

УДК 621.436

**Оценка токсичности отработавших газов дизеля в переходных процессах**

Марков В.А., Барченко Ф.Б., Рязанов К.П., Харитонов И.П.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

**Evaluation of Toxicity of Exhaust Gases of a Diesel Engine in Transient Processes**

Markov V.A., Barchenko F.B., Ryazanov K.P., Kharitonov I.P.

*Moscow State Technical University named after N.E. Bauman*

*Предложена методика оценка токсичности отработавших газов дизеля в переходных процессах. Она базируется на математической модели двигателя как объекта регулирования по частоте вращения. Эта модель включает уравнения, описывающие выбросы токсичных компонентов отработавших газов. Проведены расчетные исследования токсичности отработавших газов дизеля в переходных процессах.*

*Evaluation method of exhaust gases toxicity of a diesel engine in transient processes is suggested. It is based on the mathematical model of the engine as an object of rotation frequency control. This model includes equations describing emissions of exhaust gases toxic components. Calculation research of the diesel engine exhaust gases toxicity in transient processes is conducted.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, внешняя скоростная характеристика, токсичность отработавших газов, переходный процесс

**Key words:** diesel engine, external speed characteristic, toxicity of exhaust gases, transient process

**ВВЕДЕНИЕ**

Одной из важнейших характеристик транспортного дизеля является внешняя скоростная характеристика (ВСХ), оказывающая значительное вли-

яние на динамические качества дизеля, показатели топливной экономичности, дымности и токсичность отработавших газов (ОГ) дизеля. При этом необходимо определение показателей дымности и токсичности ОГ не только в установившихся, но в неустойчивых режимах. Одной из наиболее сложных является задача определения показателей токсичности ОГ в неустойчивых режимах – в переходных процессах. Проведение экспериментальных исследований с целью определения показателей токсичности ОГ дизелей на этих режимах является весьма трудоемким и не всегда возможным из-за отсутствия необходимой измерительной аппаратуры, позволяющей определять показатели токсичности ОГ на указанных режимах. В связи с этим, разработку и совершенствование систем автоматического регулирования (САР) частоты вращения дизеля целесообразно проводить расчетно-экспериментальным путем. Он основан на использовании методов математического моделирования, позволяющих сократить временные и материальные затраты при проведении исследований.

## **ВНЕШНЯЯ СКОРОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИЗЕЛЯ**

Внешняя скоростная характеристика является ограничительной статической характеристикой, объединяющей точки с различными частотами вращения коленчатого вала и максимальными мощностными показателями дизеля – с максимальными подачей топлива, эффективной мощностью, крутящим моментом двигателя. ВСХ включает два основных участка – участки положительной и отрицательной коррекции [1]. Участок отрицательной коррекции ограничивает подачу топлива в диапазоне скоростных режимов от режима максимального крутящего момента при частоте вращения  $n_{M_{max}}$  до минимального скоростного режима при минимальной частоте вращения  $n_{min}$ . При этом диапазон корректирования топливоподачи на участке отрицательной коррекции ВСХ оценивается коэффициентом отрицательного корректирования  $K_{Me_{отр}}$ , вычисляемым в виде отношения крутящего момента  $M_{e_{n_{min}}}$  при  $n_{min}$  и номинального крутящего момента  $M_{e_{ном}}$  при  $n_{ном}$ , т.е.

$K_{M_{e\text{отр}}} = M_{e_{n\text{min}}} / M_{e_{\text{ном}}}$ . Диапазон корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции ВСХ определяется коэффициентом положительного корректирования  $K_{M_{e\text{пол}}}$  в виде отношения крутящего момента  $M_{e_{\text{max}}}$  при  $n_{M_{\text{max}}}$  и номинального крутящего момента  $M_{e_{\text{ном}}}$  при  $n_{\text{ном}}$ , т.е.  $K_{M_{e\text{пол}}} = M_{e_{\text{max}}} / M_{e_{\text{ном}}}$ . Форма ВСХ определяется указанными диапазонами корректирования топливоподачи на указанных участках. Для оценки влияния формы ВСХ на показатели автомобильного дизеля проведены исследования параметров дизеля КамАЗ-740 в переходных процессах.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ САР

Как отмечено выше, оценку влияния формы ВСХ на показатели дизеля целесообразно проводить методами математического моделирования. Математическое описание САР может быть весьма разнообразно. При расчетных исследованиях переходных процессов дизелей широко применяют системы линейных дифференциальных уравнений, описывающих элементы САР [31,95,107]. Однако, в ряде случаев, целесообразна разработка нелинейных математических моделей, содержащих нелинейные дифференциальные уравнения элементов САР и учитывающих реальные нелинейные характеристики параметров дизеля. При этом указанные нелинейные характеристики могут быть заданы различным образом [1, 2]. Хорошие результаты дает описание этих характеристик полиномиальными зависимостями [2].

Выбор тех или иных математических моделей САР в значительной мере определяется типом исследуемых переходных процессов. Характерными переходными процессами являются процессы наброса и сброса нагрузки [1, 3]. Они отличаются незначительными отклонениями значений частоты вращения двигателя от ее значения на установившемся режиме, и при их исследованиях применение линейных моделей САР дает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Для транспортных дизелей более характерны переходные процессы разгона и торможения [1, 3]. Эти процессы отличаются широким диапазоном изменения частоты вращения

двигателя  $\omega_d$ . При расчетных исследованиях этих переходных процессов более оправданным представляется использование нелинейных моделей.

Оценка влияния формы ВСХ на показатели токсичности ОГ дизеля в переходных процессах проведена с использованием разработанной математической модели САР комбинированного двигателя. В разработанной модели дифференциальные уравнения наиболее значимых элементов дизеля с турбонаддувом используются в следующем виде [1, 3]:

$$\text{- поршневая часть двигателя:} \quad J_d \frac{d\omega_d}{dt} = M_d - M_c; \quad (1)$$

$$\text{- турбокомпрессор:} \quad J_T \frac{d\omega_T}{dt} = M_T - M_K; \quad (2)$$

$$\text{- впускной трубопровод:} \quad \frac{V_{вп}}{R_B T_K} \frac{dp_K}{dt} = G_K - G_d; \quad (3)$$

$$\text{- выпускной трубопровод:} \quad \frac{V_{вып}}{R_T T_T} \frac{dp_T}{dt} = G_T - G_T, \quad (4)$$

где  $J_d$  и  $J_T$  – моменты инерции валов дизеля с потребителем и турбокомпрессора соответственно;  $\omega_d$  и  $\omega_T$  – частоты вращения валов дизеля и турбокомпрессора;  $M_d$ ,  $M_c$ ,  $M_T$ ,  $M_K$  – моменты: крутящий дизеля, сопротивления потребителя, развиваемый турбиной, потребляемый компрессором;  $V_{вп}$  и  $V_{вып}$  – объемы впускного и выпускного трубопроводов;  $p_K$  и  $p_T$  – давления наддувочного воздуха на выходе из компрессора и ОГ на входе в турбину;  $R_B$  и  $R_T$  – газовые постоянные наддувочного воздуха и ОГ;  $T_B$  и  $T_T$  – температуры наддувочного воздуха и ОГ;  $G_d$ ,  $G_K$ ,  $G_T$ ,  $G_T$  – расходы воздуха через двигатель и компрессор, газов через двигатель и турбину.

Значения параметров двигателя, входящих в правые части уравнений (1)...(4), в соответствии с рекомендациями работ [1, 3] определялись в виде следующих функциональных зависимостей:

$$\begin{aligned} M_d &= f(\omega_d, h_p, p_K); & M_T &= f(\omega_T, h_p, p_T); & M_K &= f(\omega_T, p_K); \\ G_K &= f(\omega_T, p_K); & G_d &= f(\omega_d, p_K); & G_T &= f(\omega_d, p_T, p_K) \\ G_T &= f(p_T, h_p). \end{aligned} \quad (5)$$

При расчетных исследованиях использовано и ряд дополнительных функциональных зависимостей для температур наддувочного воздуха и ОГ:

$$T_K = f(\omega_d, h_p); \quad T_T = f(\omega_d, h_p, p_K), \quad (6)$$

и концентраций в ОГ оксидов азота, монооксида углерода, углеводородов и дымности ОГ:

$$C_{NOx} = f(\omega_d, h_p, p_K); \quad C_{CO} = f(\omega_d, h_p, p_K); \quad C_{CHx} = f(\omega_d, h_p, p_K) \\ K_X = f(\omega_d, h_p, p_K). \quad (7)$$

Для определения функциональных зависимостей (5)...(7) параметров, входящих в правые части уравнений (1)...(4) исследуемого дизеля КамаАЗ-740 была разработана программа аппроксимации экспериментальных данных полиномиальными зависимостями, написанная на языке *FORTRAN* и использующая метод наименьших квадратов. При этом исходный массив контрольных точек, включающий 45 установившихся режимов определялся с использованием экспериментальных данных по исследуемому дизелю КамаАЗ-740, приведенных в работах [1, 5] (рис. 1 и 2). При расчетах использован квазистационарный метод, при котором экспериментальные данные, полученные на установившихся режимах, используются для определения указанных полиномиальных зависимостей, входящих в математическую модель САР.

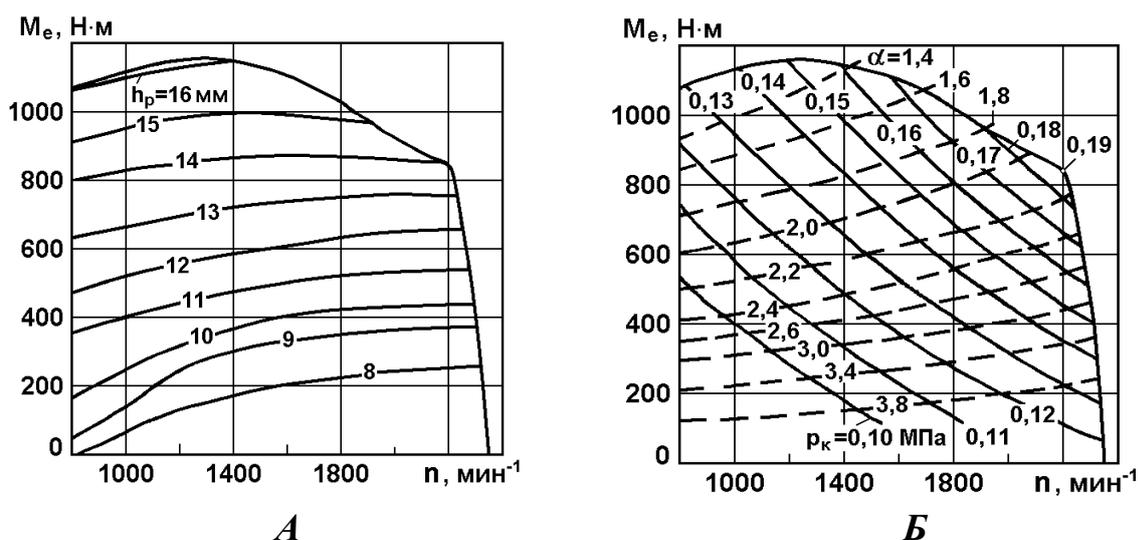


Рис. 1. Многопараметровые характеристики дизеля типа КамаАЗ-740: а – положения  $h_p$  рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД); б – давления наддувочного воздуха  $p_K$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$

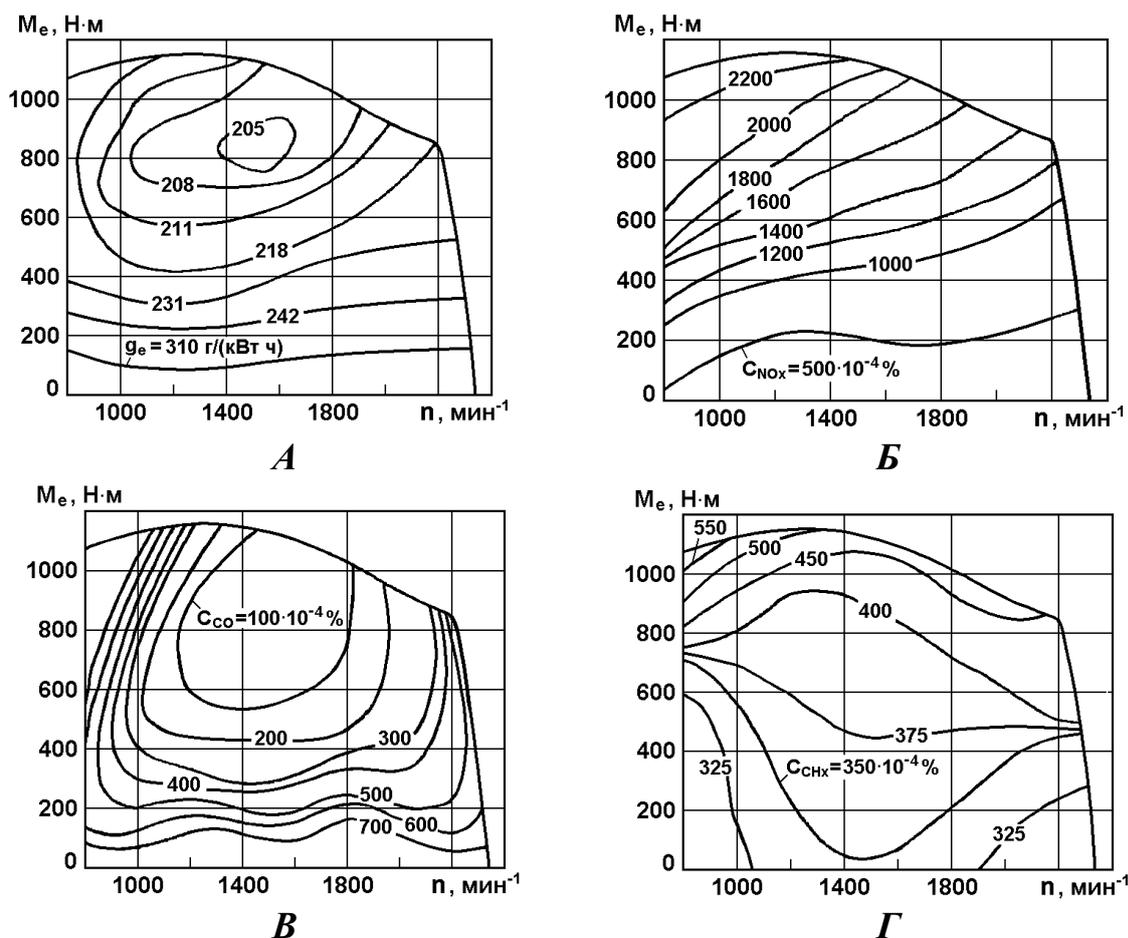


Рис. 2. Многопараметровые характеристики дизеля КамАЗ-740: а – удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ ; б – содержания в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$ ; в – монооксида углерода  $C_{CO}$ ; г – углеводородов  $C_{SHx}$

С использованием упомянутых экспериментальных данных по дизелю КамАЗ-740 и разработанной программы расчета определены коэффициенты полиномов (5)...(7). В частности, полиномиальная зависимость второй степени для крутящего момента двигателя  $M_d$  от частоты вращения коленчатого вала двигателя  $\omega_d$ , давления наддувочного воздуха  $p_k$ , положения дозирующего органа (рейки ТНВД)  $h_p$ , входящая в уравнение (1), определена в виде

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

Визуализация этой полиномиальной зависимости приведена на рис. 3.

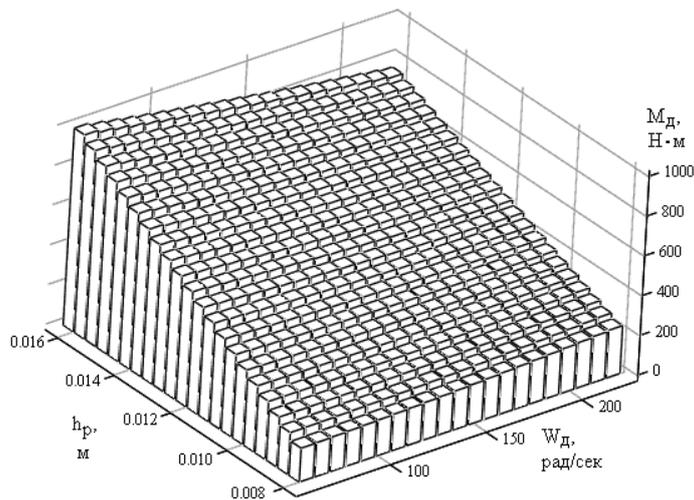


Рис. 3. Визуализация полиномиальной зависимости  $M_d(\omega_d, p_k, h_p)$  при  $p_k = 0,1 \text{ МПа} = \text{const}$

Момент сопротивления потребителя, входящий в выражение (1), описывался выражением [6]

$$M_c = k_N \omega_d^2, \quad (8)$$

где  $k_N$  – коэффициент, пропорциональный настройке потребителя  $N$ .

По аналогии с выражением для крутящего момента двигателя  $M_d$  получены полиномиальные зависимости и для других параметров дизеля, входящих в правые части уравнений (2), (3) и (4). Для описания функциональных зависимостей содержания в ОГ оксидов азота  $C_{\text{NO}_x}$ , углеводородов  $C_{\text{СН}_x}$  и дымности ОГ  $K_x$  использованы полиномы второго порядка, а для описания функциональной зависимости содержания а ОГ монооксида углерода  $C_{\text{CO}}$  – полином третьего порядка:

$$C_{\text{NO}_x}(\omega_d, h_p, p_k) = -0,68942 + 0,0047573\omega_d + 130,260h_p - 5,8697p_k - 0,54951\omega_d h_p + 0,020\omega_d p_k + 810,09h_p p_k - 0,00000614\omega_d^2 - 6023,1h_p^2 - 20,46p_k^2.$$

$$C_{\text{CO}}(\omega_d, h_p, p_k) = 1,2281 - 0,010641\omega_d - 271,60h_p + 12,737p_k + 1,0985\omega_d h_p - 0,026629\omega_d p_k + 290,18h_p p_k + 0,000032162\omega_d^2 + 13667,0h_p^2 - 107,52p_k^2 + 2,0081\omega_d h_p p_k - 11,627 \cdot 10^{-8}\omega_d^3 + 79014,0h_p^3 + 259,17p_k^3 - 0,0012248\omega_d^2 h_p + 0,00041418\omega_d^2 p_k - 44,6\omega_d h_p^2 - 84901,0h_p^2 p_k - 0,53873\omega_d p_k^2 + 7118,8h_p p_k^2.$$

$$C_{\text{CHX}}(\omega_{\text{д}}, h_{\text{р}}, p_{\text{к}}) = 0,091397 + 0,000014919\omega_{\text{д}} - 13,4840h_{\text{р}} + 0,094903p_{\text{к}} - \\ - 0,078545\omega_{\text{д}}h_{\text{р}} + 0,020369\omega_{\text{д}}p_{\text{к}} + 165,21h_{\text{р}}p_{\text{к}} - 0,0000053221\omega_{\text{д}}^2 + 281,63h_{\text{р}}^2 - \\ - 20,197p_{\text{к}}^2.$$

$$K_{\text{X}}(\omega_{\text{д}}, h_{\text{р}}, p_{\text{к}}) = -126,170 + 0,91023\omega_{\text{д}} - 780,6h_{\text{р}} + 799,59p_{\text{к}} - 30,139\omega_{\text{д}}h_{\text{р}} - \\ - 3,4768\omega_{\text{д}}p_{\text{к}} - 192350,0h_{\text{р}}p_{\text{к}} - 0,0007332\omega_{\text{д}}^2 + 1395800,0h_{\text{р}}^2 + 8410,6p_{\text{к}}^2.$$

На рис. 4 приведены визуализированные результаты аппроксимации полиномов для показателей токсичности ОГ –  $C_{\text{NOx}}$ ,  $C_{\text{CO}}$ ,  $C_{\text{CHX}}$  и  $K_{\text{X}}$ .

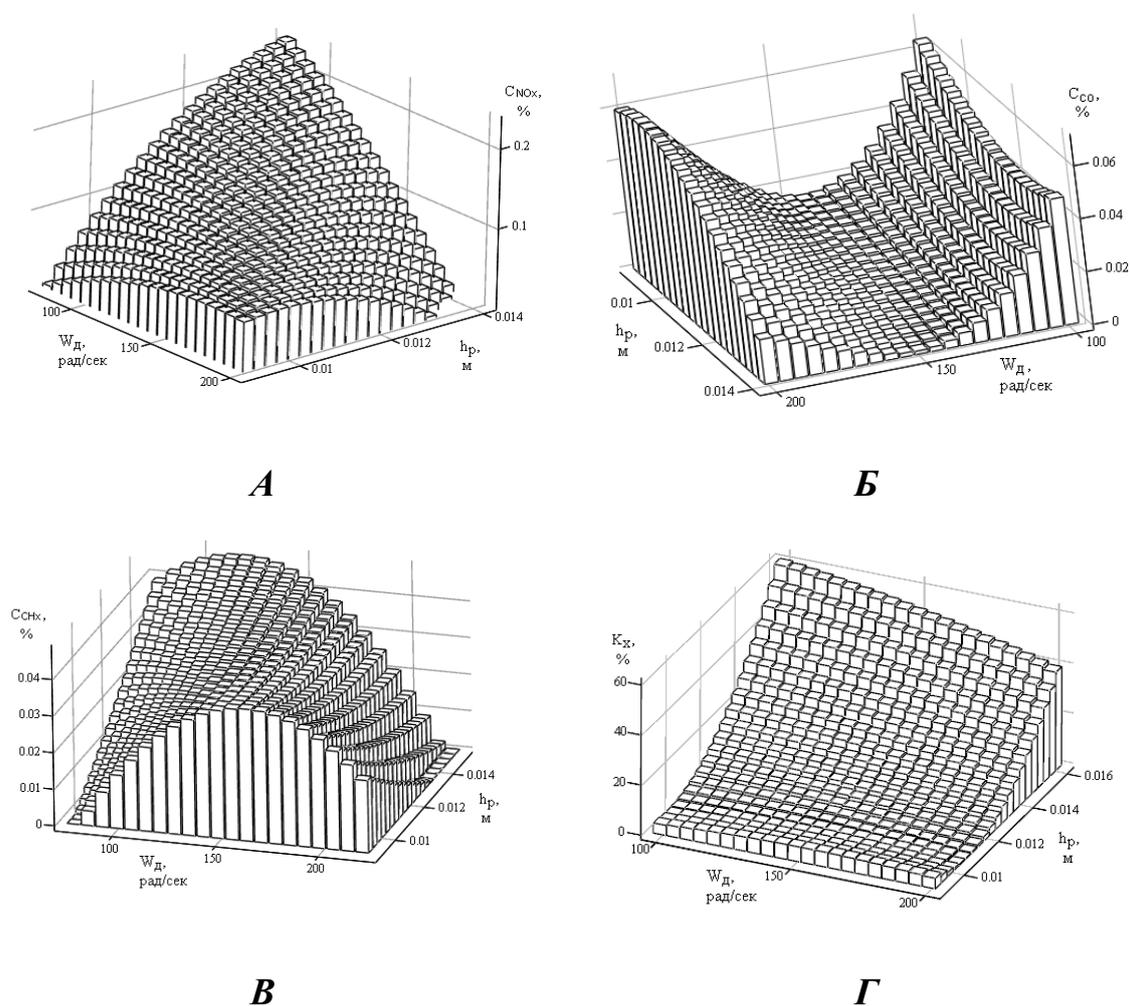


Рис. 4. Визуализация характеристик токсичности ОГ дизеля КамАЗ-740 от его частоты вращения  $\omega_{\text{д}}$  и положения рейки ТНВД  $h_{\text{р}}$  при давлении наддува  $p_{\text{к}}=0,12 \text{ МПа}=\text{const}$ : а – оксиды азота; б – монооксид углерода; в – несгоревшие углеводороды; г – дымность ОГ

Представленная математическая модель объекта регулирования – дизеля КамАЗ-740 дополнена уравнениями, описывающими автоматический регулятор частоты вращения. Рассмотрен электронный регулятор частоты вращения коленчатого вала дизеля, содержащий датчик частоты вращения, электронный блок управления и исполнительный механизм (ИМ), воздействующий на орган управления топливоподачей дизеля – рейку топливного насоса высокого давления (ТНВД). При этом датчик частоты вращения имеет свойства идеального усилительного звена. Электронный блок формируется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон управления в виде

$$U_{\text{упр}} = k_{\text{п}} U_{\varphi} + k_{\text{и}} \int U_{\varphi} dt + k_{\text{д}} \frac{dU_{\varphi}}{dt},$$

где  $U_{\text{упр}}$  – выходной сигнал вычислительного устройства;  $U_{\varphi}$  – сигнал частоты вращения коленчатого вала  $\varphi = \Delta\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{до}}$ ;  $k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{и}}$ ,  $k_{\text{д}}$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона управления. В соответствии с данными работы [15] использованы следующие значения ПИД-закона регулирования  $k_{\text{п}}=10$ ,  $k_{\text{и}}=2$ ,  $k_{\text{д}}=1$ .

Рассмотрена возможность использования электрогидравлического исполнительного механизма, перемещающего рейку ТНВД на величину  $\eta = \Delta h_{\text{р}}/h_{\text{р0}}$ . Этот ИМ описан уравнением

$$T_{\text{им}} \frac{d\eta}{dt} + \eta = k_{\text{им}} U_{\text{упр}}.$$

Описанная математическая модель использована для расчета переходных процессов САР частоты вращения дизеля КамАЗ-740.

## **РАСЧЕТЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЯ**

Для расчета переходных процессов была разработана программа, написанная на языке FORTRAN и позволяющая решать описанную выше систему дифференциальных уравнений САР методом Эйлера. Для проверки адекватности разработанной математической модели САР был проведен расчет переходного процесса наброса полной нагрузки на дизель КамАЗ-740. Полученные характеристики этого процесса (рис. 5) свидетельствуют о том, что

его продолжительность составляет  $t=3$  с (при допустимой неустойчивости частоты вращения  $\omega_\varepsilon=1,5$  %). Экспериментально полученная в работе [7] продолжительность такого переходного процесса равна  $t_{\text{п}}=2,8-3,0$  с, что свидетельствует о возможности использования разработанной математической модели для исследования переходных процессов дизеля КамАЗ-740.

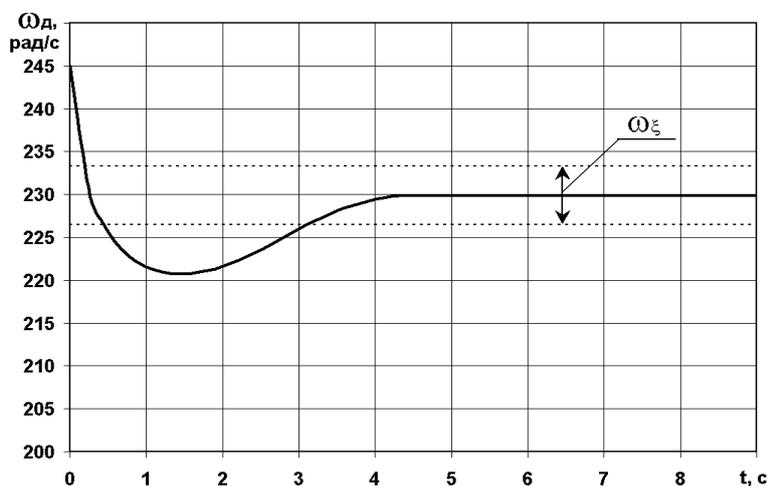


Рис. 5. Характеристика изменения частоты вращения дизеля  $\omega_d$  в переходном процессе наброса нагрузки:  $\omega_\varepsilon$  – допустимая неустойчивость регулируемого параметра

С использованием разработанной математической модели проведено исследование влияния формы ВСХ на показатели дизеля 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>. На первом этапе расчетных исследований определялось влияние наклона участка отрицательной коррекции ВСХ на динамические качества дизеля, показатели дымности и токсичность ОГ дизеля. Исследовалось четыре варианта наклона участка отрицательной коррекции с различными значениями коэффициента корректирования  $K_{Me\text{отр}}$ , в каждом из которых на режиме максимального крутящего момента при  $n_{M\text{max}}=1400$  мин<sup>-1</sup> рейка ТНВД занимала положение  $h_p=16$  мм, а на минимальном скоростном режиме ВСХ при  $n_{\text{min}}=800$  мин<sup>-1</sup> положение рейки составляло:

1.  $h_{p\text{ }n\text{min}} = 16,0$  мм ( $K_{Me\text{отр}} = 1050/850 = 1,24$ ).
  2.  $h_{p\text{ }n\text{min}} = 14,6$  мм ( $K_{Me\text{отр}} = 850/850 = 1,00$ ).
  3.  $h_{p\text{ }n\text{min}} = 13,6$  мм ( $K_{Me\text{отр}} = 700/850 = 0,83$ ).
  4.  $h_{p\text{ }n\text{min}} = 12,6$  мм ( $K_{Me\text{отр}} = 550/850 = 0,65$ ).
- (9)

Результаты расчетов переходного процесса разгона дизеля КамАЗ-740 (рис. б) свидетельствуют о том, что изменение наклона участка отрицательной коррекции, соответствующее значениям коэффициента  $K_{Me\text{ отр}}$  от 1,24 до 0,65, не приводит к существенному изменению динамических качеств дизеля. При допустимой нестабильности частоты вращения  $\omega_\varepsilon=1,5\%$  во всех четырех случаях время переходного процесса разгона дизеля составило около  $t_{\text{п}}=6$  с.

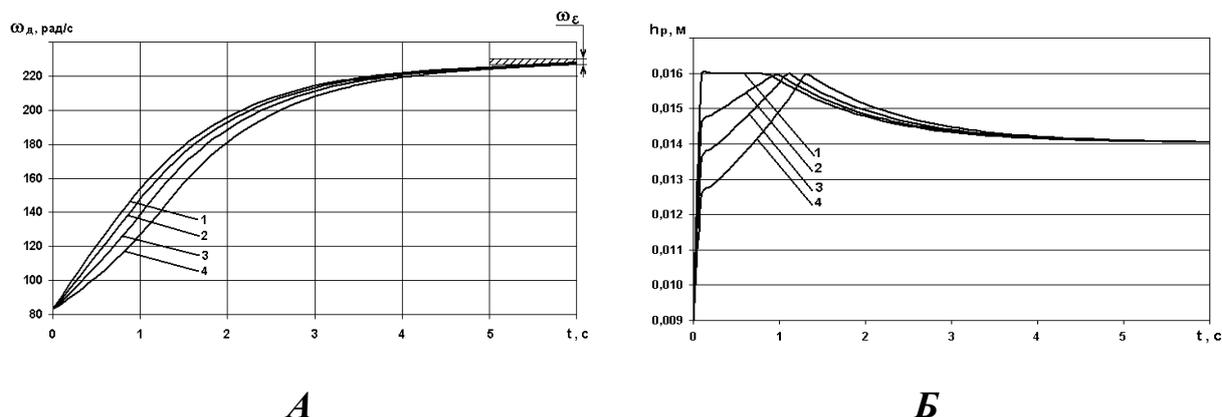
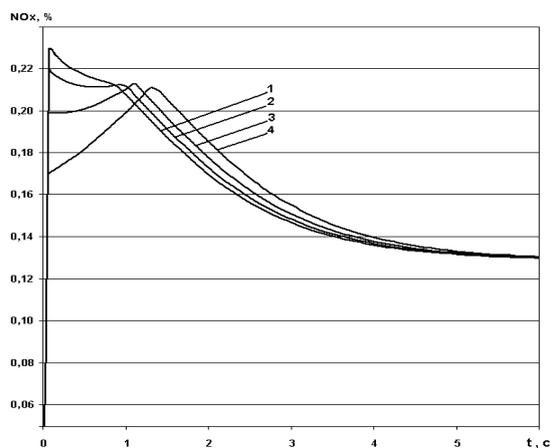


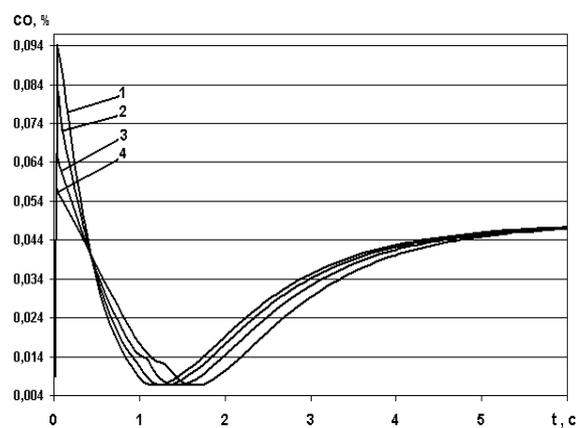
Рис. 6. Изменение параметров дизеля КамАЗ-740 в переходном процессе разгона: а – частоты вращения дизеля  $\omega_d$ ; б – положения дозирующей рейки; 1 –  $h_{p\ n\ \min}=16,0$  мм ( $K_{Me\text{ отр}}=1,24$ ); 2 –  $h_{p\ n\ \min}=14,6$  мм ( $K_{Me\text{ отр}}=1,00$ ); 3 –  $h_{p\ n\ \min}=13,6$  мм ( $K_{Me\text{ отр}}=0,83$ ); 4 –  $h_{p\ n\ \min}=12,6$  мм ( $K_{Me\text{ отр}}=0,65$ )

При этом наклон участка отрицательной коррекции ВСХ оказывает заметное влияние на показатели токсичности и дымности ОГ (рис. 7). Это обусловлено значительными отличиями значений частоты вращения дизеля  $\omega_d$  и положения дозирующей рейки  $h_p$  для исследованных вариантов формы ВСХ, отмеченные в начальной фазе переходного процесса (при  $t < 3$  с, см. рис. 6). Максимальное содержание оксидов азота  $C_{NOx}$  в ОГ дизеля КамАЗ-740 в переходном процессе отмечено при  $h_{p\ n\ \min}=16,0$  мм и составляет  $C_{NOx}=0,23\%$  (см. рис. 7,а). Вместе с тем, можно отметить, что осредненные для переходного процесса разгона концентрации  $C_{NOx}$  в ОГ для исследованных вариантов ВСХ отличаются незначительно. Зависит от формы ВСХ и содержание в ОГ монооксида углерода  $C_{CO}$  (см. рис. 7,б). Однако и в этом случае осредненные для переходного процесса концентрации  $C_{CO}$  в ОГ для исследованных вариантов ВСХ отличаются незначительно. Более значительное влияние форма

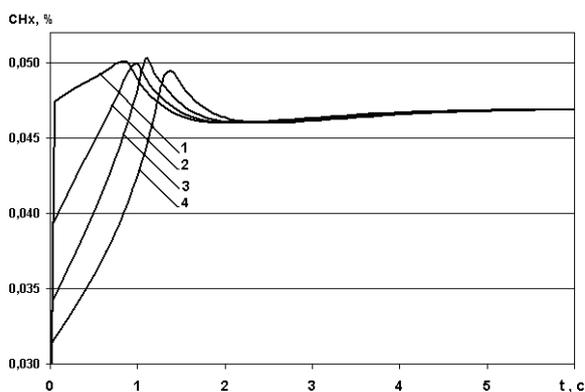
ВСХ оказывает на содержание в ОГ углеводородов  $C_{\text{СНх}}$ . Особенно это заметно в начальной стадии процесса (при  $t < 1,5-2,0$  с, см. рис. 7,в). Для исследованных вариантов ВСХ при фиксированных значениях времени  $t$  концентрации  $C_{\text{СНх}}$  могут отличаться в 1,5 раза. С этой точки зрения наиболее неблагоприятна ВСХ с  $h_{\text{p n min}}=16,0$  мм, при реализации которой в диапазоне времени  $t=0-1$  отмечена наибольшая концентрация углеводородов в ОГ –  $C_{\text{СНх}}=0,048-0,050$  %. От наклона участка отрицательной коррекции в наибольшей степени зависит дымность ОГ  $K_{\text{X}}$  (см. рис. 7,г). Так, при изменении коэффициента  $K_{\text{Me отр}}$  от 1,24 до 0,65 максимальная дымность ОГ в переходном процессе снижается с 60 до 36 % по шкале Хартриджа, т.е. примерно в 1,7 раза. Причем, при реализации ВСХ с  $h_{\text{p n min}}=16,0$  мм высокая дымность ОГ ( $K_{\text{X}}=34-60$  %) отмечена в течение сравнительно большого периода переходного процесса (при  $t=0 \dots 1$  с). При реализации ВСХ с  $h_{\text{p n min}}=12,6$  мм максимальная дымность ОГ составила  $K_{\text{X}}=35$  % и она отмечена лишь при  $t=1,3$  с.



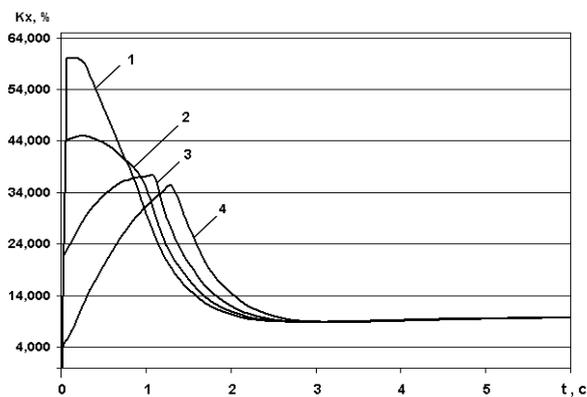
**A**



**B**



**B**



**Г**

Рис. 7. Изменение параметров дизеля КамАЗ-740 в переходном процессе разгона:  $a$  – содержания в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$ ;  $b$  – монооксида углерода  $C_{CO}$ ;  $v$  – углеводородов  $C_{CHx}$ ;  $z$  – дымности ОГ  $K_X$ ; 1 –  $h_{p\ n\ min}=16,0$  мм ( $K_{Me\ отр}=1,24$ ); 2 –  $h_{p\ n\ min}=14,6$  мм ( $K_{Me\ отр}=1,00$ ); 3 –  $h_{p\ n\ min}=13,6$  мм ( $K_{Me\ отр}=0,83$ ); 4 –  $h_{p\ n\ min}=12,6$  мм ( $K_{Me\ отр}=0,65$ )

Анализ представленных на рис. 7 показателей токсичности и дымности ОГ дизеля в исследованном переходном процессе показывает, что наиболее предпочтительным является формирование участка отрицательной коррекции ВСХ с наклоном, соответствующим коэффициенту  $K_{Me\ отр}=0,65$ . 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.

На втором этапе исследований определялось влияние наклона участка положительной коррекции ВСХ на показатели дизеля. При расчетах переходных процессов с четырьмя вариантами наклона участка положительной коррекции ВСХ, характеризуемых коэффициентом положительного корректирования  $K_{Me\ пол}$ , исследован 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>. Диапазон корректирования топливоподачи на участке отрицательной коррекции был практически неизменным и равным  $K_{Me\ отр}=850/850=1,00$ . При таком участке отрицательной коррекции исследовано четыре варианта протекания участка положительной коррекции, в каждом из которых на номинальном скоростном режиме при  $n_{ном}=2200$  мин<sup>-1</sup> положение рейки составляло  $h_{p\ n\ ном}=14,0$  мм, а на режиме максимального крутящего момента при  $n_{Mmax}=1400$  мин<sup>-1</sup> рейка ТНВД занимала следующие положения:

1.  $h_{p\ M\ max} = 16,7$  мм ( $K_{Me\ пол} = 1270/850 = 1,50$ ).
2.  $h_{p\ M\ max} = 16,0$  мм ( $K_{Me\ пол} = 1150/850 = 1,35$ ).
3.  $h_{p\ M\ max} = 15,1$  мм ( $K_{Me\ пол} = 1020/850 = 1,20$ ).

$$4. h_{pM \max} = 14,2 \text{ мм} (K_{Me \text{ пол}} = 890/850 = 1,05) \quad (10)$$

Результаты расчетов переходного процесса разгона дизеля КамАЗ-740 (рис. 8) свидетельствуют о том, что изменение диапазона корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции, соответствующего изменению коэффициента  $K_{Me \text{ пол}}$  от 1,05 до 1,50, сопровождается сокращением продолжительности переходного процесса  $t_{п}$  с 8,2 до 5,4 с (при допустимой нестабильности частоты вращения  $\omega_{\varepsilon} = 1,5 \%$ ). Для базового варианта (характеристики 2 на рис. 8) величина  $t_{п}$  составила 6,1 с.

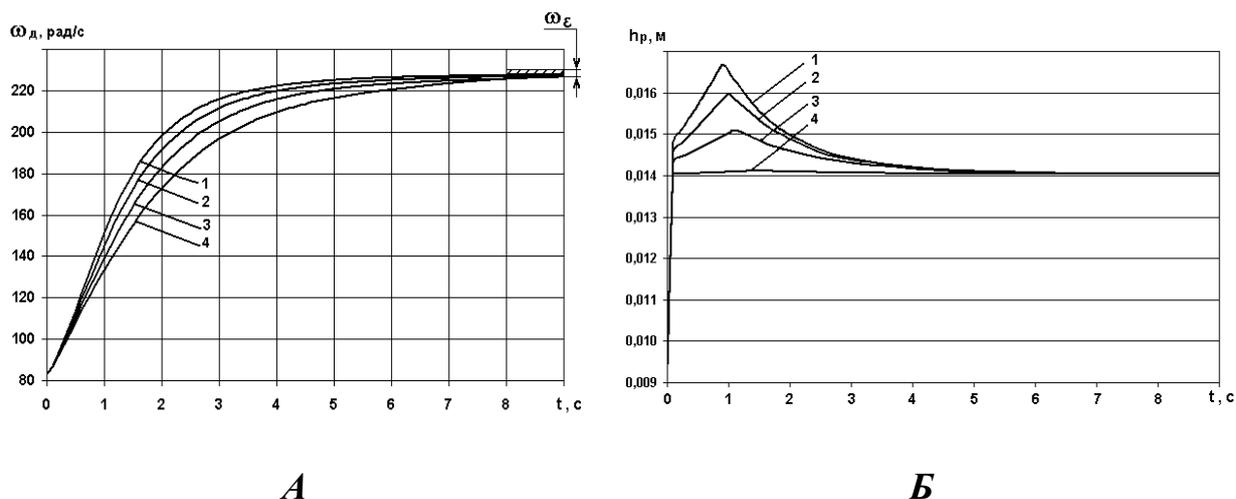
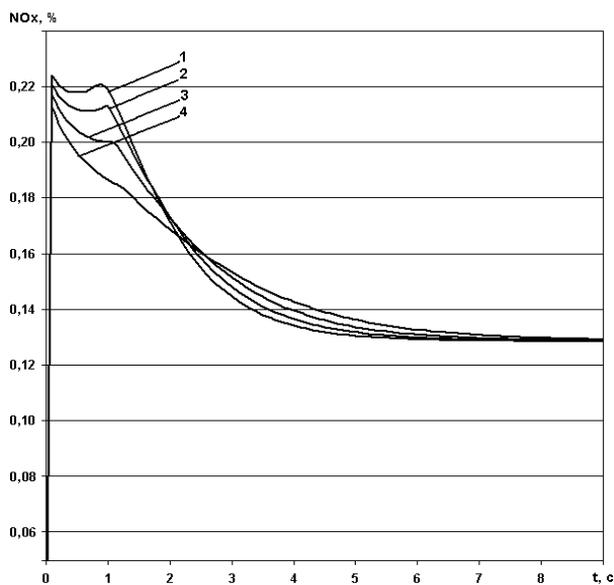


Рис. 8. Изменение параметров дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе его разгона: *а* – частоты вращения дизеля  $\omega_d$ ; *б* – положения дозирующей рейки  $h_p$ ; 1 –  $h_{pM \max} = 16,7 \text{ мм}$  ( $K_{Me \text{ пол}} = 1,50$ ); 2 –  $h_{pM \max} = 16,0 \text{ мм}$  ( $K_{Me \text{ пол}} = 1,35$ ); 3 –  $h_{pM \max} = 15,1 \text{ мм}$  ( $K_{Me \text{ пол}} = 1,20$ ); 4 –  $h_{pM \max} = 14,2 \text{ мм}$  ( $K_{Me \text{ пол}} = 1,05$ )

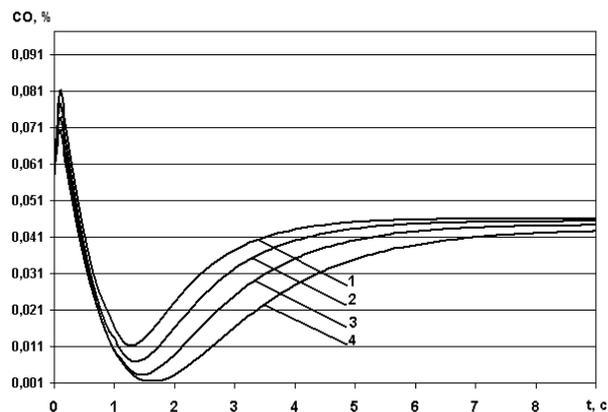
Наклон участка положительной коррекции ВСХ оказывает заметное влияние и на показатели токсичности и дымности ОГ, что объясняется отличиями значений частоты вращения дизеля  $\omega_d$  и положения дозирующей рейки  $h_p$  в переходном процессе для исследованных вариантов положительного корректирования ВСХ (см. рис. 9). При увеличении диапазона корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции (при увеличении значения  $h_{pM \max}$  и неизменном значении  $h_{p \text{ ном}}$ ) максимальные концентрации оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$  в ОГ дизеля в переходном процессе его разгона возрастают. Их максимальное содержание в ОГ  $C_{\text{NOx}} = 0,224 \%$  отмечено при коэффи-

коэффициенте корректирования  $K_{Me\text{ пол}} = 1,50$  (при  $h_{p\text{ Mmax}} = 16,7$  мм, см. рис. 9,а). Вместе с тем, концентрации  $C_{NOx}$  в ОГ сравнительно слабо зависят от исследованных значений коэффициента  $K_{Me\text{ пол}}$ . С увеличением диапазона корректирования топливоподачи на исследуемом участке содержание в ОГ монооксида углерода  $C_{CO}$  также возрастает. Максимальная концентрация монооксида углерода в ОГ  $C_{CO} = 0,081$  % соответствует коэффициенту корректирования  $K_{Me\text{ пол}} = 1,50$  (при  $h_{p\text{ Mmax}} = 16,7$  мм, см. рис. 9,б). Однако и в этом случае осредненные для переходного процесса разгона дизеля значения концентрации  $C_{CO}$  в ОГ для исследованного диапазона положительного корректирования топливоподачи отличаются незначительно. Более значительное влияние этот диапазон корректирования оказывает на содержание в ОГ углеводородов  $C_{CHx}$ . Их максимальная концентрация отмечена при коэффициенте корректирования  $K_{Me\text{ пол}} = 1,50$  и составляет  $C_{CHx} = 0,056$  % (рис. 9,в). При уменьшении этого коэффициента до  $K_{Me\text{ пол}} = 1,05$  максимальное значение концентрации  $C_{CHx} = 0,046 \dots 0,047$  % достигается лишь в период окончания переходного процесса. Наибольшее влияние диапазон корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции оказывает на дымность ОГ  $K_X$ . Максимальная дымность ОГ  $K_X = 52$  % по шкале Хартриджа имеет место при коэффициенте корректирования  $K_{Me\text{ пол}} = 1,50$  (при  $h_{p\text{ Mmax}} = 16,7$  мм, см. рис. 9,г). Уменьшение этого коэффициента сопровождается быстрым снижением дымности ОГ, и при коэффициенте  $K_{Me\text{ пол}} = 1,05$  максимальная дымность ОГ в переходном процессе снижается до  $K_X = 34$  % по шкале Хартриджа, т.е. примерно в 1,5 раза.

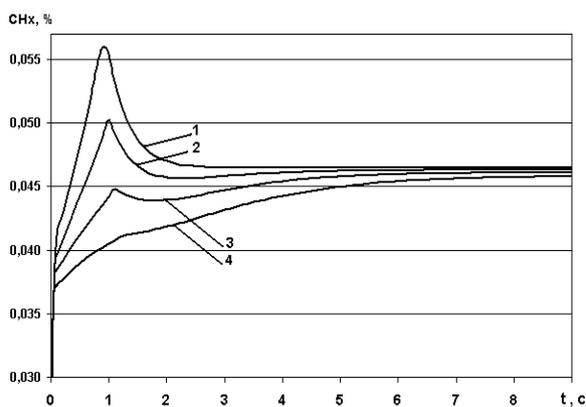
Расчетные данные свидетельствуют о том, что выбор коэффициентов корректирования топливоподачи на участках отрицательной и положительной коррекции ВСХ должен осуществляться из условия обеспечения компромисса между продолжительностью переходного процесса  $t_{п}$  и допустимым уровнем дымности ОГ  $K_X$ . Эти требования к величинам  $t_{п}$  и  $K_X$  определяются соответствующими нормативными документами. Допустимая продолжительность переходного процесса регламентируется ГОСТом на САР частоты вращения дизелей, а дымность ОГ ограничивается ГОСТами на предельные выбросы сажи в переходном процессе.



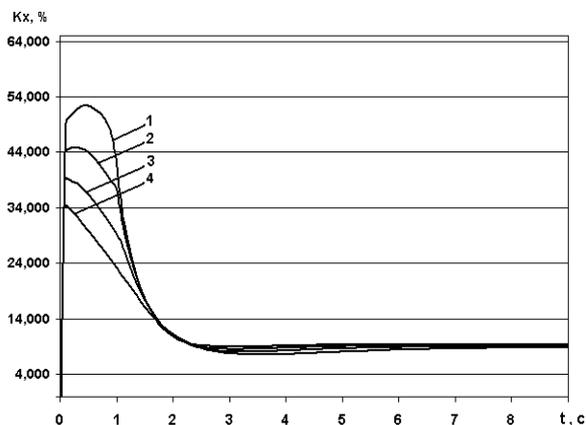
*A*



*B*



*A*



*B*

Рис. 9. Изменение параметров дизеля КамАЗ-740 в переходном процессе разгона: *a* – содержания в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$ ; *б* – монооксида углерода  $C_{CO}$ ; *в* – углеводородов  $C_{CHx}$ ; *г* – дымности ОГ  $K_X$ ; 1 –  $h_{p\ Mmax}=16,7$  мм ( $K_{Me\ пол}=1,50$ ); 2 –  $h_{p\ Mmax}=16,0$  мм ( $K_{Me\ пол}=1,35$ ); 3 –  $h_{p\ Mmax}=15,1$  мм ( $K_{Me\ пол}=1,20$ ); 4 –  $h_{p\ Mmax}=14,2$  мм ( $K_{Me\ пол}=1,05$ )

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработана математическая модель САР частоты вращения дизеля, позволяющая провести оценку токсичности ОГ в переходных процессах.
- Проведенные расчеты переходного процесса дизеля КамАЗ-740 с различной формой ВСХ позволили оценить ее влияние на продолжительность

переходного процесса и выбросы нормируемых газообразных токсичных компонентов ОГ в переходном процессе.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей*. Москва: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. 344 с.

[2] Крутов В.И., Кузьмик П.К. *Расчет переходных процессов системы автоматического регулирования дизеля с турбонаддувом с учетом нелинейных характеристик*. Известия ВУЗов. Машиностроение, 1969, № 10, с. 102-108.

[3] Крутов В.И. *Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания*. Москва: Машиностроение, 1989. 416 с.

[4] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.

[5] Хрящев Ю.Е. *Обоснование перспективных способов и разработка средств регулирования частоты вращения автомобильных дизелей*: Автореферат дисс. ... докт. техн. наук. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 32 с.

[6] Крутов В.И. *Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект*. Москва: Машиностроение, 1978. 472 с.

[7] Юлдашев А.К., Шестаков А.А., Мамин Б.В. *Критерий оценки динамических качеств автотракторных дизелей*. Двигателестроение, 1984, № 6, с. 38-41.