

$$\varphi_2 \approx (T)^{-1,58} (\alpha) \cdot (n) \cdot (V/n), \quad (3)$$

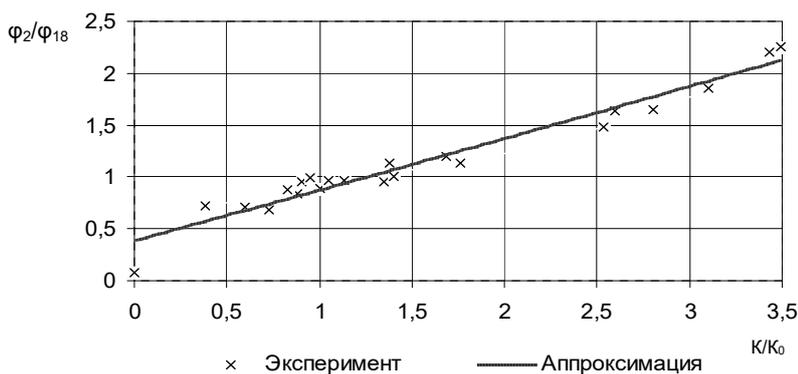


Рис. 3. Зависимость относительного угла выгорания во второй фазе сгорания от безразмерного комплекса  $K/K_0$ .

Представлен безразмерный комплекс, включающий в себя параметры  $(\alpha, T, V, n)$  в расчетном и исследуемом режимах.

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_{18}} \approx \frac{((T)^{-1,58} (\alpha)(V/n))}{((T_0)^{-1,58} (\alpha_0)(V_0/n_0))} = K/K_0, \quad (4)$$

Определив и проанализировав (рис. 3) характер зависимости относительного угла выгорания во второй фазе сгорания от  $K/K_0$ , прослеживается четкая линейная аппроксимирующая зависимость. Следовательно, формула для аппроксимации параметра  $\varphi_2$  приобретает вид:

$$\varphi_2 = \left( 0,31487 \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1,58} \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) \left( \frac{V}{V_0} \right) \left( \frac{n_0}{n} \right) + 0,63778 \right) + \varphi_{18}, \quad (5)$$

Предлагаемая математическая модель позволила провести ряд расчетов и разработать алгоритм [1] по количественной оценке влияния режимных и регулировочных факторов рабочего процесса газового двигателя 8ГЧ12/12.

#### Литература :

1. Николаенко А.В., Хакимов Р.Т. Математическое моделирование и расчет рабочего процесса газовой модификации дизеля // Сб. науч. тр. МНТК «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей» – Санкт-Петербург: СПбГАУ, 2006. С. 363 – 387.
2. Новичков М.Ю. Совершенствования рабочего процесса газодизеля // Автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.04.02 – Санкт-Петербург, 2004. – 16с.
3. Фучкин С.В., Алексеевский Д.А., Пономарев А.В., Соколов М.Г., Экономические, экологические и прочностные характеристики ДВС при работе на природном газе. // труды III МНПК «Экологическая безопасность автотранспортного комплекса» – Санкт-Петербург: МАНЭБ, 2005. С. 122 – 127.

### ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВНЕШНЕЙ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ТОКСИЧНОСТЬ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

**Марков В.А., Шлёнов М.И., Полухин Е. Е., Шатров В.И.**

(МГТУ им. Н.Э. Баумана),

**Поздняков Е.Ф.** (ОАО «НЗТА»),

**Фурман В.В.** (ППП «Дизельавтоматика», г. Саратов)

Одним из эффективных методов снижения токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей является оптимизация формы внешней скоростной характеристики

(ВСХ). Проблеме формирования ВСХ в транспортных дизелях посвящено ряд исследований [1,2,3], однако в них недостаточное внимание уделено оценке влияния формы ВСХ на токсичность ОГ.

ВСХ ограничивает максимальную подачу топлива в эксплуатационном диапазоне скоростных режимов. При этом на участке коррекции подача топлива ограничивается заданными мощностными показателями, а на участке отрицательной коррекции – допустимым уровнем дымности ОГ [4].

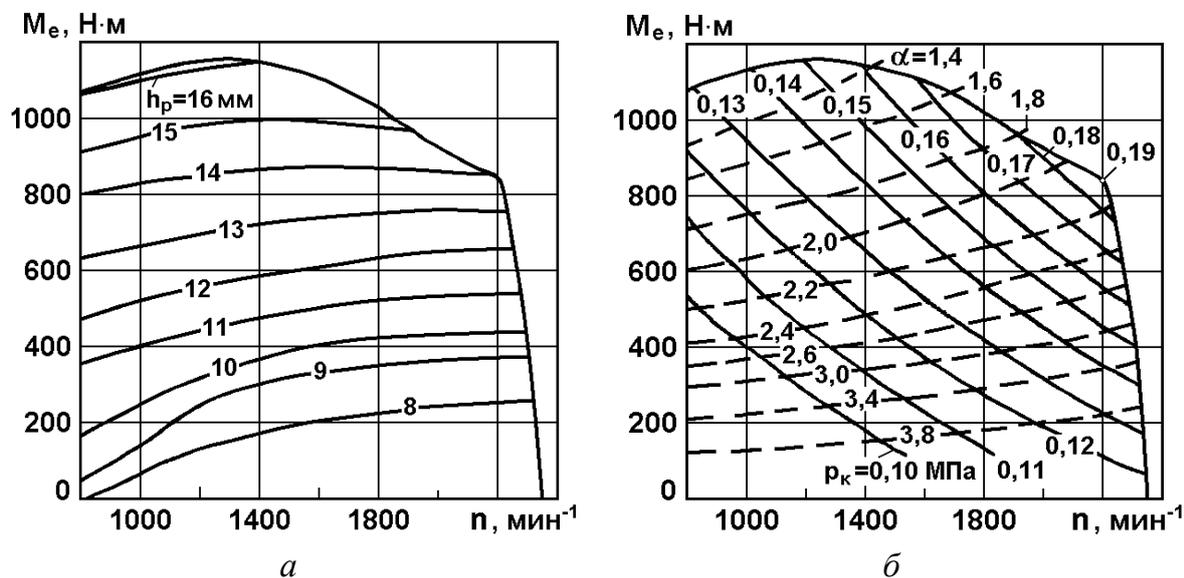


Рис. 1. Многопараметровые характеристики дизеля типа КамАЗ-740: а - положения  $h_p$  рейки ГНВД; б - давления наддува  $p_k$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ .

Наибольшее влияние на токсичность ОГ оказывает участок отрицательной коррекции ВСХ, характеризующийся наименьшими значениями коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (рис.1) [5]. Поэтому на этом участке целесообразно уменьшать подачу топлива при снижении частоты вращения дизеля. При этом диапазон корректирования топливоподачи на участке отрицательной коррекции определяется коэффициентом корректирования  $K_{Me\text{ отр}} = M_{e\text{ n min}} / M_{e\text{ ном}}$ .

Форма ВСХ оказывает значительное влияние на динамические качества дизеля, показатели топливной экономичности, дымности и токсичность ОГ дизеля. Это обусловлено тем, что в переходных процессах наброса нагрузки и разгона дизеля форма этой характеристики определяет закон изменения подачи топлива, и, как следствие, интенсивность изменения параметров дизеля в переходном процессе.

Оценка влияния формы ВСХ на показатели токсичности ОГ дизеля в переходных процессах проведена с использованием разработанной математической модели системы автоматического регулирования (САР) комбинированного двигателя. В разработанной модели дифференциальные уравнения наиболее значимых элементов дизеля с турбонаддувом используются в следующем виде [4,5]:

- поршневой части двигателя

$$J_d d\omega_d / dt = M_d - M_c ; \tag{1}$$

- турбокомпрессор

$$J_T d\omega_T / dt = M_T - M_K ; \tag{2}$$

- впускной трубопровод

$$[V_{вп} / (R_B T_K)] dp_K / dt = G_K - G_d ; \tag{3}$$

- выпускной трубопровод  
 $[V_{\text{вып}} / (R_{\Gamma} T_{\Gamma})] dp_{\Gamma} / dt = G_{\Gamma} - G_{\Gamma} ,$  (4)

где  $J_{\text{д}}$  и  $J_{\text{т}}$  – моменты инерции валов дизеля с потребителем и турбокомпрессора соответственно;  $\omega_{\text{д}}$  и  $\omega_{\text{т}}$  – частоты вращения валов дизеля и турбокомпрессора;  $M_{\text{д}}$ ,  $M_{\text{с}}$ ,  $M_{\text{т}}$ ,  $M_{\text{к}}$  – моменты: крутящий (эффективный) дизеля, сопротивления потребителя, развиваемый турбиной, потребляемый компрессором;  $V_{\text{вп}}$  и  $V_{\text{вып}}$  – объемы впускного и выпускного трубопроводов;  $p_{\text{к}}$  и  $p_{\text{т}}$  – давления наддувочного воздуха на выходе из компрессора и ОГ на входе в турбину;  $R_{\text{в}}$  и  $R_{\text{г}}$  – газовые постоянные наддувочного воздуха и ОГ;  $T_{\text{в}}$  и  $T_{\text{г}}$  – температуры наддувочного воздуха и ОГ;  $G_{\text{д}}$ ,  $G_{\text{к}}$ ,  $G_{\text{г}}$ ,  $G_{\text{т}}$  – расходы воздуха через двигатель и компрессор, газов через двигатель и турбину соответственно. Момент сопротивления потребителя определялся в виде [6]

$$M_{\text{с}} = k_{\text{N}} \cdot \omega_{\text{д}}^2.$$

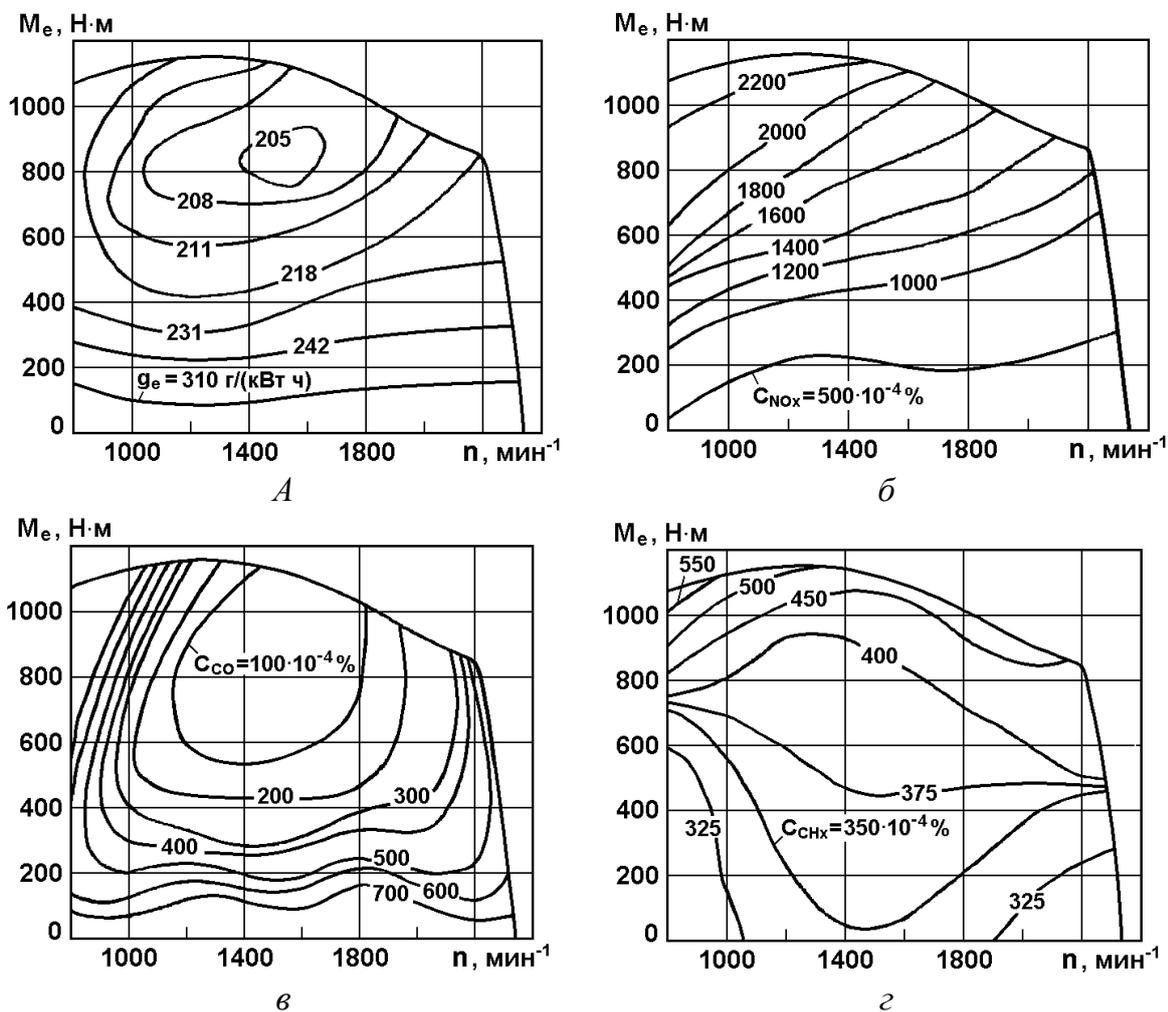


Рис. 2. Многопараметровые характеристики дизеля типа КамАЗ-740: *a* - удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ ; *б* - содержания в ОГ оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$ ; *в* - содержания в ОГ монооксида углерода  $C_{\text{CO}}$ ; *г* - содержания в ОГ несгоревших углеводородов  $C_{\text{СНх}}$ .

При расчетных исследованиях использованы функциональные зависимости для концентраций в ОГ оксидов азота, монооксида углерода, углеводородов и дымности ОГ:

$$\begin{aligned} C_{\text{NOx}} &= f(\omega_{\text{д}}, h_{\text{р}}, p_{\text{к}}); & C_{\text{CO}} &= f(\omega_{\text{д}}, h_{\text{р}}, p_{\text{к}}); \\ C_{\text{СНх}} &= f(\omega_{\text{д}}, h_{\text{р}}, p_{\text{к}}); & K_{\text{х}} &= f(\omega_{\text{д}}, h_{\text{р}}, p_{\text{к}}). \end{aligned}$$

Для определения этих функциональных зависимостей, а также функциональных зависимостей для параметров, входящих в правые части уравнений (1)...(4) исследуемого дизеля типа КамаАЗ-740 была разработана программа аппроксимации экспериментальных данных полиномиальными зависимостями, написанная на языке FORTRAN и использующая метод наименьших квадратов. Программа рассчитывает коэффициенты полинома, аппроксимирующего заданный массив исходных точек. Этот массив точек определялся с использованием экспериментальных данных по дизелю типа КамаАЗ-740, представленных на рис. 1 и 2 [4].

Требуемая точность аппроксимации экспериментальных данных достигалась подбором степени полиномов. В частности, для описания функциональной зависимости момента двигателя  $M_e$  выбран полином второго порядка, а для описания функциональной зависимости расхода газов через двигатель  $G_T$  – полином третьего порядка:

$$M_d(\omega_d, p_k, h_p) = -990,89 + 2,2746 \omega_d + 5902,6 p_k + 49493,0 h_p - 2,8145 \omega_d p_k - 241,14 \omega_d h_p + 592430,0 p_k h_p + 0,0014412 \omega_d^2 - 34605,0 p_k^2 + 95432,0 h_p^2;$$

$$G_T(\omega_d, p_T, p_k) = -120,79 + 4,8654 \omega_d - 6197,0 p_T + 3053,4 p_k + 209,37 \omega_d p_T - 300,07 \omega_d p_k - 79330,0 p_T p_k + 0,022399 \omega_d^2 - 26051,0 p_T^2 + 202690,0 p_k^2 + 2293,0 \omega_d p_T p_k + 0,0000014475 \omega_d^3 - 1131500,0 p_T^3 + 1089900,0 p_k^3 + 0,84965 \omega_d^2 p_T - 1,0031 \omega_d^2 p_k - 2952,6 \omega_d p_T^2 + 6329900,0 p_T^2 p_k + 1230,4 \omega_d p_k^2 - 6734000,0 p_T p_k^2.$$

Верификация результатов расчетов, полученных с помощью данной программы, проводилась в программе MathCad. На рис. 3 приведены результаты аппроксимации полиномов  $M_e$  и  $G_T$ , визуализированные в программе MathCad.

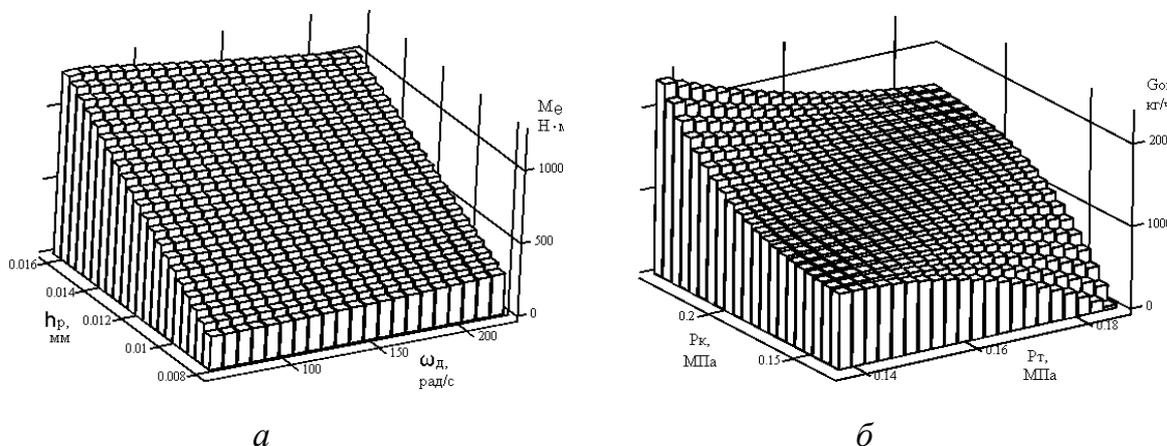


Рис. 3. Аппроксимация статических характеристик дизеля типа КамаАЗ-740: *а* - зависимость крутящего момента двигателя  $M_e$  от его частоты вращения  $\omega_d$  и положения рейки топливного насоса  $h_p$  при давлении наддува  $p_k=0,15$  МПа; *б* - зависимость расхода ОГ  $G_{OГ}$  дизеля от его частоты вращения  $\omega_d$  и давления наддува  $p_k$  при частоте вращения  $\omega_d=230,3$  с<sup>-1</sup>.

Математическая модель включает модель электронного регулятора частоты вращения, вырабатывающего управляющее воздействие вида:

$$U_{упр} \omega = k_{П} \Delta \omega_d + k_{И} \int \Delta \omega_d dt + k_{Д} d\Delta \omega_d / dt,$$

где  $k_{П}$ ,  $k_{И}$ ,  $k_{Д}$  – коэффициенты ПИД-закона регулирования;  $\Delta \omega_d = \omega_{дном} - \omega_d$  – ошибка регулирования;  $\omega_{дном} = 230,3$  с<sup>-1</sup> – номинальное значение частоты вращения,  $\omega_d$  – ее текущее значение.

Исполнительный механизм (ИМ) регулятора описан уравнением

$$T_{\text{ИМ}} \frac{dh_p}{dt} + h_p = k_{\text{ИМ}} U_{\text{упр}} \omega,$$

где  $T_{\text{ИМ}}$  – постоянная времени ИМ;  $k_{\text{ИМ}}$  – его коэффициент усиления.

Для расчета переходных процессов была разработана программа, написанная на языке FORTRAN и позволяющая решать описанную систему дифференциальных уравнений САР.

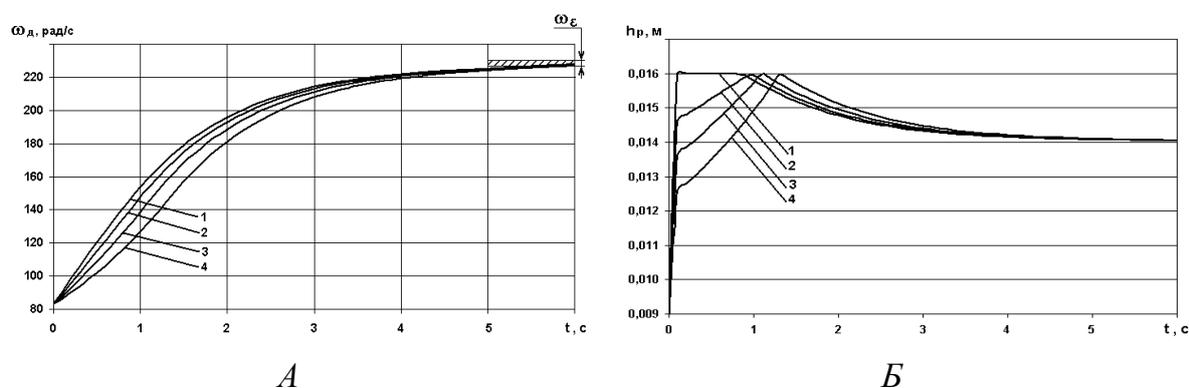


Рис. 4. Изменение параметров дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе его разгона: *а* - частоты вращения дизеля  $\omega_d$ ; *б* - положения дозирующей рейки ТНВД  $h_p$ ; 1-4 – варианты наклона участка отрицательной коррекции.

С использованием разработанных моделей проведено исследование влияния формы ВСХ на показатели дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе разгона с режима с  $h_p=9,5$  мм при  $n=800$  мин<sup>-1</sup> на режим с  $h_p=14,0$  мм при  $n=2200$  мин<sup>-1</sup>. При расчетных исследованиях оценивалось влияние наклона участка отрицательной коррекции ВСХ (коэффициента корректирования  $K_{\text{Ме отр}} = M_{e n \text{ min}} / M_{e \text{ ном}}$ ) на динамические качества дизеля, показатели дымности и токсичность ОГ дизеля.

Исследовались четыре варианта наклона участка отрицательной коррекции, в каждом из которых на режиме максимального крутящего момента при  $n=1400$  мин<sup>-1</sup> рейка ТНВД занимала положение  $h_p=16$  мм, а на минимальном скоростном режиме при  $n=800$  мин<sup>-1</sup> максимальное положение рейки составляло:

1.  $h_p=16,0$  мм ( $K_{\text{Ме отр}}=1050/850=1,24$ );
2.  $h_p=14,6$  мм ( $K_{\text{Ме отр}}=850/850=1,00$ );
3.  $h_p=13,6$  мм ( $K_{\text{Ме отр}}=700/850=0,83$ );
4.  $h_p=12,6$  мм ( $K_{\text{Ме отр}}=550/850=0,65$ ).

Результаты расчетов переходного процесса разгона дизеля КамАЗ-740, представленные на рис. 4 и 5, свидетельствуют о том, что при изменении наклона участка отрицательной коррекции, соответствующее изменению коэффициента  $K_{\text{Ме отр}}$  от 1,24 до 0,65, не приводит к существенному изменению динамических качеств дизеля. Во всех четырех исследованных случаях время переходного процесса разгона дизеля составило  $t_{\text{п}}=6$  с при допустимой нестабильности частоты вращения  $\omega_{\varepsilon}=1,5$  %.

В то же время, наклон участка отрицательной коррекции ВСХ оказывает заметное влияние на показатели токсичности ОГ (см. рис. 5). От наклона участка отрицательной коррекции в наибольшей степени зависит дымность ОГ  $K_x$ . Так, при изменении коэффициента  $K_{\text{Ме отр}}$  от 1,24 до 0,65 максимальная дымность ОГ в переходном процессе снижается с 60 до 36 % по шкале Хартриджа.

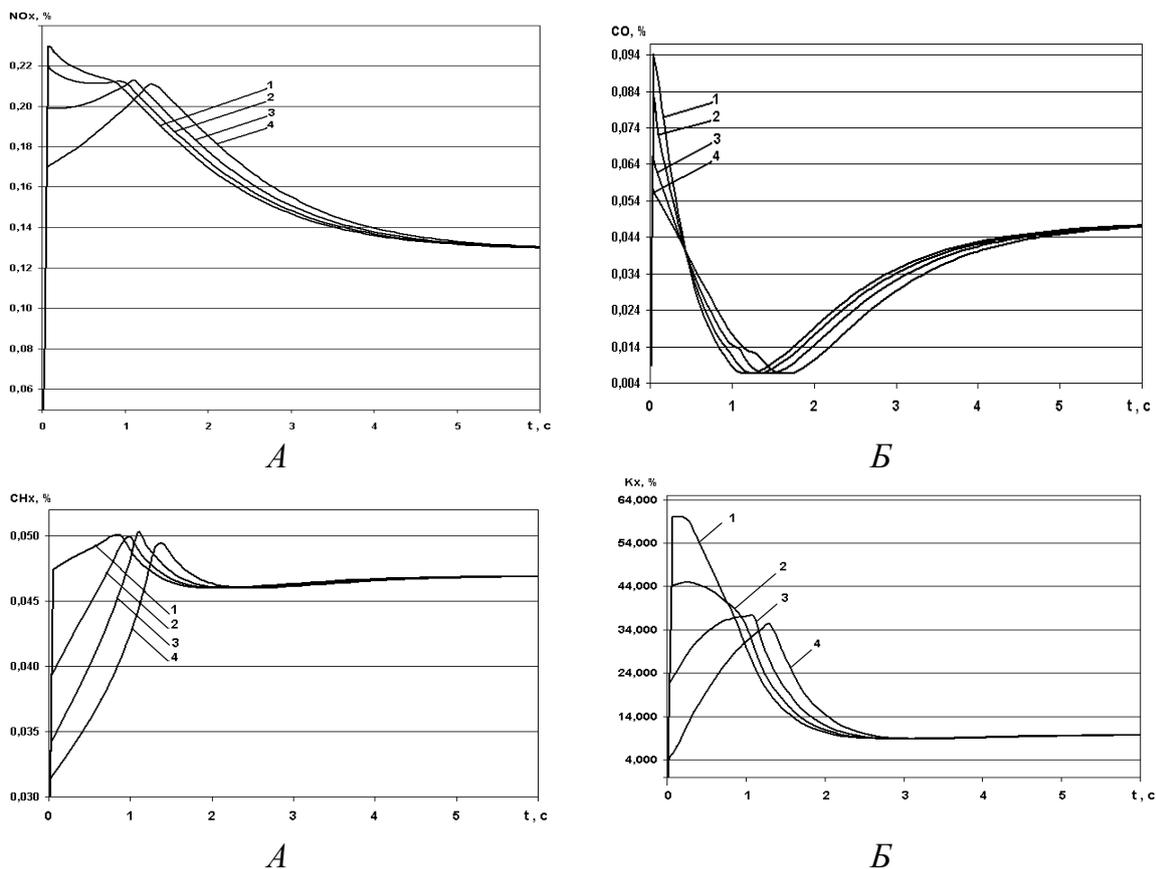


Рис. 5. Изменение параметров дизеля типа КамаЗ-740 в переходном процессе его разгона: *а* - содержания в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$ ; *б* - содержания в ОГ монооксида углерода  $C_{CO}$ ; *в* - содержания в ОГ несгоревших углеводородов  $C_{CHx}$ ; *г* - дымности ОГ  $K_x$ ; 1-4 – варианты наклона участка отрицательной коррекции.

Расчеты показали, что наиболее предпочтительных является формирование участка отрицательной коррекции ВСХ с наклоном, соответствующим значению коэффициента  $K_{Me\text{ отр}}=0,65$ . Увеличение этого коэффициента (увеличение подачи топлива на участке отрицательной коррекции), не приводя к заметному улучшению динамических качеств, приводит к значительному увеличению выбросов токсичных компонентов ОГ в переходном процессе. Наклон участка отрицательной коррекции необходимо выбирать с учетом обеспечения компромисса между требуемыми динамическими качествами дизеля и его экологическими показателями.

#### Литература:

1. Крутов В.И., Леонов И.В., Шатров В.И. Формирование внешней скоростной характеристики дизелей автотракторного и транспортного назначения с помощью корректоров // Двигателестроение. - 1989. - № 4. - С.27-30.
2. Хрящев Ю.Е., Слабов Е.П., Матросов Л.В. Об управлении внешней скоростной характеристикой дизеля // Автомобильная промышленность. - 1999. - № 11. - С. 7-10.
3. Остапенко Г.И., Долганов К.Е. Определение формы внешней скоростной характеристики по заданному пределу дымности отработавших газов автотракторного дизеля с турбонаддувом // Двигателестроение. - 1984. - № 10. - С. 8-11.
4. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. - М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2004. - 344 с.
5. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания. - М.: Машиностроение, 1989. - 416 с.

6. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. - М.: Машиностроение, 1978. - 472 с.

## СПОСОБ ХОЛОДНОГО ПУСКА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**Борисов А.О.**

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

Проблема улучшения пусковых качеств двигателей с воспламенением от сжатия продолжает оставаться актуальной, поскольку решается она сегодня использованием дополнительных агрегатов и посторонних источников энергии. Кроме того, возможное применение спирта в качестве альтернативного топлива, при всех его достоинствах, дополнительно обостряет эту проблему.

С другой стороны, современный уровень развития двигателестроения характеризуется расширением перечня регулирующих воздействий, что дает потенциальную техническую возможность использования ранее нереализуемых физических эффектов.

Рассмотрим возможность использования энергии внешней среды для повышения температуры воздуха (свежего заряда) в процессе впуска. Известен эффект повышения температуры газа при его нестационарном втекании из окружающей среды в емкость [1]. Если емкость перед процессом впуска вакуумирована, теплоизолирована от окружающей среды и стенки ее неподвижны, то достигается максимально возможное повышение температуры газа в конце впуска  $T_a$  по отношению к температуре окружающей среды  $T_o$  :

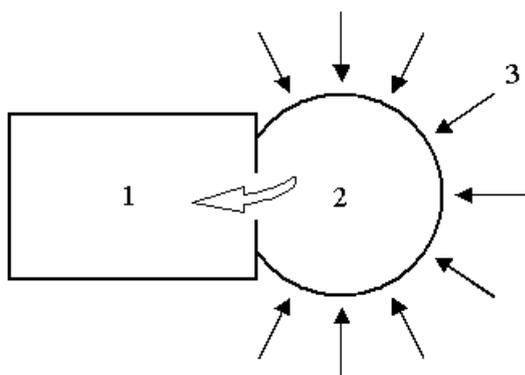


Рис. 1. Схема наполнения емкости из окружающей среды: 1- емкость, 2- объем газа, втекающий в емкость из окружающей среды, 3-давление окружающей среды.

$$T_a = \frac{c_p}{c_v} T_o = k \cdot T_o,$$

где:  $c_p$  и  $c_v$  – теплоемкости газа при постоянном давлении и при постоянном объеме, соответственно,  $k$  – показатель адиабаты.

Например, при температуре окружающей среды 253 К (-20 °С) температура поступившего в емкость воздуха возрастет примерно на 100 К и будет равна приблизительно 354 К (81 °С). В связи с существенным подогревом воздуха, представляет практический интерес исследование возможности воспроизведения данного эффекта в процессе впуска в поршневом двигателе внутреннего сгорания для улучшения его пусковых качеств.

Для полного проявления этого эффекта необходимо выполнение следующих условий:

- отсутствие впускного канала (нулевая длина трубопровода);
- создание вакуума перед открытием впускного окна или клапана;

Однако, в условиях реального двигателя, невозможно воспроизвести идеальную картину явления (невозможность достижения полного вакуума в камере, ее негерметичность, теплообмен, наличие впускного канала и т.д.) [2]. Поэтому пред-