

УДК 621.436

Моделирование эмиссии оксидов азота в цилиндре тракторного газодизеля Modeling of nitrogen oxides emission in the cylinder of tractor gas-diesel engine

В. А. ЛИХАНОВ, д-р техн. наук
О. П. ЛОПАТИН, канд. техн. наук

Вятская государственная сельскохозяйственная
академия, Киров, Россия,
nirs_vsaa@mail.ru

V. A. LIKHANOV, DSc in Engineering
O. P. LOPATIN, PhD in Engineering

Vyatka State Agricultural Academy,
Kirov, Russia,
nirs_vsaa@mail.ru

Статья посвящена вопросам моделирования процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля при работе на компримированном природном газе. Горение в цилиндре газодизеля метановоздушной смеси, воспламененной распыленным запальным дизельным топливом, впрыснутым через многоструйную форсунку, увеличивает масштаб турбулентных пульсаций, что приводит к интенсификации теплообмена в факеле и значительно увеличивает скорость образования и разложения оксидов азота. С учетом результатов моделирования кинетических систем для расчета кинетики образования оксидов азота при горении природного газа и дизельного топлива, известных данных о протекании элементарных реакций при сгорании метана, а также влияния применения турбонаддува, промежуточного охлаждения наддувочного воздуха и рециркуляции отработавших газов проведен расчет ожидаемых выбросов оксидов азота в цилиндре и их содержания в отработавших газах газодизеля. При математическом моделировании образования оксида азота в цилиндре газодизеля процесс сгорания условно разделен на две зоны: свежей смеси и продуктов сгорания. Зона свежей смеси представляет собой смесь воздуха с рециркулируемыми (если расчет ведется при рециркуляции) и остаточными газами. Перед началом сгорания эта зона занимает весь объем цилиндра. В ходе сгорания происходит увеличение объема зоны продуктов сгорания. Проведены теоретические исследования на основании разработанной математической модели для расчета оксидов азота в цилиндрах газодизелей 4Ч 11,0/12,5 и 4ЧН 11,0/12,5. Подтверждена высокая сходимость данных теоретических расчетов объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота с результатами экспериментальных исследований (разница не превышает 5 %).

Ключевые слова: дизель; компримированный природный газ; турбонаддув; оксиды азота; токсичность.

The article is devoted to the modeling of process of nitrogen oxides formation in the cylinder of diesel engine operating on compressed natural gas. The combustion of methane-air mixture, ignited by atomized pilot oil that is injected through multijet nozzle, in the cylinder of gas-diesel engine increases the rate of turbulent fluctuations, which leads to intensification of heat and mass exchange in the plume, and significantly increases the rate of formation and decomposition of nitrogen oxides. The calculation of expected emissions of nitrogen oxides in the cylinder of diesel engine and their content in the exhaust gases is carried out. It is done on the basis of the results of kinetic systems modeling for calculation of the kinetics of nitrogen oxides formation during combustion of natural gas and diesel fuel, taking into account the influence of turbocharging, intermediate cooling of charged air and exhaust gas recirculation. In the mathematical modeling of nitrogen oxide formation in the cylinder of diesel engine, the combustion process is divided into two zones, namely the zone of fresh mixture and the zone of combustion products. First zone is a mixture of fresh air with recycled gases (if there is a process of recycling) and residual gases. Before combustion starts, this zone occupies the whole cylinder. During combustion, the volume of zone of combustion products increases. Theoretical researches are carried out on the basis of developed mathematical model for calculation of nitrogen oxides in the cylinders of 4Ch 11.0/12.5 and 4ChN 11.0/12.5 diesel engines. The high precision of theoretical calculations of volumetric content and mass concentration of nitrogen oxides is confirmed, compared to the results of experimental researches (the difference does not exceed 5 %).

Keywords: diesel engine; compressed natural gas; turbocharging; nitrogen oxides; toxicity.

Введение

Оксиды азота NO_x , и особенно диоксид азота NO_2 , — одни из главных составляющих загрязнения атмосферного воздуха городов. В основном NO_x образуются в процессе горения углеводородного топлива при высоких температурах (выше 1000 °С) и затем в атмосфере трансформируются в NO_2 .

При сгорании метановоздушной смеси в цилиндре газодизеля в результате термического и окислительного пиролиза молекул углеводородов жидкого топлива и метана образуются активные центры цепных реакций — атомы и радикалы, локальная концентрация которых значительна [1]. В то же время имеются доказательства,

что на образование оксидов азота в цилиндре газодизеля существенное влияние оказывает не только тепловой режим, но и локальная концентрация активных центров.

Кроме того, процесс образования NO_x зависит от скорости расходования в зоне реакции активных частиц и кислорода и конкуренции этих процессов между собой. Взаимодействие образующихся в результате пиролиза топлива атомов и радикалов с азотом, содержащимся в метановоздушной смеси, приводит в итоге к образованию NO_x . Скорость подобных превращений зависит от ряда факторов: концентрации азота в зоне реакции, скорости сгорания топливовоздушной смеси, скорости конкурирующих реакций активных центров и кислорода [2].

Цель исследования

Горение в цилиндре газодизеля метановоздушной смеси, воспламененной распыленным запальным дизельным топливом (ДТ), впрыснутым через многоструйную форсунку, увеличивает масштаб турбулентных пульсаций, что приводит к интенсификации теплообмена в факеле и значительно увеличивает скорость образования и разложения NO_x . Поэтому, опираясь на результаты моделирования кинетических систем для расчета кинетики образования оксидов азота при горении компримированного природного газа (КПГ) и ДТ, суммируя известные данные о протекании элементарных реакций при сгорании метана и выделяя из них наиболее весомые, а также учитывая влияние применения турбонаддува, промежуточного охлаждения наддувочного воздуха (ПОНВ) и рециркуляции отработавших газов (РОГ), необходимо провести расчет ожидаемых выбросов оксидов азота и предусмотреть меры по их снижению до величин, наиболее близких к минимальным значениям [3].

Материалы и методы

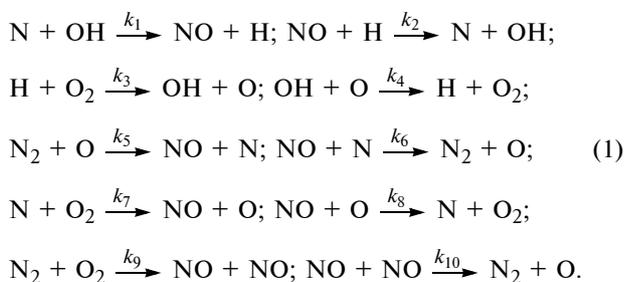
В Вятской ГСХА на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования по переводу тракторных дизелей 4Ч 11,0/12,5 и 4ЧН 11,0/12,5 на КПГ [4, 5]. Разработаны теории процесса образования оксидов азота в цилиндрах газодизелей, в т.ч. с РОГ, наддувом и ПОНВ.

При математическом моделировании образования оксида азота в цилиндре газодизеля процесс сгорания условно разделен на две зоны: свежей смеси и продуктов сгорания. Зона свежей смеси представляет собой смесь воздуха с рециркулируемыми (если расчет ведется при РОГ) и остаточными газами. Перед началом сгорания эта зона занимает весь объем цилиндра. В ходе сгорания происходит увеличение объема зоны продуктов сгорания.

Для определения давления и средней по объему цилиндра температуры рабочего тела в различные моменты процесса сгорания применено допущение о мгновенном перемешивании продуктов сгорания и свежей смеси. Расчет производится последовательно для каждого шага $\Delta\varphi$. При этом задача сводится к определению параметров в конце участка (индекс 2), так как в начале участка (индекс 1) эти параметры известны и равны соответствующим значениям в конце предыдущего шага расчета [6].

Результаты и их обсуждение

Согласно химизму процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля [7], основной вклад в образование NO вносят следующие реакции:



Исходное уравнение скорости образования оксида азота в цилиндре газодизеля:

$$\begin{aligned} \frac{dr_{\text{NO}}}{d\tau} &= k_1 r_{\text{N}} r_{\text{OH}} - k_2 r_{\text{NO}} r_{\text{H}} + k_5 r_{\text{N}_2} r_{\text{O}} - k_6 r_{\text{NO}} r_{\text{N}} + \\ &+ k_7 r_{\text{N}} r_{\text{O}_2} - k_8 r_{\text{NO}} r_{\text{O}} + k_9 r_{\text{N}_2} r_{\text{O}_2} - k_{10} r_{\text{NO}}^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где k_i — константа скорости i -й реакции, $1/\text{с}$; r_i — объемное содержание i -го компонента.

Уравнения для изменения объемного содержания атомарного азота и кислорода во времени:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr_{\text{N}}}{d\tau} &= -k_1 r_{\text{N}} r_{\text{OH}} + k_2 r_{\text{NO}} r_{\text{H}} + k_5 r_{\text{N}_2} r_{\text{O}} - \\ &- k_6 r_{\text{NO}} r_{\text{N}} - k_7 r_{\text{N}} r_{\text{O}_2} + k_8 r_{\text{NO}} r_{\text{O}}; \\ \frac{dr_{\text{O}}}{d\tau} &= k_3 r_{\text{H}} r_{\text{O}_2} - k_4 r_{\text{OH}} r_{\text{O}} - k_5 r_{\text{N}_2} r_{\text{O}} + \\ &+ k_6 r_{\text{NO}} r_{\text{N}} + k_7 r_{\text{N}} r_{\text{O}_2} - k_8 r_{\text{NO}} r_{\text{O}} + k_{10} r_{\text{NO}}^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Приложив принцип стационарных содержаний к атомарным газам N и O , приравняем к нулю выражения $dr_{\text{N}}/d\tau$ и $dr_{\text{O}}/d\tau$. Решив эту алгебраическую систему уравнений, выразим объемные содержания r_{N} и r_{OH} :

$$\left\{ \begin{aligned} r_{\text{N}} &= \frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A}; \\ r_{\text{OH}} &= \left\{ k_3 r_{\text{H}} r_{\text{O}_2} - k_5 r_{\text{N}_2} r_{\text{O}} + \left[\left(\sqrt{B^2 - 4AC} - B \right) / 2A \right] \times \right. \\ &\times \left. \left(k_6 r_{\text{NO}} + k_7 r_{\text{O}_2} \right) - k_8 r_{\text{NO}} r_{\text{O}} \right\} / k_4 r_{\text{O}}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где A , B , C — коэффициенты уравнения вида $A r_{\text{N}}^2 + B r_{\text{N}} + C = 0$ для определения объемного содержания атомарного азота, $1/\text{с}^2$.

$$\begin{aligned} A &= k_1 (k_6 r_{\text{NO}} + k_7 r_{\text{O}_2}); \\ B &= k_1 (k_3 r_{\text{H}} r_{\text{O}_2} - k_5 r_{\text{N}_2} r_{\text{O}} - k_8 r_{\text{NO}} r_{\text{O}}) + \\ &+ k_4 r_{\text{O}} (k_6 r_{\text{NO}} + k_7 r_{\text{O}_2}); \\ C &= -k_4 r_{\text{O}} (k_2 r_{\text{NO}} r_{\text{H}} + k_5 r_{\text{N}_2} r_{\text{O}} + k_8 r_{\text{NO}} r_{\text{O}}). \end{aligned}$$

Подставив значения объемных содержаний r_{N} и r_{OH} с учетом коэффициентов A , B , C в уравнение скорости образования оксида азота (2), получим:

$$\begin{aligned} \frac{dr_{\text{NO}}}{d\tau} &= -\frac{1}{2k_1} \sqrt{B^2 - 4AC} + \\ &+ \frac{k_4^2 r_{\text{O}}}{2k_1} (k_6 r_{\text{NO}} + k_7 r_{\text{O}_2}) + \frac{1}{2} k_3 r_{\text{H}} r_{\text{O}_2} + \\ &+ \frac{2k_4 k_5 k_6 r_{\text{NO}} r_{\text{N}_2} r_{\text{O}} (k_6 + 2k_7 r_{\text{O}_2}) + k_1 k_5^2 k_7 r_{\text{N}_2}^2 r_{\text{O}_2} r_{\text{O}}}{4k_4 (k_6 r_{\text{NO}} + k_7 r_{\text{O}_2})^2} + \end{aligned}$$

$$+ k_5 r_{N_2} r_{O_2} + \frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A} (k_7 r_{O_2} - k_6 r_{NO}) - \frac{1}{2} k_8 r_{NO} r_{O_2} + k_9 r_{N_2} r_{O_2} - k_{10} r_{NO}^2. \quad (5)$$

Запишем уравнение Клапейрона—Менделеева в виде:

$$M_i/V_2 = 10^3 p_2 r_i / RT_2, \quad (6)$$

где M_i — число молей i -го компонента, кмоль; $V_2 r_i$ — парциальный объем i -го компонента в конце расчетного участка, м³; p_2 — давление в конце расчетного участка, МПа; T_2 — температура в конце расчетного участка, К; R — универсальная газовая постоянная.

Выразив скорость образования NO на примере реакции $N + OH \xrightarrow{k_1} NO + H$ с учетом (6), получим:

$$k_1 \frac{M_N M_{OH}}{V_2^2} = \frac{10^3 p_2}{RT_2} k_1 r_N r_{OH}, \quad (7)$$

где k_1 — константа скорости реакции, м³/(кмоль · с).

Из выражения (6) имеем:

$$r_N = \frac{10^{-3} RT_2 M_N}{p_2 V_2}; \quad r_{OH} = \frac{10^{-3} RT_2 M_{OH}}{p_2 V_2}. \quad (8)$$

Подставив выражения r_N и r_{OH} в уравнение (7), получим:

$$k_i = k_i' \frac{10^3 p_2}{RT_2}, \quad (9)$$

где k_i' — константа скорости i -й реакции, м³/(кмоль · с).

Принимая во внимание, что $\tau = \varphi/6n$, с учетом выражения (9) уравнение скорости образования NO в цилиндре газодизеля примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dr_{NO}}{d\varphi} = & \frac{10^3 p_2}{6nRT_2} \left[-\frac{1}{2k_1'} \sqrt{(B')^2 - 4A'C'} + \frac{(k_4')^2 r_{O_2}}{2k_1'} \times \right. \\ & \times (k_6' r_{NO} + k_7' r_{O_2}) + \frac{1}{2} k_3' r_H r_{O_2} + \\ & + k_5' r_{N_2} r_{O_2} + k_9' r_{N_2} r_{O_2} - k_{10}' r_{NO}^2 + \\ & + \frac{2k_4' k_5' k_6' r_{NO} r_{N_2} r_{O_2} (k_6' + 2k_7' r_{O_2}) + k_1' (k_5')^2 k_7' r_{N_2}^2 r_{O_2} r_{O_2}}{4k_4' (k_6' r_{NO} + k_7' r_{O_2})^2} + \\ & \left. + \frac{\sqrt{(B')^2 - 4A'C'} - B'}{2A'} (k_7' r_{O_2} - k_6' r_{NO}) - \frac{1}{2} k_8' r_{NO} r_{O_2} \right], \quad (10) \end{aligned}$$

где коэффициенты A' , B' , C' определяются следующими уравнениями.

$$A' = \frac{10^6 p_2^2}{R^2 T_2^2} k_1' (k_6' r_{NO} + k_7' r_{O_2});$$

$$\begin{aligned} B' = & \frac{10^6 p_2^2}{R^2 T_2^2} \left[k_1' (k_3' r_H r_{O_2} - k_5' r_{N_2} r_{O_2} - k_8' r_{NO} r_{O_2}) + \right. \\ & \left. + k_4' r_{O_2} (k_6' r_{NO} + k_7' r_{O_2}) \right]; \end{aligned}$$

$$C' = -\frac{10^6 p_2^2}{R^2 T_2^2} k_4' r_{O_2} (k_2' r_{NO} r_H + k_5' r_{N_2} r_{O_2} + k_8' r_{NO} r_{O_2}).$$

Подставив значения коэффициентов A' , B' , C' в уравнение (10), после преобразований получим:

$$\begin{aligned} \frac{dr_{NO}}{d\varphi} = & \frac{10^3 p_2}{6nRT_2} \left[\frac{1}{C_1} + \frac{r_{NO}}{C_2} + \frac{1}{C_3 r_{NO}} + \frac{1}{C_4 r_{NO}^2} + \right. \\ & \left. + \sqrt{C_5 r_{NO}^2 + C_6 r_{NO}} + C_7 \left(\frac{1}{C_8 r_{NO}} - \frac{1}{C_9} - \frac{r_{NO}}{C_{10}} \right) + \frac{r_{NO}^2}{C_{11}} \right], \quad (11) \end{aligned}$$

где C_i — постоянная величина для данного шага расчета.

$$\begin{aligned} C_1 = & \left(\frac{2k_1'}{(k_4')^2 k_7' r_{O_2} r_{O_2}} + \frac{2}{k_3' r_H r_{O_2}} + \frac{1}{k_5' r_{N_2} r_{O_2}} + \frac{1}{k_9' r_{N_2} r_{O_2}} + \right. \\ & + \frac{4k_4' k_7' r_{O_2}}{k_1' (k_5')^2 r_{N_2}^2 r_{O_2}} + \frac{4k_7' r_{O_2}}{k_5' k_6' r_{N_2} r_{O_2} + 2k_5' k_7' r_{N_2} r_{O_2} r_{O_2}} + \\ & + \frac{2k_6'}{k_3' k_6' r_H r_{O_2} - k_5' k_6' r_{N_2} r_{O_2} + k_7' k_8' r_{O_2} r_{O_2}} + \\ & \left. + \frac{2k_1' r_{O_2}}{k_1' k_5' r_{N_2} r_{O_2} r_{O_2} - k_1' k_3' r_H r_{O_2}^2 - k_4' k_7' r_{O_2}^2 r_{O_2}} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 = & \left(\frac{2k_1'}{(k_4')^2 k_6' r_{O_2}} - \frac{2}{k_8' r_{O_2}} + \right. \\ & + \frac{2(k_7')^2 r_{O_2}^2}{k_5' (k_6')^2 r_{N_2} r_{O_2} + 2k_5' k_6' k_7' r_{N_2} r_{O_2} r_{O_2}} + \\ & + \frac{2k_7' r_{O_2}}{k_3' k_6' r_H r_{O_2} - k_5' k_6' r_{N_2} r_{O_2} + k_7' k_8' r_{O_2} r_{O_2}} + \\ & \left. + \frac{2k_1'}{k_4' k_6' r_{O_2} - k_1' k_8' r_{O_2}} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_3 = & \left(\frac{2k_6'}{k_5' k_6' r_{N_2} r_{O_2} + k_5' k_7' r_{N_2} r_{O_2} r_{O_2}} + \frac{8k_4' k_6'}{k_1' (k_5')^2 r_{N_2}^2 r_{O_2}} + \right. \\ & + \frac{2k_1' k_6'}{k_1' k_5' k_7' r_{N_2} r_{O_2} r_{O_2} - k_1' k_3' k_7' r_H r_{O_2}^2} + \\ & \left. + \frac{2k_1'}{k_4' k_6' r_{O_2} - k_1' (k_7')^2 r_{O_2}^2 r_{O_2}} \right); \end{aligned}$$

$$C_4 = \frac{4k_4' (k_6')^2}{k_1' (k_5')^2 k_7' r_{N_2}^2 r_{O_2} r_{O_2}};$$

$$C_5 = (k_1')^2 (k_8')^2 r_{O_2}^2 + 2k_1' k_4' k_6' k_8' r_{O_2}^2 + (k_4')^2 (k_6')^2 r_{O_2}^2 + 4k_1' k_2' k_4' k_6' r_H r_{O_2};$$

$$\begin{aligned} C_6 = & \left(2k_1' r_H r_{O_2} r_{O_2} (-k_1' k_3' k_8' + k_3' k_4' k_6' + 2k_2' k_4' k_7') + \right. \\ & \left. + 2r_{O_2}^2 (k_1' k_8' + k_4' k_6') (k_1' k_5' r_{N_2} + k_4' k_7' r_{O_2}) \right); \end{aligned}$$

$$C_7 = \left((k_1')^2 (k_3')^2 r_H^2 r_{O_2}^2 - 2(k_1')^2 k_3' k_5' r_{N_2} r_{O_2} r_{HrO} + \right. \\ \left. + 2k_1' k_3' k_4' k_7' r_H r_{O_2}^2 + (k_1')^2 (k_5')^2 r_{N_2}^2 r_{O_2}^2 + \right. \\ \left. + 2k_1' k_4' k_5' k_7' r_{N_2} r_{O_2}^2 + (k_4')^2 (k_7')^2 r_{O_2}^2 r_{O_2}^2 \right);$$

$$C_8 = \frac{2k_1' k_6'}{k_7' r_{O_2}}; \quad C_9 = 2k_1'; \quad C_{10} = \frac{2k_1' k_7' r_{O_2}}{k_6'};$$

$$C_{11} = \frac{2k_1' k_7' r_{O_2}}{k_4' (k_6')^2 r_{O_2} - k_1' k_6' k_8' r_{O_2}} - \frac{1}{k_{10}'}$$

Интегрируя по частям при начальном условии $r_{NO} = r_{NO1}$ уравнение (11), получим содержание оксида азота в конце участка расчета:

$$r_{NO2} = r_{NO1} + \frac{10^3 p_2 \Delta \varphi}{C_1 6nRT_2} - \frac{1}{C_1} \left(C_2 (\ln r_{NO2} - \ln r_{NO1}) + \right. \\ \left. + \frac{C_3}{2} (r_{NO2}^2 - r_{NO1}^2) + \frac{C_4}{3} (r_{NO2}^3 - r_{NO1}^3) + \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{C_5}{r_{NO2}^2} + \frac{C_6}{r_{NO2}} + C_7 / C_5 C_8} - \sqrt{\frac{C_5}{r_{NO1}^2} + \frac{C_6}{r_{NO1}} + C_7 / C_5 C_8} + \right. \\ \left. + \frac{C_6}{2 C_8 \sqrt{C_5}} \ln \left(\frac{2C_5}{r_{NO1}} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{\frac{C_5}{r_{NO1}^2} + \frac{C_6}{r_{NO1}} + C_7} \right) - \right. \\ \left. - \frac{C_6}{2 C_8 \sqrt{C_5}} \ln \left(\frac{2C_5}{r_{NO2}} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{\frac{C_5}{r_{NO2}^2} + \frac{C_6}{r_{NO2}} + C_7} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{C_{10}} \left(\sqrt{C_5 r_{NO2}^2 + C_6 r_{NO2} + C_7} - \sqrt{C_5 r_{NO1}^2 + C_6 r_{NO1} + C_7} \right) + \ln \left(2C_5 r_{NO2} + C_6 + \right. \right. \\ \left. \left. + 2\sqrt{C_5} \sqrt{C_5 r_{NO2}^2 + C_6 r_{NO2} + C_7} \right) \left(\frac{1}{C_9 \sqrt{C_5}} - \frac{C_6}{2 C_{10} \sqrt{C_5^3}} \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{C_6}{2 C_{10} \sqrt{C_5^3}} - \frac{1}{C_9 \sqrt{C_5}} \right) \ln \left(2C_5 r_{NO1} + C_6 + \right. \right. \\ \left. \left. + 2\sqrt{C_5} \sqrt{C_5 r_{NO1}^2 + C_6 r_{NO1} + C_7} \right) \right), \quad (12)$$

где $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ — изменение угла поворота кривошипа на участке расчета.

Решив уравнение (12) относительно r_{NO2} , получим объемное содержание оксида азота в конце участка расчета.

Изменение доли оксида азота в продуктах сгорания, образовавшихся ранее:

$$\Delta r_{NO} = r_{NO2} - r_{NO1}. \quad (13)$$

На основании предложенных моделей проведены теоретические расчеты объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндрах газодизелей 4Ч 11,0/12,5 и 4ЧН 11,0/12,5 [8, 9].

На рис. 1 представлены результаты теоретических расчетов изменения объемного содержания r_{NO_x} и мас-

совой концентрации C_{NO_x} оксидов азота в цилиндре дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с турбонаддувом при работе на ДТ и КПГ в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ) после верхней мертвой точки для номинальной частоты вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ при установочном угле опережения впрыскивания топлива (УОВТ), равном $\Theta_{впр} = 11^\circ$.

Анализ графиков на рис. 1 показывает, что при работе дизеля на ДТ максимальное теоретическое значение r_{NO_x} составляет 260 ppm, максимальное значение

$C_{NO_x} = 0,37 \text{ г/м}^3$ при $\varphi = 14^\circ$. При работе дизеля на КПГ максимальные теоретические значения: $r_{NO_x} = 280 \text{ ppm}$,

$C_{NO_x} = 0,4 \text{ г/м}^3$ при $\varphi = 16^\circ$.

На рис. 2 представлены результаты теоретических расчетов изменения объемного содержания r_{NO_x} и мас-

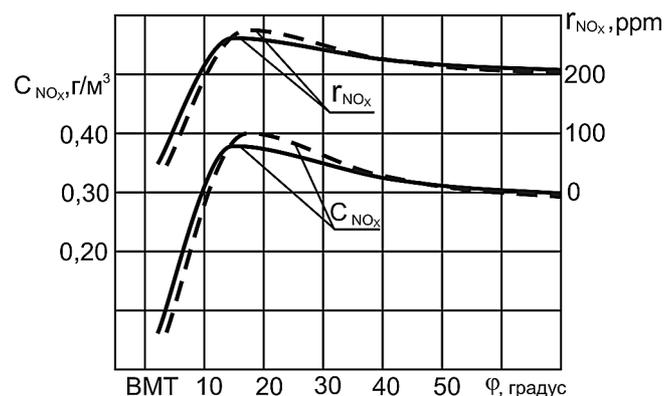


Рис. 1. Результаты теоретических расчетов изменения объемного содержания r_{NO_x} и массовой концентрации C_{NO_x} оксидов азота в цилиндре дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с турбонаддувом в зависимости от изменения угла ПКВ при $\Theta_{впр} = 11^\circ$, $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,84 \text{ МПа}$:

— — дизельный процесс, ---- — газодизельный процесс

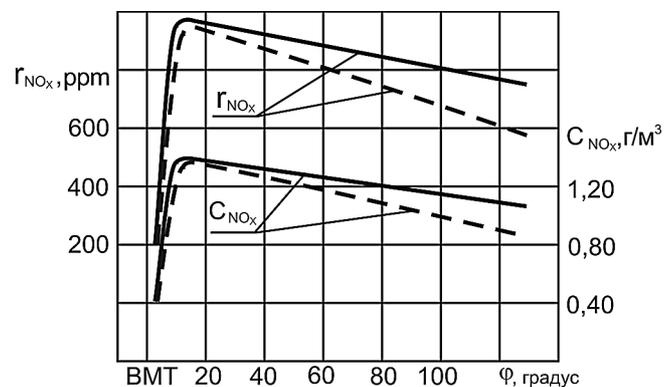


Рис. 2. Результаты теоретических расчетов изменения объемного содержания r_{NO_x} и массовой концентрации C_{NO_x} оксидов азота в цилиндре дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ в зависимости от изменения угла ПКВ при работе на оптимальных установочных УОВТ при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,947 \text{ МПа}$:

— — дизельный процесс, ---- — газодизельный процесс

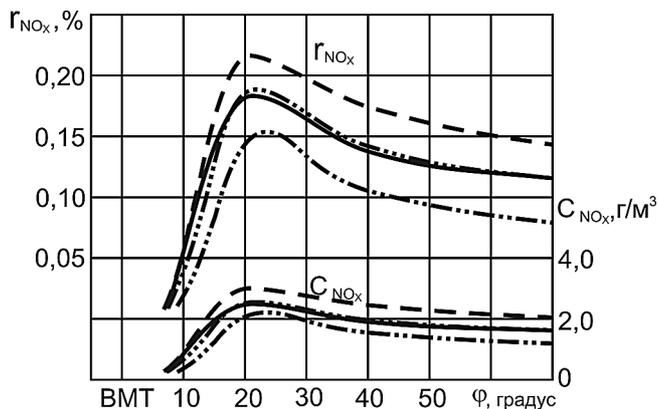


Рис. 3. Результаты теоретических расчетов объемного содержания r_{NO_x} и массовой концентрации C_{NO_x} оксидов азота в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе с РОГ в зависимости от изменения угла ПКВ при $\Theta_{впр} = 23^\circ$, $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$:

— — дизельный процесс; ---- — газодизельный процесс; — газодизельный процесс с 10 %-ной РОГ; - · - · - — газодизельный процесс с 20 %-ной РОГ

совой концентрации C_{NO_x} оксидов азота в цилиндре дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ при работе на ДТ и КПП в зависимости от угла ПКВ для номинальной частоты вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,947 \text{ МПа}$ при оптимальных установочных УОВТ (при работе на КПП оптимальен $\Theta_{впр} = 7^\circ$, а при работе на ДТ — $\Theta_{впр} = 9^\circ$).

Анализируя графики на рис. 2, можно отметить, что при работе дизеля на ДТ максимальные теоретические значения: $r_{NO_x} = 970 \text{ ppm}$, $C_{NO_x} = 1,39 \text{ г/м}^3$ при $\varphi_{NO_x \text{ max}} = 13^\circ$. В момент открытия выпускного клапана $r_{NO_x} = 740 \text{ ppm}$, $C_{NO_x} = 1,07 \text{ г/м}^3$ при $\varphi = 130^\circ$ [10, 11]. При работе дизеля на КПП максимальные теоретические значения: $r_{NO_x} = 940 \text{ ppm}$, $C_{NO_x} = 1,36 \text{ г/м}^3$ при $\varphi_{NO_x \text{ max}} = 15,5^\circ$. В момент открытия выпускного клапана $r_{NO_x} = 570 \text{ ppm}$, $C_{NO_x} = 0,82 \text{ г/м}^3$.

На рис. 3 представлены результаты теоретических расчетов изменения объемного содержания r_{NO_x} и массовой концентрации C_{NO_x} оксидов азота в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе с РОГ в зависимости от угла ПКВ на оптимальном установочном УОВТ $\Theta_{впр} = 23^\circ$ для номинальной частоты вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,64 \text{ МПа}$.

Из рис. 3 видно, что характер протекания кривых для газодизеля с РОГ сохраняется. Так, при работе на ДТ максимальные теоретические значения составляют: $r_{NO_x} = 0,17 \%$, $C_{NO_x} = 2,45 \text{ г/м}^3$ при $\varphi = 20^\circ$. При работе на КПП максимальные теоретические значения: $r_{NO_x} = 0,22 \%$, $C_{NO_x} = 3,17 \text{ г/м}^3$ при $\varphi = 21^\circ$. Применение 10 %-ной РОГ на газодизеле приводит к снижению объемного содержания и массовой концентрации

оксидов азота примерно до уровня дизельного процесса при $\varphi = 70^\circ$, а применение 20 %-ной РОГ снижает содержание оксидов азота при этом же угле в 2 раза [12].

Выводы

В результате исследований, проведенных на основе разработанной математической модели для расчета оксидов азота в цилиндрах газодизелей 4Ч 11,0/12,5 и 4ЧН 11,0/12,5, получены теоретические данные по объемному содержанию r_{NO_x} и массовой концентрации C_{NO_x} оксидов азота. Подтверждена высокая сходимость расчетных данных с результатами экспериментальных исследований (разница не превышает 5 %).

Литература и источники

1. Зельдович Я. Б., Садовников П. А., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 148 с.
2. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 2-е изд., доп. М.: Наука, 1966. 688 с.
3. Лопатин О. П. Улучшение экологических показателей тракторного дизеля путем применения природного газа и рециркуляции // Инновационные направления развития АПК и повышение конкурентоспособности предприятий, отраслей и комплексов — вклад молодых ученых: Мат-лы 18-й междунар. науч.-практ. конф. Ярославль: Ярославская ГСХА, 2015. С. 30—34.
4. Лопатин О. П. Разработка программы по применению оборудования для испытания газодизелей // Молодой ученый. 2015, № 12 (92). С. 229—232.
5. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование показателей процесса сгорания в тракторном дизеле при применении природного газа и рециркуляции, метано- и этано-топливных эмульсий // Тракторы и сельхозмашины. 2015, № 9. С. 3—5.
6. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.
7. Лопатин О. П. Химизм процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015, № 3 (16). С. 28—30.
8. Лопатин О. П. Исследование индикаторных показателей газодизеля при работе с рециркуляцией отработавших газов // Молодой ученый. 2015, № 10 (90). С. 253—255.
9. Лопатин О. П. Результаты индицирования рабочего процесса газодизеля на режиме максимального крутящего момента // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015, № 5 (18). С. 8—9.
10. Лопатин О. П. Влияние степени рециркуляции на характеристики процесса сгорания тракторного газодизеля // Молодой ученый. 2015, № 14. С. 166—168.
11. Лопатин О. П. Влияние степени рециркуляции отработавших газов на эффективные и экологические показатели дизеля // Приволжский научный вестник. 2015, № 5—1 (45). С. 90—92.
12. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе, метано- и этано-топливных эмульсиях // Транспорт на альтернативном топливе. 2016, № 2 (50). С. 43—49.

References

1. Zel'dovich Ya. B., Sadovnikov P. A., Frank-Kamenetskiy D. A. *Okislenie azota pri gorenii* [Oxidation of nitrogen in combustion]. Moscow—Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1947, 148 p.
2. Zel'dovich Ya. B., Rayzer Yu. P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 688 p.

Окончание статьи В. А. Лиханова и О. П. Лопатина. Начало см. на стр. 3

3. Lopatin O. P. Improving the environmental performance of tractor diesel engine by the use of natural gas and recirculation. *Innovatsionnye napravleniya razvitiya APK i povyshenie konkurentosposobnosti predpriyatiy, otrasley i kompleksov — vklad molodykh uchenykh. Mat-ly 18-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Innovative trends of development of agroindustrial complex and improvement of competitiveness of enterprises, industries and complexes — the contribution of young scientists. Proc. of the 18th int. sci. and pract. conf.]. Yaroslavl, Yaroslavl State Agricultural Academy, 2015, pp. 30—34 (in Russ.).

4. Lopatin O. P. Development of a program for the use of equipment for gas-diesel engines testing. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 12 (92), pp. 229—232 (in Russ.).

5. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Investigation of indicators of combustion process in tractor diesel engine with the use of natural gas and recirculation, methanol and ethanol fuel emulsions. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2015, no. 9, pp. 3—5 (in Russ.).

6. Zvonov V. A. *Toksichnost' dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Toxicity of internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 160 p.

7. Lopatin O. P. Chemistry of nitrogen oxides formation in the cylinder of gas-diesel engine. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya*, 2015, no. 3 (16), pp. 28—30 (in Russ.).

8. Lopatin O. P. Investigation of indicator parameters of gas-diesel engine operating with exhaust gases recirculation. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 10 (90), pp. 253—255 (in Russ.).

9. Lopatin O. P. Results of indexing of gas-diesel engine operating process at maximum torque. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya*, 2015, no. 5 (18), pp. 8—9 (in Russ.).

10. Lopatin O. P. Influence of the degree of recirculation on the characteristics of combustion process of tractor gas-diesel engine. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 14, pp. 166—168 (in Russ.).

11. Lopatin O. P. Influence of the degree of exhaust gases recirculation on efficiency and environmental performance of a diesel engine. *Privolzhskiy nauchnyy vestnik*, 2015, no. 5—1 (45), pp. 90—92 (in Russ.).

12. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Study of power and economic characteristics of 4Ch 11.0/12.5 diesel engine operating on natural gas, methanol and ethanol fuel emulsions. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2016, no. 2 (50), pp. 43—49 (in Russ.).