

К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина, Ю.Л. Рапацкий

## РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ

*Определяется длительность впрыскивания топлива, обеспечивающая минимально возможную концентрацию токсичных соединений, в частности оксидов азота, в выхлопных газах дизелей при заданной частоте вращения коленчатого вала и нагрузке на двигатель. Основу решения составляют статистические модели, описывающие зависимости между параметрами дизелей.*

### Введение

В современных экономических условиях обеспечение конкурентоспособности продукции отечественного автомобилестроения на внутреннем и зарубежном рынках может быть достигнуто, в том числе, расширением модельного ряда и оснащением отдельных серий выпускаемых автомобилей экономичными малолитражными дизелями. Растущая во многих странах популярность дизелей объясняется не только их экономичностью, но и большей надежностью и высоким крутящим моментом по сравнению с бензиновыми двигателями одинакового рабочего объема [1].

Однако повсеместное использование дизелей создает экологические проблемы. Их отработавшие газы (ОГ), особенно для дизелей с большим (2 и более литров) рабочим объемом, устанавливаемых на сельскохозяйственную и дорожно-строительную технику, вызывают серьезные заболевания у животных и, в среднем на 25%, снижают урожайность растений [1]. Выбросы в атмосферу вызывают отравления у людей, иногда не сразу проявляющиеся и негативно влияющие на слизистую оболочку, кровеносные органы и нервную систему. В крупных городах на долю дизелей приходится до 60% от общего объема выбросов вредных веществ в атмосферу [1].

ОГ дизелей состоят из многих компонентов. К ним относятся: пары, дисперсные частицы и капли жидкости. Основными компонентами являются продукты полного (водяной пар, оксид четырехвалентного углерода  $\text{CO}_2$ ) и неполного (монооксид углерода  $\text{CO}$ , углеводороды  $\text{C}_n\text{H}_x$ , дисперсные твердые частицы, т.е. сажа) сгорания топлива, вещества, образующиеся из воздуха в результате термического синтеза при высоких температурах (оксиды азота  $\text{NO}_x$ ), а также сера и её соединения, альдегиды, продукты полимеризации и т.д.

Нормируемыми токсичными компонентами по действующим экологическим стандартам EURO-2, EURO-3 являются  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_x$  и твердые частицы. Определение концентрации этих компонентов в ОГ проводят по результатам специальных дорож-

ных или стендовых испытаний. Программа испытаний зависит от типа двигателя, но всегда предполагает его прогрев после пуска в режиме холостого хода в течение 40 с. Для двигателей грузовых автомобилей и автобусов программа включает их работу на 13 установленных режимах. Для двигателей легковых автомобилей и автомобилей небольшой грузоподъемности программа включает чередование переходных режимов (разгон-замедление). Измерения параметров производят непрерывно, их удельные значения, отнесенные к единице пройденного пути, или к средней мощности, сравнивают с допустимыми значениями.

Наиболее токсичными (около 45%) компонентами отработавших газов дизелей являются оксиды азота  $\text{NO}$  (80-90%) и  $\text{NO}_2$  (10-20%), далее обозначаемые как  $\text{NO}_x$ . Их концентрация определяется распределением топливно-воздушной смеси по цилиндрам дизеля, ее составом, моментом воспламенения, длительностью процесса впрыска топлива, а также режимными параметрами дизеля. Так, при максимальных нагрузках содержание  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания дизелей достигает 10 мг/л [2], однако при обогащении или обеднении смеси это значение резко снижается, в некоторых случаях приборы фиксируют только остатки компонента.

### Обзор литературы

Анализ современной научно-технической литературы показал, что большинство исследователей связывают главное направление снижения концентрации токсичных компонентов в ОГ дизелей с использованием новых конструкций камер сгорания или альтернативного топлива и различных присадок к нему, а также нейтрализаторов ОГ [3, 4]. Это требует совершенствования существующих технологий изготовления, а также способов получения дизельного топлива, что неминуемо приведет к увеличению их себестоимости и, следовательно, к снижению спроса на автомобили с дизелями.

По мнению некоторых ученых, токсичность дизелей, с учетом экономии топлива, может быть снижена за счет определения наилучших, с точки

зрения минимума содержания в ОГ токсичных компонентов, соотношений между углом опережения впрыскивания, давлением впрыска и его продолжительностью. Кроме того, целесообразно также оптимизировать рабочие процессы дизелей на базе моделей, отражающих зависимости между параметрами токсичности и показателями рабочих процессов [5, 11]. Например, в работе [6] строятся регрессионные уравнения, связывающие настраиваемый параметр  $y_i$  и режимные параметры (частоту вращения коленчатого вала, нагрузку и т.д.)  $x_i$ . Здесь  $\beta_i$  – весовые коэффициенты,  $\varepsilon_i$  – внешние возмущения.

$$y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_{i,t} + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_{i,t} x_{j,t} + \sum_{j=1}^n \beta_j x_{j,t}^2 + \varepsilon_i, \quad (1)$$

Для конкретного дизеля, детально рассмотренного в [6], выражение (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \text{CH}_i = & -15,2 \cdot x_{1,t} + 0,47 \cdot x_{2,t} + 90 \cdot x_{3,t} - 0,6 \cdot x_{1,t} x_{2,t}, \\ & + 81 \cdot x_{2,t} x_{3,t} + 27,5 \cdot x_{1,t}^2 - 12 \cdot x_{2,t}^2 - 196 \cdot x_{3,t}^2 - 2042 \end{aligned}, \quad (2)$$

где  $x_1$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ,  $x_2$  – нагрузка, %,  $x_3$  – длительность впрыскивания, с.

Аналогичные модели предлагаются в работе [7]. Функционирование исправного судового дизеля с точностью не ниже 90% описывается системой регрессионных уравнений:

$$\begin{cases} P_{i,1} = 0,2084 \cdot H - 0,004 \cdot n - 0,0044 \\ P_{i,2} = H - 0,5 \cdot n - 0,1 \cdot H^2 - 0,3 \cdot n^2 + 0,3 \cdot H \cdot n - 1,15, \\ P_z = 0,4795 \cdot H - 0,0265 \cdot n + 0,014 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $P_i$  – среднее индикаторное давление,  $P_z$  – максимальное давление сгорания,  $H$  – нагрузка,  $n$  – частота вращения коленчатого вала.

Указанные подходы имеют недостатки, основные из которых связаны с ограничением возможностей одновременной настройки (определения оптимальных значений) всех требуемых параметров с учетом зависимостей, существующих между ними. Это может привести к нежелательным последствиям. Например, давно известно, что резкое снижение концентрации оксидов азота в ОГ регулированием угла опережения впрыскивания топлива без контроля значений других параметров приводит к резкому увеличению концентрации углеводородов [8].

### Основная часть

Целью работы является определение длительности впрыскивания топлива, обеспечивающей минимально возможную концентрацию токсичных соединений в продуктах сгорания при заданной частоте вращения коленчатого вала и постоянной нагрузке на двигатель. Основу решения задачи со-

ставляют статистические модели, описывающие зависимости между концентрацией токсичных компонентов в продуктах сгорания дизелей, режимными параметрами и длительностью впрыскивания топлива.

Как показал анализ экспериментальных данных, в том числе приведенных в [6], для конкретной модели дизеля при заданных значениях давления впрыскивания и параметрах топливной аппаратуры снижение концентрации  $\text{NO}_x$  в ОГ может быть достигнуто регулированием длительности впрыскивания топлива  $\tau$ . Однако изменение длительности впрыскивания топлива вызывает изменение удельного эффективного расхода топлива ( $g_e$ ), мощности двигателя, количества дисперсных твердых частиц (*Smoke*) в отработавших газах и т.д. Это видно, например, на графиках функциональных зависимостей на рис. 1, 2, построенных в трехмерном пространстве координат  $\{\text{Smoke}, \tau, n\}$ ,  $\{g_e, \tau, n\}$  по данным работы [6].

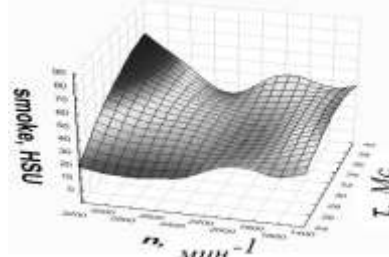


Рис.1. Зависимость  $\text{Smoke} = f_1(x)$

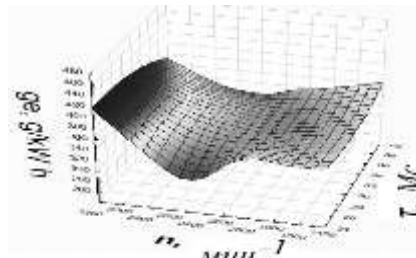


Рис.2. Зависимость  $g_e = f_2(x)$

Поэтому задачу нахождения минимума этих функций можно рассматривать как задачу многокритериальной оптимизации [10]:

$$f_1(x) \rightarrow \min_{x \in D}, f_2(x) \rightarrow \min_{x \in D}, \dots, f_m(x) \rightarrow \min_{x \in D}, \quad (4),$$

где  $m$  – число настраиваемых параметров,  $x_i = (n_i, \text{Mc}_i, \tau_i)^T$  – вектор параметров, характеризующих режим работы двигателя,  $D$  – множество возможных значений  $x_i$ .

Очевидно, что наилучшим решением задачи будет такой вектор  $x^*$ , для которого условия (4) выполняются одновременно для всех функций  $f_j(x)$ ,  $j = 1..m$ .

Каждая из представленных функций имеет минимум, соответствующий разным значениям вектора  $x$ . Однако на практике такое решение не может быть получено, поскольку целевые функции связаны с разными физическими величинами. Каждая функция достигает своего экстремума для одного значения  $x$ , и невозможно найти такое значение  $x^*$ , для которого условия (4) выполняются одновременно для всех целевых функций. Выход из ситуации заключается в поиске такого решения  $x^{**}$ , для которого обеспечивается рациональный компромисс заданных целей. Задача многокритериальной оптимизации сводится к типовой задаче с одним критерием.

Введем одну обобщенную цель, описываемую функцией вида

$$K = \sum_{j=1}^3 b_j f_j(x), \quad (5)$$

где  $b_j$  – коэффициенты, отражающие важность соответствующей целевой функции. Предполагается, что коэффициенты нормированы и удовлетворяют условию

$$\sum_{j=1}^3 b_j = 1.$$

В данном случае значение длительности впрыскивания топлива принимается единственным аргументом указанных целевых функций, а конкретные значения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала задаются.

В качестве меры токсичности дизеля в момент времени  $t$  принят вектор  $y_t = (CH_t, NOx_t, Smoke_t)^T$ , элементами которого являются концентрации соответствующих компонентов ОГ. Тогда каждая из целевых функций может быть представлена отклонением концентрации от заданных значений, соответствующих принятым экологическим стандартам.

Целевая функция (5) записывается в виде:

$$K = \sum_{j=1}^3 b_j \frac{|y_j - y_{jb}|}{y_{jb}} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $y_{jb}$  – предельно допустимое значение  $j$ -го элемента вектора  $y_t$ . Выражение (6) можно переписать в виде:

$$K = \sum_j b'_j c_j \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$c_j = \frac{|y_j - y_{jb}|}{y_{jb}}, \quad b'_j = \frac{b_j}{y_{jb}}.$$

Зависимость между вектором  $y_t$  и вектором режимных параметров в окрестностях рабочих то-

чек на установившихся режимах представляется как

$$y_t = A_0 + A_1 x_t + \omega_t, \quad (8)$$

что детально описано в [9]. Здесь  $\omega_t$  – вектор ошибок моделирования,

$$A_0 = (-1852 \quad 31,2 \quad -54,1)^T \text{ – вектор констант,}$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 7,79 & 0,082 & 60 \\ 0,06 & 0,0006 & 0,91 \\ 0,84 & 0,0003 & 0,86 \end{pmatrix} \text{ – матрица коэффициентов.}$$

тов.

Значения коэффициентов уравнения (6) задаются группой экспертов, исходя из уровня значимости целевых функций для конкретной модели дизеля с учетом действующих норм экологической безопасности. Переход от выражения (6) к выражению (7) при введении ограничений на параметр  $c_j$

позволяет найти оптимальное значение  $x_t$ , используя линейное программирование. Для функций, отраженных графиками рис. 1 – 2, получены значения длительности впрыска топлива, минимизирующие концентрацию оксидов азота в ОГ (рис. 3).

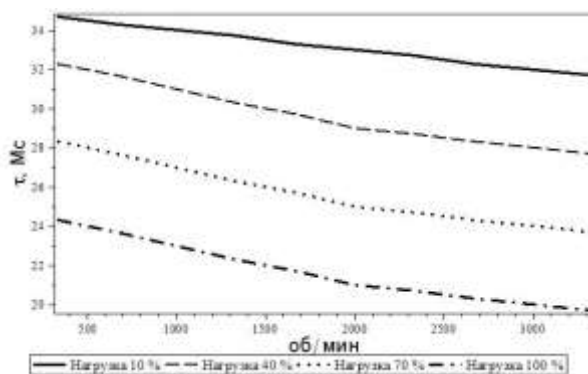


Рис.3. Значения длительности впрыскивания топлива  $\tau$ , минимизирующие концентрацию  $NO_x$  в ОГ при различных значениях оборотов коленчатого вала и нагрузки

Следует отметить, что эффективность предлагаемого подхода и его экономическая целесообразность существенно зависят от конструктивных параметров и режимов работы рассматриваемого дизеля и могут быть предметом дальнейших исследований.

#### Заключение

Рассмотренный подход позволяет обеспечить снижение концентрации оксидов азота в ОГ дизелей при одновременном обеспечении их топливной экономичности и мощности на основе определения оптимальных значений длительности впрыскивания топлива.

**Список литературы:**

1. Марков В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Макаров, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. - Изд. МГТУ им. Баумана, 2002 – 376 с. 2. Richrd D. Atkins “An Intodaction to Engine Testing and Development”. – Warrendale, PA 2009 – 282 p. 3. Босьяков, В.П. Методика разработки рекомендаций по оптимизации конструктивных и регулировочных параметров для снижения вредных выбросов с отработавшими газами двигателя / В.П. Босьяков и др. // Известия СПГАУ. Научный журнал / СПГАУ. – СПб., 2011. – №24. – С. 227–230. 4. Калинин В.Ф. Снижение токсичности выбросов дизельных двигателей путем применения электроадаптивной системы термостабилизации топлива / В.Ф. Калинин, А.В. Щегольков // Университет им. В.И. Вернадского. – 2008. – №3(13), Том 2. – С.173 – 179. 5. Win, Z. Investigation of diesel engine operating and injection system parameters for low noise, emissions and fuel consumption using Taguchi methods, Proceedings of the institute of mechanical engineers, / Win, Z., Gakkhar, R. P.; Jain, S. C.; Bhattacharya M. // Vol. 219, Part D: J. Automobile Engineering. – 2005. 6. Win Z. Parameter optimization of a diesel engine to reduce noise, fuel consumption, and exhaust emissions using response surface methodology / Win, Z., Gakkhar, R. P.; Jain, S. C.; Bhattacharya M. // Proc. IMechE Vol. 219 Part D: J. Automobile Engineering. – 2004. P.1181 – 1192. 7. Одинцов В.И. Диагностирование технического состояния дизелей по параметрам рабочих процессов / В.И. Одинцов, С.А. Кабышь // Вестник АГТУ, Сер.: Морская техника и технология. – 2012. – С.123 – 127. 8. Смайлис В.И. Современное состояние и новые проблемы экологии двигателестроения / В.И. Смайлис // Двигателестроение. – 1991. - №1. – С.3-6. 9. Первухина Е.Л. К вопросу совершенствования методики приемоиспытаний двигателей внутреннего сгорания / Е.Л. Первухина, К.Н. Осипов, Ю.Л. Рапацкий // Проблемы машиностроения и надежности машин, РАН, Рос-сия. – 2012. – № 6. – С. 89-96. 10. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкрато-

ва. – К.: BHV, 2007. 11. Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учеб. для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / А.С. Орлин, М.Г. Круглов и др. – М.: Машиностроение, 1985. — 456 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Markov V.A. Toksichnost' otrabotavshih gazov dizelej / V.A. Makarov, R.M. Bashirov, I.I. Gabitov. - Izd. MG TU im. Baumana, 2002 – 376 s. 2. Richrd D. Atkins “An Intodaction to Engine Testing and Development”. – Warrendale, PA 2009 – 282 p. 3. Bosjakov, V.P. Metodika razrabotki rekomendacij po optimizacii konstruktivnyh i regulirovochnyh parametrov dlja snizhenija vrednyh vybrosov s otrabotavshimi gazami dvigatelja / V.P. Bosjakov i dr. // Izvestija SPGAU. Nauchnyj zhurnal / SPGAU. – SPb., 2011. – №24. – S. 227–230. 4. Kalinin V.F. Snizhenie toksichnosti vybrosov dizejnyh dvigatelej putem primenenija jelektroadaptivnoj sistemy termostabilizacii topliva / V.F. Kalinin, A.V. Shegol'kov // Universitet im. V.I. Vernadskogo. – 2008. – №3(13), Tom 2. – S.173 – 179. 5. Win, Z. Investigation of diesel engine operating and injection system parameters for low noise, emissions and fuel consumption using Taguchi methods, Proceedings of the institute of mechanical engineers, / Win, Z., Gakkhar, R. P.; Jain, S. C.; Bhattacharya M. // Vol. 219, Part D: J. Automobile Engineering. – 2005. 6. Win Z. Parameter optimization of a diesel engine to reduce noise, fuel consumption, and exhaust emissions using response surface methodology / Win, Z., Gakkhar, R. P.; Jain, S. C.; Bhattacharya M. // Proc. IMechE Vol. 219 Part D: J. Automobile Engineering. – 2004. P.1181 – 1192. 7. Odincov V.I. Diagnostirovanie tehničeskogo sostojanija dizelej po parametram rabochih processov / V.I. Odincov, S.A. Kabys'h' // Vestnik AGTU, Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. – 2012. – S.123 – 127. 8. Smajlis V.I. Sovremennoe sostojanie i novye problemy jekologij dvigatelestroenija / V.I. Smajlis // Dvigatelistroenie. – 1991. - №1. – S.3-6. 9. Pervuhina E.L. K voprosu sovershenstvovanija metodiki priemosdatochnyh is-pytanij dvigatelej vnutrennego sgoranija / E.L. Pervuhina, K.N. Osipov, Ju.L. Rapackij // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin, RAN, Ros-sija. – 2012. – № 6. – S. 89-96. 10. Zgurovs'kij M.Z., Pankratova N.D. Osnovi sistemnogo analizu. / M.Z. Zgurovs'kij, N.D. Pankratova. – K.: BHV, 2007. 11. Orlin A.S. Dvigateli vnutrennego sgoranija: Sistemy porshnevnyh i kombinirovannyh dvigatelej. Ucheb. dlja vtuzov po special'nosti «Dvigateli vnutrennego sgoranija» / A.S. Orlin, M.G. Kruglov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1985. — 456 s.

Поступила в редакцию 04.07.2013

**Осипов Константин Николаевич** – канд. техн. наук, старший преподаватель каф. «Автоматизации технологических процессов и производств» Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина.

**Первухина Елена Львовна** – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина.

**Рапацкий Юрий Леонидович** – канд. техн. наук, доцент, зам. декана факультета «Технологии автоматизации машино-, приборостроения и транспорта» Севастопольского национального технического университета, Украина.

**РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ УПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТОКСИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ У ПРОДУКТАХ ЗГОРЯННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВЗ**

**К.М. Осіпов, О.Л. Первухіна, Ю.Л. Рапацький**

Визначається тривалість впорскування палива, що забезпечує мінімально можливу концентрацію токсичних з'єднань, зокрема оксидів азоту, у вихлопних газах дизелів при заданій частоті обертання колінчастого вала та навантаженні на двигун. Основу розв'язання становлять статистичні моделі, що описують залежності між параметрами дизелів.

**CALCULATION OF TIMING OF FUEL INJECTION FOR REDUCING THE CONCENTRATION OF TOXIC COMPONENTS IN DIESEL COMBUSTION**

**K. N. Osipov, E. L. Pervukhina, and Yu. L. Rapatskiy**

The paper proposed the method to reduce toxicity of diesel engine by optimization of the fuel injection timing. The main idea is based on statistical models which describe dependencies between parameters of diesel.