

Львов Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина, uni@snu.edu.ua, (0642) 34-18-36.

### КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ САЖОВОГО ФІЛЬТРУ ПО ПОКАЗНИКАМ ЛІЧИЛЬНОЇ, ПОВЕРХНЕВОЇ ТА МАСОВОЇ КОНЦЕНТРАЦІЙ ДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК

*А.П. Полів'янчук, С.О. Львов*

Запропоновано методику комплексної оцінки ефективності роботи сажового фільтру дизеля за трьома критеріями: лічильної, поверхневої та масової концентрацій твердих частинок з урахуванням їх дисперсного складу. Наведено результати оцінки ефективності сажового фільтру дизеля вантажного автомобіля з використанням запропонованої методики.

### A COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE PARTICULATE MATTER FILTER IN TERMS OF THE COUNTING, SURFACE AND MASS CONCENTRATIONS OF PARTICULATE MATTER

*A.P. Polivianchuk, S.A. Lvov*

The technique of comprehensive performance of the diesel's particulate matter filter according to three criteria: the counting, surface and mass concentrations of particulate matter in view of their dispersion composition is offered. The results of the evaluation of the effectiveness of the diesel particulate matter filter for diesel truck using the proposed methodology is presented.

УДК 621.43.016

*В.С. Морозова, В.С. Гун, В.Л. Поляцко*

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ САЖИ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СГОРАНИЯ

*Предложен метод определения содержания сажи в отработавших газах (ОГ) как инструмент снижения дымности дизеля. Показана возможность оценить влияние конструктивных и эксплуатационных параметров дизеля и регулятора на содержание сажи в ОГ, и, соответственно, скорректировать цикловую подачу на установившихся и переходных режимах. При этом определяется в каждом конкретном случае (цикле) минимальный коэффициент избытка воздуха, при котором дымность ОГ не выходит за нормативные пределы. Соответствующая математическая модель с достаточной точностью позволяет оценить влияние конструктивных параметров электронного регулятора и дизеля на содержания сажи в ОГ в переходном процессе при увеличении или уменьшении нагрузки еще на стадии проектирования и доводки. Приведены данные экспериментальных исследований.*

#### **Введение**

Эффективность процесса сгорания характеризуется полнотой использования теплоты, введенной с топливом. Этот процесс оценивается коэффициентом эффективности сгорания  $\xi$ , который представляет собой отношение теплоты  $Q_i$ , потраченной на изменение внутренней энергии рабочего тела и совершения полезной работы, ко всей теплоте  $Q$ , вносимой топливом. Теплота  $Q$  частично теряется из-за неполного сгорания, тогда выделяемая теплота  $Q_{\text{выд}} = \delta \cdot Q$ , где  $\delta$  - коэффициент выделения теплоты. Неполнота сгорания определяет токсичность ОГ (за исключением оксидов азота) и интенсивность образования сажи из-за неполного сгорания углерода. Часть выделившейся теплоты  $Q_{\text{выд}}$  теряется вследствие диссоциации продуктов сгорания и теплообмена со стенками. Эти потери оцениваются коэффициентом использования теплоты  $\Psi$ , т.е.  $Q_i = \Psi Q_{\text{выд}} = \delta \Psi Q$ , а  $\zeta = \delta \Psi$ . Особенность предлагаемого алгоритма состоит в том, что он позволяет без записи индикаторных диаграмм оценивать параметры рабочего цикла дизеля, характеризующие его экологические и экономические показатели на переходных и установившихся режимах работы. Для подтверждения теории были проведены испытания электронной системы автоматического регулирования (САРЧ) подачи топлива в зависимости от заданной величины частоты вращения коленчатого вала и изменения нагрузки.

Электронная САРЧ была установлена на тракторе Т-170.

**Теоретическое обоснование расчетного метода**

Математическая модель, описанная в статье, позволяет определить содержание сажи в ОГ, связь коэффициента эффективности сгорания дизеля  $\xi$  с коэффициентом наполнения  $\eta_v$  давлением и температурой наддувочного воздуха  $P_k, T_k$  и ко-

эффицентом избытка воздуха  $\alpha$ . Это дает возможность управлять топливopодачей по критерию содержания сажи. Алгоритм, заложенный, например, в микроконтроллер электронного регулятора, позволяет по показаниям  $P_k, T_k, P_0, T_0, G_T, G_e, P_{oz}, T_{oz}$  сенсоров определить содержание сажи в ОГ для выбранной цикловой подачи, а также параметры кинетики сгорания  $m, \xi, \varphi_z$ .

Алгоритм определения содержания сажи в ОГ базируется на теории рабочих процессов ДВС Вибе И.И. и разработан на основе экспериментальных и теоретических исследований, проведенных на кафедре ДВС ЮУрГУ профессором Буновым В.М. [1].

Содержание сажи в ОГ можно определить, если несгоревшее количество углерода отнести к объему ОГ:

$$D = \frac{1000 \cdot C \cdot \rho_{oz} \cdot \alpha_m}{\alpha \cdot L_o + 1}, \quad (1)$$

где  $D$  - содержание сажи в ОГ, г/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ог}$  - плотность отработанных газов, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  - массовая доля углерода в топливе;  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха;  $L_o$  - теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива;  $\alpha_m$  - массовая доля углерода, пошедшая при сгорании в сажу ОГ.

$$\alpha_m = 1 - \frac{CO_2 + CO}{CO_{2пол}}, \quad (2)$$

где  $CO_2$  и  $CO$  - действительное содержание, соответственно, углекислого газа и окиси углерода в ОГ в % по объему;  $CO_{2пол}$  - максимальное содержание углекислого газа в ОГ, которое имело бы место при полном сгорании углерода в % по объему.

Многочисленные экспериментальные данные, полученные при анализе ОГ тракторных дизелей с наддувом и без наддува с камерами сгорания ЦНИДИ и MAN, показали, что содержание  $CO_2, CO, CO_{2пол}$  определяется зависимостями:

$$CO_2 = \frac{0,86 \cdot \sqrt{m+1} + 13,6}{\alpha - 0,032}, \quad (3)$$

$$CO = \frac{0,136}{\eta_v (\alpha^2 + m)}, \quad (4)$$

$$CO_{2мно} = \frac{7,166}{0,4969 \cdot \alpha - 0,0322}, \quad (5)$$

где  $m$  - показатель характера сгорания, определяющий отвлеченное время, при котором наблюдается максимум скорости сгорания, вычисляется с

использованием структурной формулы Л.К. Зайцева [2]:

$$m = A_1 \cdot e^{-7,125 \sigma_\tau}, \quad (6)$$

где  $A_1$  - коэффициент, зависящий от способа смесеобразования (1,0 - для объемно-пленочного, 1,4 - для пленочного, 0,9 - для объемного);  $\sigma_\tau$  - доля топлива, поданного в цилиндр за период задержки самовоспламенения, определяемая по относительным интегральным характеристикам впрыскивания, полученным на безмоторном стенде.

$$\sigma_\tau = 1,205 \cdot \left( \frac{\varphi_i}{\varphi_{впр}} \right)^{1,24}, \quad (7)$$

где  $\varphi_i$  - период задержки самовоспламенения, [град/ п.к.в.];  $\varphi_{впр}$  - продолжительность впрыскивания топлива, [град. п.к.в.].

Период задержки самовоспламенения определяем для двигателей с объемно-пленочным смесеобразованием в интервале значений

$d_c / D_u = (1,67 \dots 5,2) \cdot 10^{-3}$  по формуле С.А. Калашникова

$$\varphi_i = \frac{6 \cdot n \cdot 3,76 \cdot e^{(323 \cdot d_c / D_u)} \cdot 10^{-3}}{\left( \frac{T_k}{T_0} \right)^{1,15} \cdot \left( \frac{P_k}{P_0} \right)^{0,67} \cdot \left( \frac{d_c}{D_u} \right)^{0,7} \cdot \varepsilon_B^{1,05}} \times \frac{1}{\varepsilon \cdot (\text{ЦЧ})^{0,9} \cdot \left( \frac{C_m}{C_K} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{V_{впр} \cdot G_u}{C_K \cdot V_a \cdot \rho_0} \right)^{0,11}}, \quad (8)$$

где  $d_c$  - диаметр сопла распылителя, м;  $D_u$  - диаметр цилиндра, м;  $P_k$  - давление воздуха во впускном коллекторе, МПа;  $T_k$  - температура воздуха во впускном коллекторе, К;  $P_0$  - давление окружающей среды, МПа;  $T_0$  - температура окружающей среды, °К;  $V_0$  - полный объем цилиндра, м<sup>3</sup>;  $G_u$  - цикловая подача топлива, кг/цикл; ЦЧ - цетановое число;  $C_K$  - скорость звука в воздухе, м/с;  $C_m$  - средняя скорость звука, м/с;  $V_{впр}$  - средняя скорость впрыскивания топлива, м/с;  $\rho_0$  - плотность воздуха при давлении и температуре окружающей среды, кг/ м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  - степень сжатия;  $\varepsilon_B$  - геометрическая степень сжатия.

Для определения средней скорости впрыскивания используем формулу Свиридова Ю.Б.:

$$V_{впр} = \frac{V_u \cdot 6 \cdot n_{к.с.}}{\mu \cdot f_c \cdot \varphi_{впр}}, \quad (9)$$

где  $n_{к.с.}$  - частота вращения кулачкового вала топливного насоса, мин-1;  $V_u$  - объемная цикловая по-

дача, м<sup>3</sup>/цикл;  $\varphi_{впр}$  - продолжительность впрыскивания топлива [град/ п.к.в.];  $\mu_{fc}$  - эффективная площадь сопловых отверстий, м<sup>3</sup>.

Применительно к двигателю 4 ЧН 15.0/20.5 (Д-160) на основании экспериментальных данных

$$\varphi_{впр} = 120 \cdot G_{ци} + 0,995 \cdot 10^{-2} \cdot n - K, \quad (10)$$

где

$$K = 242,63 \cdot f_{\Sigma C}^4 \cdot 10^{24} - 871,88 \cdot f_{\Sigma C}^3 + 1165,6 \cdot f_{\Sigma C}^2 \cdot 10^{12} - 692,38 \cdot f_{\Sigma C} \cdot 10^6 + 150,41$$

$f_{\Sigma C}$  - суммарная площадь сопловых отверстий, м<sup>2</sup>.

Зная долю углерода, пошедшую в сажу  $\alpha_m$ , можно определить количество сажи в ОГ [3].

$$D = 1000 \cdot C \cdot \alpha_m \cdot G_T / (30 \cdot n), \text{ г/цикл.} \quad (11)$$

Результаты расчетов содержания сажи D для дизеля Д-160 при его работе на переходном режиме приведены на рис. 1.

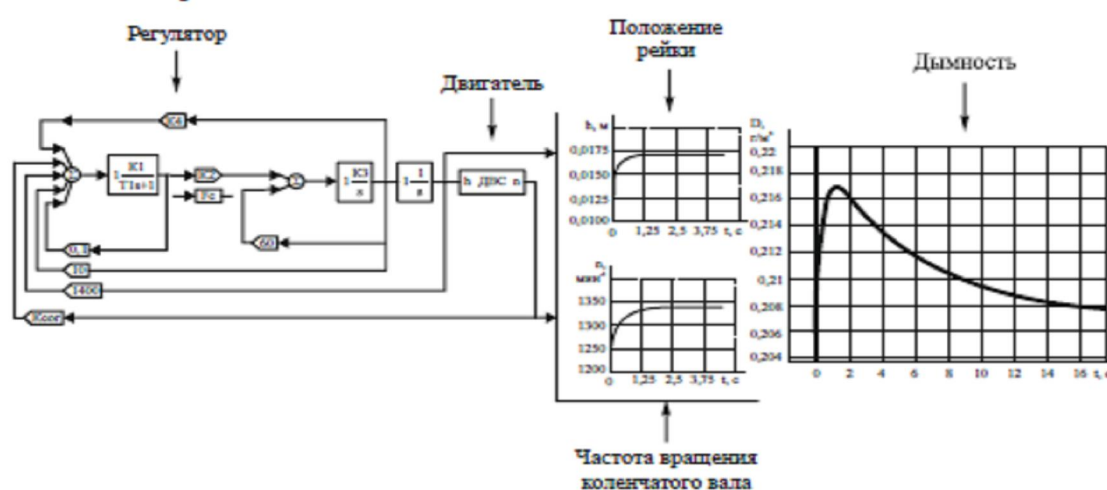


Рис. 1. Изменение содержания сажи D в отработавших газах дизеля Д-160 в переходном режиме работы

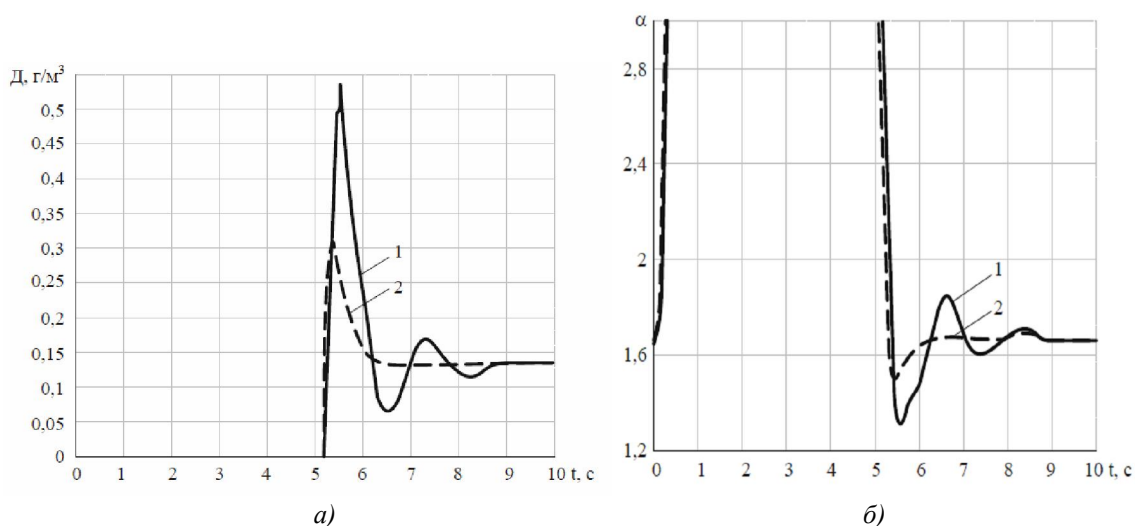


Рис. 2. Зависимости: а) коэффициента избытка воздуха от времени переходного процесса при изменении момента нагрузки от номинального значения ( $M_{ном}$ ) до нуля и от нуля до номинального (1 – механический регулятор, 2 – базовый электронный регулятор); б) содержания сажи в ОГ дизеля от времени переходного процесса при изменении момента нагрузки от номинального значения до нуля и от нуля до  $M_{ном}$ ; 1 – механический регулятор; 2 – базовый электронный регулятор

Были рассчитаны и измерены экологические показатели. Как видно из графиков (рис. 2) переходный процесс дизеля с механическим регулято-

ром сопровождается большими колебаниями коэффициента избытка воздуха, что приводит к увеличению выброса сажи в ОГ.

Применение электронного регулятора позволяет изменять длительность переходного процесса, а также улучшить экологические показатели. Для дизеля с опытным образцом электронного регулятора при резком изменении нагрузки, по сравнению с механическим, содержание сажи в отработавших газах и удельный расход топлива уменьшились, соответственно, на 0,11 г/м<sup>3</sup> и 8 г/кВтч. Это объясняется большей точностью формирования цикловой подачи топлива.

Содержание сажи в начальной и конечной точках переходного процесса совпадает с экспериментальными данными.

#### **Выводы**

Предложенный метод определения содержания сажи в ОГ рассмотрен как инструмент снижения дымности дизеля, что дает возможность, в частности, скорректировать цикловую подачу на установившихся и переходных режимах его работы, а также анализировать влияние конструктивных и эксплуатационных параметров на выходные параметры дизеля. Теоретически определяется в каждом конкретном случае (цикле) минимальный коэффициент избытка воздуха, при котором дымность ОГ не выходит за нормативные пределы. Соответствующий алгоритм определения сажи в ОГ

дает возможность программирования микроконтроллера.

#### **Список литературы:**

1. Бунов В.М. Повышение эффективности процесса сгорания в тракторных дизелях совершенствованием элементов систем впуска и управления топливоподачей: дис.... докт. техн. наук /Бунова В.М. - М.:МГТУ, 1999. – 289 с.
2. Зайцев Л.К. Исследование рабочего цикла при форсировании тракторного дизеля с использованием метода математического моделирования: дис... канд. техн. наук / Л.К. Зайцева - Челябинск.:ЧПИ, 1978. – 190 с.
3. Гун В.С. Улучшение динамики и экологических показателей переходных процессов дизеля с электронным управлением подачи топлива: дис... канд. техн. наук / Гун В.С. - Челябинск.:ЮУрГУ, 2009. – 218 с.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Bunov V.M. Povyshenie jeffektivnosti processa sgoranija v traktornyh dizeljah sovershenstvovaniem jelementov sistem vpuska i upravlenija toplivopodachej: dis.... dokt. tehn. nauk /Bunova V.M. - M.:MGTU, 1999. – 289 s.
2. Zajcev L.K. Issledovanie rabocheho cikla pri forsirovanii traktornogo dizelja s ispol'zovaniem metoda matematicheskogo modelirovanija: dis... kand. tehn. nauk / L.K. Zajceva - Cheljabinsk.:ChPI, 1978. – 190 s.
3. Gun V.S. Uluchshenie dinamiki i jekologicheskikh pokazatelej perehodnyh processov dizelja s jelektronnym upravleniem podachi topliva: dis... kand. tehn. nauk / Gun V.S. - Cheljabinsk.:JuUrGU, 2009. – 218 s.

*Поступила в редакцию 31.05.2013*

**Морозова Вера Сергеевна** – доктор техн. наук, профессор кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Южно-Уральского государственного университета «ЮУрГУ», Челябинск, Россия, e-mail: morozovavs@usu.ac.ru.

**Гун Валентина Сергеевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники Южно-Уральского государственного университета «ЮУрГУ», Челябинск, Россия, e-mail: vgoun@mail.ru.

**Поляцко Владимир Леонидович** – ассистент кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Южно-Уральского государственного университета «ЮУрГУ», Челябинск, Россия, e-mail: polyacko\_2002@list.ru.

### **ПРОГНОЗУВАННЯ ВМІСТУ САЖІ У ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ НА БАЗІ ПОЛОЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗГОРЯННЯ**

**В.С. Морозова, В.С. Гун, В.Л. Поляцко**

Запропонований метод визначення вмісту сажі у ВГ розглянутий як інструмент зниження димності дизелі і дає можливість оцінити вміст сажі у ВГ і скоригувати циклову подачу на сталих і перехідних режимах роботи. Розроблена методика визначення вмісту сажі у ВГ дозволяє аналізувати вплив конструктивних і експлуатаційних параметрів на вихідні параметри дизеля. Теоретично визначається в кожному конкретному випадку (циклі) мінімальний коефіцієнт надлишку повітря, при якому димність ВГ не виходить за нормативні межі. Таким чином, розроблена математична модель з достатньою точністю дозволяє оцінити вплив конструктивних параметрів електронного регулятора на параметри дизеля в перехідному процесі ще на стадії проектування і доведення.

### **FORECASTING OF THE CONTENT OF SOOT IN EXHAUST GASES OF THE DIESEL ON THE BASIS OF PROVISIONS BY DETERMINATION OF EFFICIENCY OF PROCESS OF COMBUSTION**

**V.S. Morozova, V.S. Goun, V.L. Polyacko**

The proposed method for the determination of the soot content IN exhaust gas is considered as a tool to reduce the opacity of diesel and an opportunity to assess the content of soot in the exhaust and adjust the cyclic pitch on the steady-state and transient operating conditions. The method of determination of the soot content in exhaust gas allows you to analyze the impact of design and operational parameters on the output parameters of a diesel engine. Theoretically determined in each case (cycle) the minimum excess air ratio at which the exhaust gas smoke is within regulatory limits. Thus, the mathematical model with sufficient accuracy to evaluate the influence of design parameters on the electronic control diesel engine options in the transition process from the design stage and finishing was developed.