с постоянной скоростью и режимы замедления. Принятая в цикле динамика основана на обобщении характера движения автотранспортного средства в конкретных условиях эксплуатации.

Следует отметить, что при разработке цикла движения автомобиля в городских условиях использовались статистические данные, более чем 40-летней давности. За прошедшее время

существенно изменились как характеристики самих автомобилей, так и условия их движения в мегаполисах. Изменения среднего эксплуатационного расхода топлива за последние 45 лет приведено на рис. 2. На рисунке видно, что для легковых автомобилей за этот период путевой расход топлива снизился примерно на 35%, в то время как парк автомобилей в г. Москве, только за последние 20 лет (с 1990 по 2010 гг.) увеличился с примерно с 800 тыс. до 3 600 тыс. автомобилей, т. е. примерно в 4,5 раза [2].

В тоже время, если условия загородного движения изменились мало (например, не про-



Рис. 2. Средние значения путевого расхода топлива различными типами транспортных средств

изошло коренных изменений в ограничении скорости движения транспортных средств), то в крупных городах темпы роста парка автомобилей значительно превысили увеличение пропускной способности городской дорожной сети, в результате чего динамика движения в мегаполисах существенно изменилась. Оценить топливно-экономические параметры силовой установки транспортного средства можно путем регистрации путевого расхода топлива в различных условиях движения, характеризуя их, в свою очередь, средней скоростью движения транспортного средства, как это показано на рис. 3. Конечно, одно и то же значение средней скорости транспортного средства, может быть зарегистрировано при различных условиях движения, поэтому экспериментальные точки должны иметь разброс. На рисунке 4 приведен массив экспериментальных точек, полученных при суммарном пробеге около 15 тыс. км по г. Москве и Московской области.

Регистрация показателей ежедневного пробега автомобиля и количества израсходованного топлива осуществлялась с помощью бортового компьютера. Эксперимент проводился на автомобиле Renault Logan с бензиновым двигателем рабочим объемом 1,6 л. Информация с электронного блока управления двигателя RENAULT K7M 90ch через диагностический разъем и K-line интерфейс, обрабатывалась бортовым компьютером БК58, производства

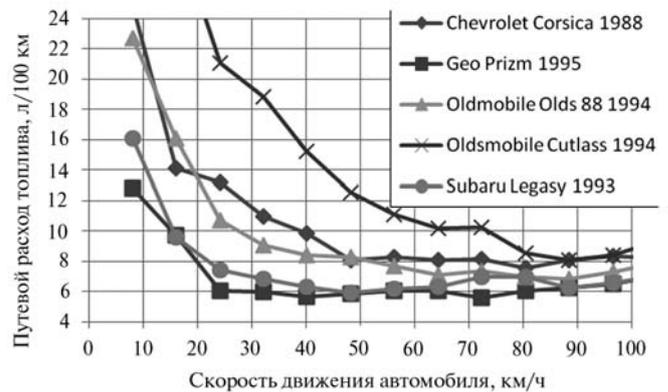


Рис. 3. Значения путевого расхода топлива в зависимости от средней скорости движения для различных марок автомобилей

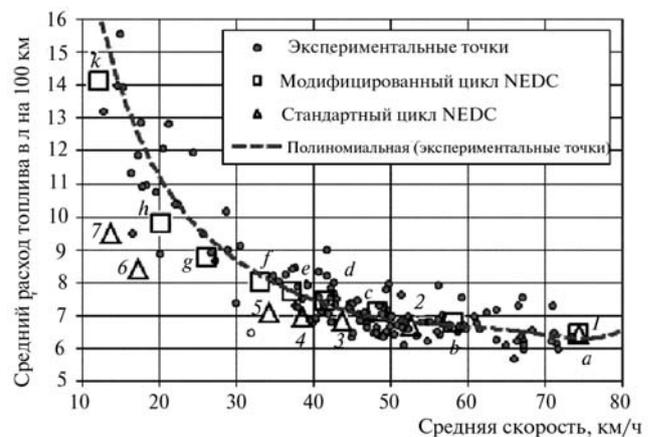


Рис. 4. Результаты эксперимента по регистрации эксплуатационного расхода топлива в функции от средней скорости движения автомобиля (точки) и расчетно-экспериментальные значения для стандартного (Δ) и модифицированного (□) Европейского ездового цикла

НПП «Орион». Аппроксимирующая кривая, изображенная пунктиром на рис. 4, получена по уравнению регрессии

$$G_{100} = 2,58708 \cdot 10^{-9} V_{cp}^6 - 7,56703 \cdot 10^{-7} V_{cp}^5 + 8,984035 \cdot 10^{-5} V_{cp}^4 - 5,585943 \cdot 10^{-3} V_{cp}^3 + 0,195778 V_{cp}^2 - 3,84198 V_{cp} + 42,3007, \quad (1)$$

— полиному 6-й степени, с достоверностью  $R^2 = 0,87$ , описывающему массив экспериментальных точек. На этом же рисунке приведены данные расчета путевого расхода топлива (маркер Δ), соответствующего различным фазам движения по циклу ECE 15 + EUDC.

В основу расчета путевого расхода топлива при движении транспортного средства в соответствии с определенным законом изменения скорости движения от времени положен мощностной баланс — равенство суммы мощностей, затрачиваемых на преодоление сопротивления качения колес, аэродинамическое сопротивление и преодоление сил инерции при ускорении автомобиля, мощности, развиваемой двигателем, с учетом потерь в трансмиссии [3]. Расчет реализован в компьютерной программе [4], которая в качестве исходных данных использует экспериментально полученный массив значений среднего удельного эффективного расхода топлива для каждой нагрузочно-скоростной зоны поля рабочих режимов двигателя [5].

В таблице 2 приведены расчетные параметры, характеризующие движение транспортного средства в соответствии с фазами цикла. Среди параметров движения, в таблице приводится работа, совершаемая в цикле двигателем транспортного средства:

$$A_{т.с} = \sum_{i,j=1}^{i,j} N_{e_{ij}} \Delta t,$$

где  $N_{e_{ij}}$  — средняя эффективная мощность двигателя автомобиля в  $ij$ -й нагрузочно-скоростной зоне;  $\Delta t$  — временной шаг расчета;  $\eta_t$  — транспортный КПД цикла, определяемый, как отношение совершенной в цикле работы к энергии, заключенной в израсходованном топливе:

$$\eta_t = \frac{A_{т.с}}{G_t H_U},$$

где  $H_U$  — низшая теплота сгорания бензина.

В таблице 2 определены условия движения, для которых рассчитана средняя скорость и путевой расход топлива (см. рис. 4, маркер  $\Delta$ , числа — от 1 до 7). Точка 1 соответствует фазе загородного движения. Средняя скорость в этом случае наибольшая. Последующие точки соответствуют увеличению в цикле вклада городской фазы движения. Точка 2 — фаза движения по шоссе плюс одна фаза городского движения, точка 3 — фаза движения по шоссе плюс две фазы городского движения, точка 4 — фаза движения по шоссе плюс три фазы городского движения и точка 5 — фаза движения по шоссе плюс четыре фазы городского движения (собственно цикл *ECE 15 + EUDC*). Точка 6 — исключительно фаза городского движения, а точка 7 — городская фаза, но со сниженным на 20% скоростным режимом езды. На рисунке видно, что при снижении средней скорости движения за счет увеличения доли городской езды в цикле, темп увеличения путевого расхода топлива меньше, чем по данным эксперимента.

Объективно сопоставить экспериментальные данные по эксплуатационному расходу топлива с прогнозируемыми значениями, полученными при расчетно-экспериментальном моделировании движения автомобиля по фа-

Таблица 2

Интегральные характеристики при движении в соответствии с составляющими фазами европейского испытательного цикла *ECE 15 + EUDC*

Условия движения автотранспортного средства (номер точки на рис. 4)	Параметры движения в цикле						
	Работа в цикле $A_{тс}$ , кДж	Расход топлива за цикл $G_t$ , кг	Транспортный КПД $\eta_t$	Время цикла $t_{цикл}$ , с	Средняя скорость $V_{ср}$ , км/ч	Пройденный путь $L_{цикл}$ , м	Расход топлива $G_{100}$ , л/100 км
Шоссе (точка 1)	4482	0,537	0,196	357	74,5	7390	6,40
Шоссе + одна городская фаза (точка 2)	4789	0,635	0,177	575	52,6	8398	6,65
Шоссе + две городские фазы (точка 3)	5098	0,728	0,164	773	43,8	9406	6,81
Шоссе + три городские фазы (точка 4)	5406	0,821	0,154	982	38,6	10412	6,94
Шоссе + четыре городские фазы (точка 5)	5713	0,921	0,145	1200	34,3	11420	7,09
Городская фаза (точка 6)	1233	0,394	0,075	846	17,2	4030	8,38
Городская фаза со снижением на 20% скорости (точка 7)	834	0,347	0,056	843	13,8	3224	9,48

Проверка адекватности модели цикла *NEDC* по критерию Фишера

$V_{ср}$ , км/ч	Экспериментальный расход топлива $G_{100}$ , рассчитанный по формуле (1), л/100 км	Расход топлива $G_{100}$ , соответствующий точкам фаз цикла <i>NEDC</i> , л/100 км	Фактическое значение критерия Фишера	Критическое значение критерия Фишера
13,77	14,81	10,72	Число точек $n = 7$ Среднее значение $\bar{G}_{100} = \frac{\sum G_{100i}}{n}$ Дисперсия $S^2 = \frac{\sum (G_{100i} - \bar{G}_{100})^2}{n - 1}$ Фактическое значение $F_{факт} = \frac{S_{больша}^2}{S_{меньша}^2} = 6,80$	Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05 и степенях свободы числителя и знаменателя $\nu_{чис} = \nu_{зн} = 6$ , равно $F_{крит} = 4,28$ , т. е. $F_{факт} > F_{крит}$ и, следовательно, примененная расчетно-экспериментальная модель неадекватно описывает данные эксперимента
17,2	12,51	9,53		
34,3	8,078	8,06		
38,6	7,600	7,89		
43,8	7,175	7,74		
52,6	6,795	7,56		
74,5	6,300	7,27		
86,8	8,854	7,55		
Среднее значение $\bar{G}_{100}$	9,037	8,396		
Дисперсия $s^2$	10,71	1,575		

Таблица 4

Городская фаза движения, модифицированная за счет увеличения времени простоя и снижения скоростного режима движения

Процент увеличения продолжительности фазы городского движения за счет простоя	Параметры движения в фазе (в скобках при снижении скоростного режима на 20%)						
	Работа в цикле $A_{гс}$ , кДж	Расход топлива за цикл $G_r$ , кг	Транспортный КПД $\eta_r$	Время цикла $t_{цикл}$ , с	Средняя скорость $V_{ср}$ , км/ч	Пройденный путь $L_{цикл}$ , м	Расход топлива $G_{100}$ , л/100 км
0	308,4 (208,7)	0,0670 (0,0608)	0,104 (0,080)	228 (228)	15,9 (12,7)	1007,4 (805,9)	8,75 (9,95)
10%	То же	0,0719 (0,0658)	0,100 (0,074)	260 (260)	14,0 (11,2)	То же	9,40 (10,7)
20%	»	0,0 (0,0)	0,094 (0,069)	290 (290)	12,5 (10,0)	»	10,0 (11,5)
30%	»	0,0 (0,0)	0,089 (0,065)	320 (320)	11,3 (9,06)	»	10,6 (12,3)
40%	»	0,0 (0,0)	0,084 (0,061)	350 (350)	10,4 (8,29)	»	11,2 (13,0)

зам испытательного цикла, можно по критерию Фишера для средних скоростей движения по семи выбранных нами точкам. Результаты анализа представлены в табл. 3.

Как видно на рис. 4, неадекватность модели возрастает с увеличением вклада городской езды, что видимо, связано с принятой в городской фазе некорректной динамике движения. В таблице 4 приведены данные расчета фазы городского движения при увеличении доли простоя автомобиля в пробках (процент от общего времени городской фазы, см. рис. 1, в). В качестве базовой взята городская фаза в соответствии с рис. 1 продолжительностью 228 с, из которых 42 с — участки разгона, 57 с — участки

с постоянной скоростью движения, 43 с — участки торможения и 86 с — участки стоянки автомобиля.

Снижение средней скорости автомобиля за счет увеличения времени простоя (увеличения времени работы двигателя на минимально устойчивых оборотах холостого хода), как при стандартном скоростном режиме движения, так и при более низких скоростях, не приводит к существенному росту путевого расхода топлива, какой имеет место по экспериментальным данным на средних скоростях ниже 15 км/ч (см. рис. 3). Это связано с тем, что современному ДВС с искровым зажиганием за счет оптимальной конструкции, электронного управления

Таблица 5

**Городская фаза движения, модифицированная за счет исключения режимов движения с постоянной скоростью при различном времени простоя**

Процент увеличения продолжительности фазы движения за счет простоя	Параметры движения в фазе						
	Работа в цикле $A_{тс}$ , кДж	Расход топлива за цикл $G_{т}$ , кг	Транспортный КПД $\eta_{т}$	Время цикла $t_{цик}$ , с	Средняя скорость $V_{ср}$ , км/ч	Пройденный путь $L_{цик}$ , м	Расход топлива $G_{100}$ , л/100 км
0	202,4	0,0209	0,227	43,4	19,2	231,4	11,9
10%	То же	0,0217	0,219	48,4	17,2	То же	12,3
20%	»	0,0224	0,211	53,4	15,6	»	12,8
30%	»	0,0232	0,204	58,4	14,3	»	13,2
40%	»	0,0240	0,198	63,4	13,1	»	13,7
50% — точка к на рис. 4	»	0,0247	0,192	68,4	12,2	»	14,1
70%	»	0,0263	0,180	78,4	10,6	»	15,0

Таблица 6

**Модифицированный Европейский цикл с различной долей фазы городского движения**

Число повторений модифицированной фазы городского движения в цикле и буква точки на рис. 4	Параметры движения в фазе						
	Работа в цикле $A_{тс}$ , кДж	Расход топлива за цикл $G_{т}$ , кг	Транспортный КПД $\eta_{т}$	Время цикла $t_{цик}$ , с	Средняя скорость $V_{ср}$ , км/ч	Пройденный путь $L_{цик}$ , м	Расход топлива $G_{100}$ , л/100 км
1 (b)	4686	0,391	0,281	471	58,2	7621	6,76
2 (c)	4885	423,4	0,271	585	48,3	7852	7,10
3 (d)	5086	455,2	0,262	699	41,6	8082	7,41
4 (f)	5287	485,3	0,256	803	37,3	8311	7,68
5 (g)	5489	518,7	0,248	927	33,2	8542	8,00
8 (h)	6092	613,8	0,233	1269	26,2	9232	8,75
13 (k)	7095	772,0	0,213	1838	20,3	10378	9,79

и высококачественным моторным маслам требуется менее 1 л топлива в час для работы на холостом ходу.

Повышенный расход, видимо, связан с иной динамикой движения транспортного средства в условиях мегаполиса. На рисунке 1, 2 показана модифицированная фаза движения автомобиля в мегаполисе. Принято, что автомобиль разгоняется, двигается по инерции и замедляется до полной остановки. В таблице 5 приведены данные моделирования модифицированного таким образом цикла.

За базовую модифицированную фазу городского движения в условиях мегаполиса принят цикл с 50%-ной увеличенной долей простоя автомобиля в пробках (точка к на рис. 4, маркер □). Эта фаза (четырёхкратное ее повторение, как это сделано в цикле *NEDC*) совместно с фазой загородного движения составляет модифицированный ездовой цикл. Чтобы оценить как

цикл соотносится с данными эксперимента, проведена серия расчетов, в которых изменение средней скорости движения происходит за счет числа повторений модифицированной фазы городского движения в цикле (число повторений и соответствующая латинская буква, идентифицирующая точку, маркер □, на рис. 4, приведены в первом столбце табл. 6). Точка а соответствует фазе загородного движения.

Последующие точки соответствуют увеличению в цикле вклада городской фазы движения. Точка *b* — фаза движения по шоссе плюс одна фаза городского движения, точка *c* — фаза движения по шоссе плюс две фазы городского движения, точка *d* — фаза движения по шоссе плюс три фазы городского движения и точка *e* — фаза движения по шоссе плюс четыре фазы городского движения, точка *f* — фаза движения по шоссе плюс пять фаз городского движения, точка *g* — фаза движения по шоссе плюс восемь

Проверка адекватности модели модифицированного цикла *NEDC* по критерию Фишера

Средняя скорость $V_{ср}$ , км/ч	Экспериментальный расход топлива $G_{100}$ , рассчитанный по формуле (1), л/100 км	Расход топлива $G_{100}$ , соответствующий точкам фаз цикла <i>NEDC</i> , л/100 км	Фактическое значение критерия Фишера	Критическое значение критерия Фишера
12,2	16,22	14,1	Число точек $n = 9$ Среднее значение $\bar{G}_{100} = \frac{\sum G_{100,i}}{n}$ Дисперсия $S^2 = \frac{\sum (G_{100,i} - \bar{G}_{100})^2}{n-1}$ Фактическое значение $F_{факт} = \frac{S_{больша}^2}{S_{меньша}^2} = 1,76$	Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05 и степенях свободы числителя и знаменателя $\nu_{чис} = \nu_{зн} = 8$ , равно $F_{крит} = 3,44$ , т. е. $F_{факт} < F_{крит}$ , следовательно, примененная расчетно-экспериментальная модель адекватно описывает данные эксперимента
20,3	11,08	9,79		
26,2	9,397	8,75		
33,2	8,220	8,00		
37,3	7,733	7,68		
41,6	7,335	7,41		
48,3	6,933	7,10		
58,2	6,696	6,76		
74,5	6,300	6,4		
Среднее значение $\bar{G}_{100}$	8,879	8,443		
Дисперсия $s^2$	9,790	5,572		

фаз, точка  $h$  — фаза движения по шоссе плюс тринадцать фаз городского движения.

С увеличением в цикле числа фаз городского движения с 1 до 13, средняя скорость падает на 65%; при увеличении пути, проходимого автомобилем в 1,36 раза, работа цикла возрастает в большей степени (в 1,52 раза), а расход топлива за цикл, еще больше — в 1,97 раза. Соответственно расчет и путевой расход топлива (точки  $b-h$  на рис. 4).

Для проверки адекватности проведен анализ по критерию Фишера (табл. 7), который показал, что экспериментальные данные и значения, полученные с помощью модифицированного цикла принадлежат одной генеральной совокупности и модель адекватна моделируемому процессу [6].

**Выводы**

1. Европейский испытательный цикл *NEDC* в соответствии с Правилами 83 ЕЭК ООН не в полной мере учитывает распределение режимов движения транспортных средств в условиях современного мегаполиса, а следовательно и режимов работы силовой установки автомобиля — ДВС, что может исказить оценки эмиссии вредных веществ и путевого расхода топлива при его использовании.

2. Предложена расчетно-экспериментальная методика корректировки ездового цикла

для фазы движения транспортного средства в городских условиях, учитывающая движения автомобилей в условиях современного мегаполиса.

3. Модернизация фазы городского движения испытательного цикла *NEDC* позволяет проводить расчетно-экспериментальные работы по оценке топливно-экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания транспортных средств, результаты которых в большей мере соответствуют действительности.

**Литература**

1. Отраслевой стандарт Министерства автомобильной промышленности. ОСТ 37.001.054—74. Автомобили и двигатели. Выбросы вредных веществ. Нормы и методы определения. М.: Изд-во НАМИ, 1981. 15 с.
2. Автотранспорт и экология мегаполисов / А.А. Ипатов, В.Ф. Кутенев, В.А. Лужко, А.С. Теренченко, Н.А. Хрипач. М.: Экология. Машиностроение, 2010. 253 с.
3. Гаспарянц Г.А. Конструкция, основы теории и расчета автомобиля. М.: Машиностроение, 1978. 350 с.
4. Гусаков С.В., Михрячев Д.В. Численное моделирование расхода смесового топлива при эксплуатации автомобиля // Тр. Международной научно-практической конференции: «Инженерные системы 2010». М.: Изд-во РУДН, 2010. С.102—103,
5. Гусаков С.В., Афанасьева И.В., Марков В.А. Энергетический баланс гибридной силовой установки автомобиля при его движении в соответствии с новым европейским испытательным циклом *NEDC* // Грузовик. 2010. № 7. С. 22—34.
6. Гусаков С.В., Патрахальцев Н.Н. Планирование, проведение и обработка данных экспериментальных исследований двигателей внутреннего сгорания. М.: Изд-во РУДН, 2004. 167 с.

Статья поступила в редакцию 22.03.2012