

---

## ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РАБОТЫ ДВС

С.В. Гусаков, П.П. Ощепков, И.В. Епифанов,  
В.А. Новиков

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей  
Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Кратко рассмотрена методика оценки влияния неустановившихся режимов работы на интегральные показатели дизеля по токсичности или топливной экономичности, применительно к ездовому циклу NRTC для внедорожной техники.

**Ключевые слова:** дизель, испытательный цикл, неустановившиеся режимы работы, интегральные показатели, топливная экономичность, экологические показатели.

Развитие методов контроля эмиссии вредных веществ с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и оценки эксплуатационной топливной экономичности направлено на приближение условий проведения испытаний к реальным условиям эксплуатации. Современные экспериментальные методики предусматривают работу двигателя не только в различных нагрузочно-скоростных зонах его универсальной характеристики, но и на переходных режимах работы. Зная это, разработчики ДВС должны заботиться об оптимизации рабочего процесса не только на установившихся режимах работы двигателя, но и предусматривать мероприятия по снижению эмиссии вредных веществ и снижению расхода топлива в течении переходных процессов, при изменении как нагрузочного, так и скоростного режимов работы. Оценка влияния неустановившихся режимов на интегральные показатели двигателя целесообразнее проводить при его работе в соответствии со стандартным испытательным циклом.

Рассмотрим цикл NRTC (Non-Road Transient Cycle) — цикл для проведения испытаний на неустановившихся режимах работы ДВС, устанавливаемых на внедорожных транспортных средствах. Цикл задается таблицей из 1238 строк, каждая из которых соответствует интервалу времени в одну секунду. В каждой строке задаются относительная частота вращения коленчатого вала и относительный крутящий момент двигателя - относительные режимы цикла.

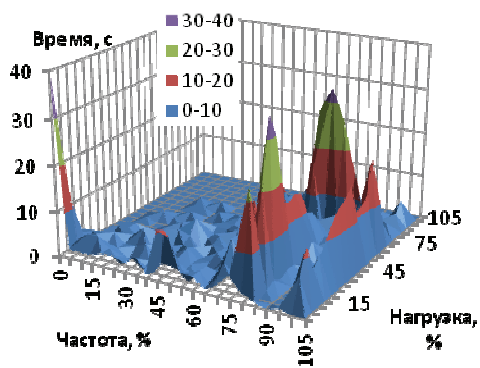
Обработка таблицы цикла NRTC, приведенная на рис. 1, позволила определить, сколько времени двигатель работает в каждой нагрузочно-скоростных зоне из 484, полученных разбиением относительных частоты вращения и нагрузки, на 22 интервала, с изменением режима на каждом  $\pm 2,5\%$ ). Из приведенного графика видно, что при выполнении цикла двигатель работает по времени крайне неравномерно в разных нагрузочных и скоростных зонах. Однако время работы в зонах  $t_{ij}$  не полностью характеризует особенности работы двигателя. Представляет интерес работа, совершаемая двигателем в каждой нагрузочной ( $j$ ) и скорост-

ной ( $i$ ) зоне, которую на установившемся режиме можно вычислить по соотношению

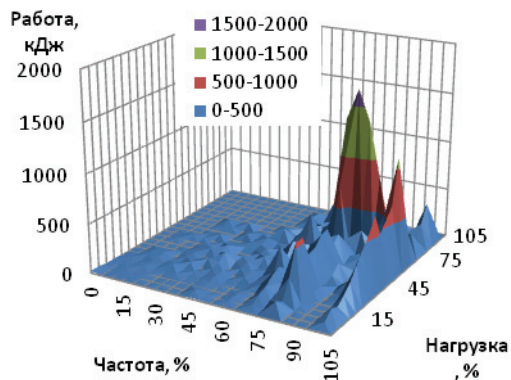
$$L_{устij} = N_{eij} \cdot t_{ij} = \frac{M_{кij} \cdot n_{ij} \cdot t_{ij}}{9550},$$

где  $N_{eij}$ ,  $n_{ij}$ ,  $M_{кij}$  — средние значения мощности, частоты вращения и крутящего момента двигателя  $ij$ -той нагрузочно-скоростной зоне соответственно.

На рис. 2 показано, как распределяется работа, совершаемая двигателем, работающим на установившихся режимах цикла NRTC. Из приведенного графика видно, что по сравнению со временем области с большей работой смещаются к высоким частотам вращения и нагрузке.



**Рис. 1.** Распределение времени работы двигателя NRTC (время работы дизеля на холостом ходу показано условно, реально двигатель работает на этом режиме 72 с)



**Рис. 2.** Распределение полезной работы, выполняемой двигателем при реализации цикла NRTC

Переход к дизелю Д-245.12С ММЗ показал, что основную работу двигатель совершает на относительных частотах 60...100% ( $n = 1450...2400 \text{ мин}^{-1}$ ) и нагрузке 20...95% ( $M_k = 70...330 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ), пиковое значение работы лежит около частоты  $1700 \text{ мин}^{-1}$  и крутящего момента 260 Н·м. Интегрирование работы по всему полю возможных режимов работы за общее время цикла NRTC 20 мин. 38 сек. дает для дизеля Д-245.12С ММЗ значение совершаемой им работы за цикл, равное

$$L_{уст\Sigma} = \sum_{i=1; j=1}^{I \times J=484} L_{устij} = 21,1 \text{ МДж.}$$

Это значение получено по установившимся параметрам, хотя в действительности согласно протоколу цикла NRTC двигатель переходит с режима на режим, меняя частоту вращения, что требует дополнительных затрат энергии на неустановившуюся составляющую перехода — динамическую составляющую работы ДВС.

Кинетическая энергия движущихся масс двигателя с моментом инерции  $J_{\text{двс}}$ , приведенных к коленчатому валу, вращающемуся с угловой частотой  $\omega$ , равна  $L_{\downarrow}(\text{дин}\downarrow 12)$ .

Переход с одной частоты вращения коленчатого вала  $n_1$  на большую частоту  $n_2$  требует совершения работы, равной

$$L_{\downarrow}(\text{дин}\downarrow 12) = J_{\downarrow\text{двс}}/2 \cdot (\omega_{\downarrow 2}^{\uparrow 2} - \omega_{\downarrow 1}^{\uparrow 2}) = \\ = \{ \text{так как, } \omega = (\pi \cdot n)/30, \text{ то} \} = (J_{\downarrow\text{двс}} \cdot \pi^{\uparrow 2})/2(900 \cdot (n_{\downarrow 2}^{\uparrow 2} - n_{\downarrow 1}^{\uparrow 2})).$$

При моменте инерции, равном приведенному моменту инерции дизеля Д-245.12С ММЗ, суммарная работа, требуемая на разгон двигателя (динамическую составляющую) по всем режимам цикла NRTC, на которых  $n_k > n_{k-1}$ , составит

$$L_{\text{дин}} = \sum_{k=2}^K L_{\text{дин}ij} = 0,00548 \cdot J_{\text{двс}} \cdot \sum_{\substack{k=2 \\ n_k > n_{k-1}}}^{K=1238} [(n_k^2) - n_{k-1}^2] = 0,932 \text{ МДж},$$

т.е. 4,1% от затрат на установившихся режимах работы в соответствии с циклом NRTC, что представляет незначительную величину.

Однако при разгоне транспортного средства приведенный момент инерции двигателя составляет лишь часть от инерционности автомобиля в целом. Момент инерции приведенных масс автомобиля ЗИЛ-5301 «Бычок», на котором установлен дизель Д-245.12С ММЗ, может быть оценен исходя из того, что при снаряженной массе 3950 кг он имеет время разгона до скорости  $V_{\text{тс}} = 60$  км/час  $\tau_{60} = 30$  сек. [1]. На этой скорости частота вращения коленчатого вала при движении на 4-й передаче с передаточным отношением коробки перемены передач  $i_{\text{кпп}} = 1,47$ , составит  $1807 \text{ мин}^{-1}$ , где  $i_{\text{гп}} = 3,273$  — передаточное отношение главной передачи;  $D_{\text{к}} = 0,82$  — диаметр колеса автомобиля, м.

Запасенная при разгоне кинетическая энергия при этом составит  $E_{\text{кин}} = 548,6$  кДж транспортного средства, приведенный момент к коленчатому валу двигателя, в этом случае, равен  $30,6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , т.е. в 13,5 раз больше момента инерции дизеля Д-245.12С ММЗ.

Таким образом, если бы требовалось выполнить цикл испытаний NRTC с «присоединенным» автомобилем, то суммарные затраты энергии на динамическую составляющую составили бы 12613 кДж или 55,8% от работы на установившихся режимах. При этом на отдельных переходах с низкой частоты на более высокую частоту величина затрат энергии на увеличение скорости была бы столь высока, что превышала бы энергетические возможности двигателя [2].

Следует отметить, что несмотря на то, что среднее значение затрат в цикле на разгон двигателя без приведенных инерционных масс мало, на отдельных участках цикла эти затраты достаточно велики. Это хорошо видно из таблицы. Из общего количества режимов цикла NRTC переход на 791 режим не приводит к увеличе-

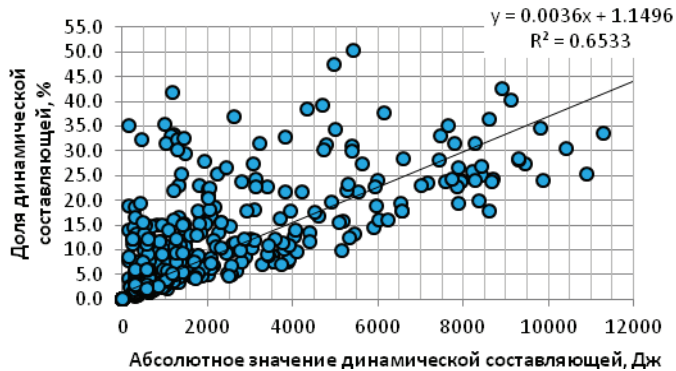
нию частоты вращения коленчатого вала и динамическая составляющая равна нулю. Количество переходов на режимы с увеличенной частотой вращения коленчатого вала уменьшается с ростом величины доли динамической составляющей.

Таблица

**Распределение доли динамической составляющей,  $\delta = L_{\text{дин.ij}} / (L_{\text{уст.ij}} + L_{\text{дин.ij}}) \cdot 100\%$  по участкам цикла, состоящего из 1238 режимов, протяженностью в 1 сек. каждый**

Диапазон изменения доли динамической составляющей $\delta$ , %	0	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70
Количество режимов, имеющих динамическую составляющую, определенной величины	791	271	93	48	29	5	1	0

Таблица дает представление о количестве разгонов в цикле и распределении их относительной энергоёмкости — доли динамической составляющей режима. Однако абсолютные затраты энергии на разгон до определенной угловой частоты неодинаковы для различных скоростных режимов. На рис. 3 представлены данные по абсолютным значениям требуемой работы на разгон для различных точек цикла.



**Рис. 3.** Поле возможных сочетаний относительной и абсолютной энергоёмкости разгона двигателя на различных режимах цикла NRTC для дизеля Д-245.12С ММЗ

Из приведенного графика видно, что существует общая тенденция к снижению абсолютных энергетических затрат при снижении доли динамической составляющей. Однако много точек отклоняются от линейного тренда, о чем свидетельствует низкое значение величины достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,653$ . Так для одной доли динамической составляющей около 35%, значение работы разгона меняется от 139 Дж до 11293 Дж.

Таким образом, неучет динамической составляющей может привести к существенным погрешностям в результатах испытаний в соответствии с нестационарным циклом NRTC. Известно, что данные, полученные на стационарных режимах, не всегда правильно отражают поведение исследуемого объекта в нестационарных режимах, и квазистационарный подход в этих случаях неприемлем. Этот факт хо-

рошо подтверждают экспериментальные исследования экологической составляющей эксплуатации дизелей [3].

Конечно, моделирование рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания, в котором циклически повторяются нестационарные процессы тепломассообмена, составляющие рабочий цикл, с учетом переходного процесса наброса нагрузки, представляет достаточно сложную задачу [4]. Однако разработка таких моделей необходима для минимизации негативного эффекта от применения ДВС на транспорте и дает на практике реальные результаты [5; 6].

В результате проведенных расчетов можно сделать следующие выводы.

Показано, что на современном этапе нормирования вредных выбросов разработчики ДВС должны заботиться об минимизации выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами не только на установившихся режимах работы двигателя, но и предусматривать мероприятия по снижению эмиссии вредных веществ в течении переходных процессов, при изменении как нагрузочного, так и скоростного режимов работы.

Предложенная методика оценки влияния неустановившихся режимов работы дизеля на его интегральные экологические показатели при выполнении программы испытаний согласно произвольному нагрузочно-скоростному циклу, рассмотренная на примере цикла для внедорожной техники NRTC, позволяет учитывать эффект от мероприятий направленных на снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами и эксплуатационного расхода топлива.

Проведенный расчетный анализ, построенный на базе экспериментальных данных, показал, что при выполнении программы цикла NRTC, динамическая составляющая на некоторых режимах работы может достигать величины, составляющей до 50% от ее стационарного значения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Автомобили ЗИЛ-5301 4x2: Автосправочник. — URL: <http://www.autosoft.ru/directory/info/zil/5301/model.html>. [Avtomobili ZIL-5301 4x2: Avtospravothnik. — URL: <http://www.autosoft.ru/directory/info/zil/5301/model.html>]
- [2] Гусаков С.В., Кривяков С.В. Численное моделирование нагружения силового агрегата городского автобуса // Актуальные проблемы теории и практики в инженерных исследованиях. — М.: Машиностроение, 1999. — С. 122—123. [Gusakov S.B., Krivjakov S.B. Thislennoe modelirovanie nagrugenija silovogo agregata gorodskogo avtobusa // Aktualnye problemy teorii i praktiki v ingenernyh issledobanijah. — М.: Mashinostroenie, 1999. — S. 122—123.]
- [3] Jonathan R. Hagen, Zoran S. Filipi, and Dennis N. Assanis. «Transient Diesel Emissions: Analysis of Engine Operation During a Tip-In», SAE Paper No. 2006-01-1151, 2006.
- [4] Гусаков С.В., Анджана Прияндака. Метод расчета выбросов NOx и сажи на переходных режимах работы дизеля // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: Материалы IX Междунар. научн.-практ. конференции. — Владимир: ВГУ, 2003. — С. 240—243. [Gusakov S.V., Andgana Prijanaka. Method rastheta vybrosov NOx i sagi na perehodnyh regimah raboty diselja.]
- [5] Гусаков С.В., Уклейкин В.Е., Афанасьева И.В., Эльгобаши Эльхагар М.М. Построение математических моделей прогнозирования и снижение выбросов вредных веществ, применением альтернативных топлив на переходных режимах работы дизеля // АвтоГазо-Заправочный Комплекс + Альтернативное топливо. — 2009. — № 5. — С. 14—18.

- [6] *Гусаков С.В., Михрячёв Д.В. Численное моделирование расхода смесового топлива при эксплуатации автомобиля // Инженерные системы: Материалы Международной научно-практической конференции. — М.: РУДН, 2010. — С. 102—103. [Gusakov S.B., Mikhrya-thev D.V. Thislennoe modelirovanie rashoda smesevogo topliva pri expluatacii automobilja.]*

## **EVALUATION OF DYNAMIC COMPONENT WORK OF ICE**

**S.V. Gusakov, P.P. Oschepkov, I.V. Epifanov,  
V.A. Novikov**

Department of heating engineers and heat engines  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

Briefly the technique of assessing the impact of transient modes for comprehensive indicators on the toxicity of diesel or fuel efficiency, with respect to the NRTC test cycle for off-road equipment.

**Key words:** diesel, test cycle transient modes, integral performance, fuel economy and environmental performance.