

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В. И. Байков, Н. В. Коляго, Т. В. Сидорович, Н. Г. Васкевич

*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
kolyago@hmti.ac.by*

Один из путей снижения оксидов азота в продуктах сгорания дизельных двигателей (ДДВС) состоит в изменении состава топливно-воздушной смеси на входе в двигатель с целью снижения степени окисления азота в период сгорания топлива. На основе реализованного алгоритма расчета процессов в ДДВС и методики расчета образования оксидов азота в цилиндре ДДВС проведено исследование влияния состава входной топливно-воздушной смеси на работу двигателя и содержание оксидов азота в выхлопных газах.

Введение. По оценкам Министерства природных ресурсов и охране окружающей среды Республики Беларусь большая часть выброшенных в атмосферу оксида углерода (86–89%), углеводородов (66–68%) и оксидов азота (59–63%) обусловлена работой автотранспорта [1]. Основными токсичными компонентами отработавших газов дизельных двигателей (ДДВС) являются оксиды азота (NO_x). Они являются основными реагентами в образовании фотохимического смога и озона в атмосфере городов, оказывают негативное влияние на нервную и сердечно-сосудистую системы человека, кровеносные органы, печень, респираторную систему человека, приводя к онкологическим заболеваниям. Небольшие концентрации оксидов азота в атмосфере приводят к постепенному отравлению организма, причем каких-либо нейтрализующих средств нет. Кроме того, NO_x участвуют в цепных реакциях, удаляя озон из стратосферы, что вызывает рост ультрафиолетового излучения, достигающего поверхности Земли [2].

Несмотря на широкое использование в настоящее время различных методов снижения оксидов азота в продуктах сгорания дизельных двигателей (первичные методы – модификация процессов горения, вторичные – процессы дожигания, которые химически преобразуют NO_x в безвредные продукты), задача регулирования их количества в выхлопных газах по-прежнему является актуальной [3]. Один из путей решения – изменение состава топливно-воздушной смеси на входе в двигатель.

Методика расчета образования оксидов азота в цилиндре ДДВС. В работе рассматривается дизельный двигатель внутреннего сгорания Минского моторного завода Д245.9ЕЗ: 4-х тактный поршневой четырехцилиндровый двигатель внутреннего сгорания с рядным вертикальным расположением цилиндров, с непосредственным впрыском дизельного топлива и воспламенением от сжатия, с турбонаддувом и охлаждением наддувочного воздуха [4].

Для получения наиболее выгодной эмиссии оксидов азота целесообразно и экономически оправданна разработка методов расчета состава продуктов сгорания. Расчетно-экспериментальное исследование образования NO_x в цилиндре двигателей показало, что максимальные достигнутые в процессе сгорания концентрации NO_x во всех случаях сохраняют постоянное значение в процессе расширения и выпуска [5]. Поэтому единственная возможность сократить выделение оксидов азота заключается в уменьшении степени окисления азота в период сгорания топлива [6].

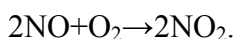
Установлено, что количество образовавшихся NO_x является функцией от температуры, концентрации молекулярного и атомарного кислорода, а также от времени реакции. На общее время реакции, которое определяется главным образом частотой вращения коленчатого вала двигателя и продолжительностью процесса сгорания, воздействовать можно лишь в ограниченных пределах. Для существенного уменьшения выделения NO_x практически имеются два пути: снижение температур в процессе сгорания и проведение его с недостатком кислорода в зоне сгорания. Возможна также комбинация этих двух методов. При этом будет также изменяться и температура сгорания.

В настоящее время различают несколько путей образования оксидов азота: термический (по механизму Зельдовича), быстрое образование NO (по механизму Фенимора), образование NO из закиси азота [7]. Термический механизм образования оксида азота преобладает при высоких температурах ($T \geq 1700 \text{ K}$). Механизм быстрого образования NO преобладает в богатых пламенах и происходит при низких температурах ($T \approx 1000 \text{ K}$). При низких температурах и в условиях бедной смеси главным путем образования NO является образование NO из закиси азота, поскольку в условиях бедной смеси образование радикалов CH может быть подавлено и по механизму Фенимора образуется меньше NO , а низкие температуры подавляют образование NO по механизму Зельдовича. Образование оксидов азота из топливного азота в дизельных двигателях не происходит, поскольку при перегонке нефти азотистые соединения остаются в тяжелых фракциях. На основе теплового расчета дизельного двигателя внутреннего сгорания установлено, что основным способом образования оксидов азота из атмосферного азота и кислорода является термический путь по механизму Зельдовича, поскольку температура сгорания $T_z > 2000 \text{ K}$.

Основные положения термической теории: окисление азота происходит за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания; выход оксида азота определяется максимальной температурой горения, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химической природы топлива, участвующего в реакции; концентрация оксидов азота не превышает равновесную при максимальной температуре взрыва (в процессе расширения и выпуска концентрация NO не изменяется), Махе-эффект (неравномерное распределение температуры в зоне продуктов сгорания) заметно влияет на выход NO ; окисление азота происходит по цепному механизму [5, 8]:



Исследования [5] показывают, что при условиях, существующих в цилиндре дизельных двигателей в процессе сгорания, доля бимолекулярного механизма в общем процессе образования NO незначительна по сравнению с цепным механизмом. Установлено, что при максимальных температурах цикла в дизелях из оксидов азота практически образуется только NO (более 90 %) [9]. В выпускной системе двигателя при наличии кислорода в продуктах сгорания после выхода отработавших газов в атмосферу происходит окисление NO до NO_2 по реакции



В цилиндре дизелей происходит «закалка» оксидов азота на уровне максимальной концентрации. Таким образом, в процессе расширения и выпуска концентрация NO не изменяется [5].

В основу расчета образования оксидов азота в цилиндре дизельного двигателя взята методика В. А. Звонова [5]. Особенности методики являются: расчет равновесного состава в зоне продуктов сгорания для восемнадцати компонентов (O , O_2 , O_3 , H , H_2 , OH , H_2O , C , CO , CO_2 , CH_4 , N , N_2 , NO , NO_2 , NH_3 , HNO_3 , HCN), кинетический расчет образования термических

оксидов азота по цепному механизму Я.Б. Зельдовича [8]. Для определения равновесного состава продуктов сгорания, зависящего от температуры T , давления p и концентрации реагирующих веществ r , решалась система из 18 уравнений: 14 уравнений равновесия, 3 уравнения материального баланса, уравнение Дальтона.

Уравнения равновесия:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{p_{O_2}}{p_{O_2}^{1/2}} = \frac{K_{O_2}^{-1}}{K_{O_2}^{-1/2}}; \\
 K_2 &= \frac{p_{O_3}}{p_{O_2}^{3/2}} = \frac{K_{O_3}^{-1}}{K_{O_2}^{-3/2}}; \\
 K_3 &= \frac{p_H}{p_{H_2}^{1/2}} = \frac{K_H^{-1}}{K_{H_2}^{-1/2}}; \\
 K_4 &= \frac{p_{H_2}^2 p_{O_2}}{p_{H_2O}^2} = \frac{K_{H_2}^{-2} K_{O_2}^{-1}}{K_{H_2O}^{-2}}; \\
 K_5 &= \frac{p_{OH}}{p_{O_2}^{1/2} p_{H_2}^{1/2}} = \frac{K_{OH}^{-1}}{K_{O_2}^{-1/2} K_{H_2}^{-1/2}}; \\
 K_6 &= \frac{p_C p_{O_2}}{p_{CO_2}} = \frac{K_C^{-1} K_{O_2}^{-1}}{K_{CO_2}^{-1}}; \\
 K_7 &= \frac{p_C p_{O_2}^{1/2}}{p_{CO}} = \frac{K_C^{-1} K_{O_2}^{-1/2}}{K_{CO}^{-1}}; \\
 K_8 &= \frac{p_C p_{H_2}^2}{p_{CH_4}} = \frac{K_C^{-1} K_{H_2}^{-2}}{K_{CH_4}^{-1}}; \\
 K_9 &= \frac{p_N}{p_{N_2}^{1/2}} = \frac{K_N^{-1}}{K_{N_2}^{-1/2}}; \\
 K_{10} &= \frac{p_N p_O}{p_{NO}} = \frac{K_N^{-1} K_O^{-1}}{K_{NO}^{-1}}; \\
 K_{11} &= \frac{p_{O_2}^{1/2} p_{NO}}{p_{NO_2}} = \frac{K_{O_2}^{-1/2} K_{NO}^{-1}}{p_{NO_2}^{-1}}; \\
 K_{12} &= \frac{p_{N_2}^{1/2} p_{H_2}^{3/2}}{p_{NH_3}} = \frac{K_{N_2}^{-1/2} K_{H_2}^{-3/2}}{K_{NH_3}^{-1}}; \\
 K_{13} &= \frac{p_{NO}^3 p_{H_2O}}{p_{HNO_3}^2 p_{NO}} = \frac{K_{NO}^{-3} K_{H_2O}^{-1}}{K_{HNO_3}^{-2} K_{NO}^{-1}}; \\
 K_{14} &= \frac{p_C p_{N_2}^{1/2} p_{H_2}^{1/2}}{p_{HCN}} = \frac{K_C^{-1} K_{N_2}^{-1/2} K_{H_2}^{-1/2}}{K_{HCN}^{-1}}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $K_1 - K_{14}$ – константы равновесия; p_{el} – парциальное давление соответствующего компонента; K_{el} – константы диссоциации соответствующего элемента [10]. Константы равновесия выражаются из известных стандартных приведенных энергий Гиббса $(G_T - H_0)/T$ при температуре T и стандартных энтальпий образования $\Delta H_{0,el}$ при $T=0$ К (табл. 1):

$$K = p^{\sum_i v_i} \exp \frac{1}{R} \left[-\sum_i v_i \left(\frac{G_T - H_0}{T} \right)_i - \frac{\sum_i v_i \Delta H_{0,i}}{T} \right].$$

Таблица 1

Стандартные приведенные энергии Гиббса $(G_T - H_0)/T$ при температуре T и стандартные энтальпии образования $\Delta H_{0,el}$ при $T=0$ К ($x=T \cdot 10^{-4}$) [11, 12]

Элемент	$(G_T - H_0)/T$, Дж/(моль·К)	ΔH_0 , Дж/моль
O	$214,7962+21,2418\ln x+0,0002034x^2-0,05871x^{-1}-2,5011x+2,558x^2-0,531x^3$	246783
O ₂	$214,7962+33,5525\ln x-0,0051130x^2+0,43461x^{-1}+11,7687x-0,234x^2-1,284x^3$	0
O ₃	$353,2271+42,4371\ln x+0,017374x^2-0,46608x^{-1}-25,6741x+237,302x^2-183,754x^3$	144457
H	$166,8370+20,7862\ln x$	216034
H ₂	$188,5198+22,6034\ln x+0,0041769x^2-0,37600x^{-1}+40,4892x-23,282x^2+8,333x^3$	0
OH	$242,2451+23,1208\ln x+0,0030844x^2-0,34663x^{-1}+43,0709x-28,481x^2-10,714x^3$	39097
H ₂ O	$247,8955+25,3032\ln x+0,0008283x^2-0,22124x^{-1}+98,3806x-64,039x^2+23,304x^3$	-238913
C	$212,1425+21,5468\ln x-0,000373x^2+0,00566x^{-1}-6,0858x+9,734x^2-4,760x^3$	711185
CO	$267,8206+29,5948\ln x-0,0033154x^2+0,21826x^{-1}+27,4000x-20,970x^2+8,295x^3$	-113812
CO ₂	$323,4839+49,1852\ln x-0,0119101x^2+1,28551x^{-1}+49,0400x-40,304x^2+17,797x^3$	-393142
CH ₄	$256,0495+40,9175\ln x-0,0253751x^2+1,78548x^{-1}+240,126x-173,732x^2+72,624x^3$	-66630
N	$206,0706+21,1340\ln x-0,0004177x^2+0,03081x^{-1}-1,1261x-0,828x^2+3,086x^3$	470818
N ₂	$258,8513+28,3130\ln x-0,0030770x^2+0,15456x^{-1}+32,8162x-26,816x^2+11,319x^3$	0
NO	$284,6362+31,3395\ln x+0,0046731x^2+0,28280x^{-1}+23,5950x-19,718x^2+8,828x^3$	90761
NO ₂	$359,8964+53,5965\ln x-0,0162808x^2+1,52681x^{-1}+14,6851x-3,212x^2+3,346x^3$	37000
NH ₃	$263,133+34,4035\ln x-0,0096208x^2+0,66601x^{-1}+150,9643x-110,87x^2+43,738x^3$	-38950
HNO ₃	$463,9666+91,0895\ln x-0,0321326x^2+3,46902x^{-1}+46,8821x-39,308x^2+1,309x^3$	-124200
HCN	$375,5288+66,5347\ln x-0,02045726x^2+2,15360x^{-1}-7,2925x+2,096x^2+0,237x^3$	300000

Три уравнения материального баланса составляют на основе неизменности отношения количества атомов отдельных элементов в ходе реакции. Для составления уравнений используют данные из стехиометрических уравнений [5]:

$$\begin{aligned} \gamma_p &= 0.511; \\ \beta_p &= 0.26595; \\ \alpha_p &= \frac{1}{(2+0.5\gamma_p)\alpha} = \frac{0.443}{\alpha}. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом (5) три уравнения материального баланса имеют вид

$$\begin{aligned}
\alpha_p (p_O + 2p_{O_2} + 3p_{O_3} + p_{OH} + p_{H_2O} + 3p_{HNO_3} + p_{CO} + 2p_{CO_2} + 2p_{NO_2} + p_{NO}) &= \\
= p_C + p_{CO} + p_{CO_2} + p_{CH_4} + p_{HCN}; \\
\beta_p (p_{NO_2} + p_N + 2p_{N_2} + p_{NO} + p_{NH_3} + p_{HNO_3} + p_{HCN}) &= \\
= p_O + 2p_{O_2} + 3p_{O_3} + p_{OH} + p_{H_2O} + 3p_{HNO_3} + p_{CO} + 2p_{CO_2} + 2p_{NO_2} + p_{NO}; \\
\gamma_p (p_H + 2p_{H_2} + p_{OH} + 2p_{H_2O} + 4p_{CH_4} + 3p_{NH_3} + p_{HNO_3} + p_{HCN}) &= \\
= p_C + p_{CO} + p_{CO_2} + p_{CH_4} + p_{HCN}.
\end{aligned} \tag{6}$$

В уравнениях (6) количества атомов элементов выражены через парциальные давления.

Восемнадцатым уравнением является уравнение Дальтона, устанавливающее связь между полным давлением смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов:

$$\begin{aligned}
p = p_O + p_{O_2} + p_{O_3} + p_H + p_{H_2} + p_{OH} + p_{H_2O} + p_C + p_{CO} + p_{CO_2} + p_{CH_4} + p_N + p_{N_2} + \\
+ p_{NO} + p_{NO_2} + p_{NH_3} + p_{HNO_3} + p_{HCN}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Используя уравнения (4), (6) и (7), определяется равновесный состав продуктов сгорания, зависящий от температуры, давления и концентрации реагирующих веществ.

Для расчета можно также использовать аппроксимирующие уравнения для равновесных концентраций в зависимости от α , T , p в виде полиномов второй степени

$$r = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3,$$

где $x_1 = \frac{T - \frac{1500 + 2500}{2}}{\frac{2500 - 1500}{2}}$, $x_2 = \frac{\alpha - \frac{2 + 1.25}{2}}{\frac{2 - 1.25}{2}}$, $x_3 = \frac{p - \frac{121 + 21}{2} \cdot 10^5}{\frac{121 - 21}{2} \cdot 10^5}$, a_i – коэффициенты

аппроксимирующих полиномов (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов [5]

Коэффициенты	для кислорода O ₂ , млн ⁻¹	для оксида азота NO, %
a_0	74590	0.474
a_1	-3070	0.596
a_2	29700	0.147
a_3	106	-0.001
a_{11}	-1184	0.232
a_{22}	-6509	-0.040
a_{33}	-67	-0.007
a_{12}	-1037	0.141
a_{13}	-79	-0.001
a_{23}	112	-0.001

Характерная особенность процесса сгорания в дизеле – сгорание неоднородно распределенной по камере топливовоздушной смеси. В результате окисления азота определяющей является реакция (2), скорость которой зависит от концентрации атомарного кислорода r_O . Реакция (2) имеет высокую энергию активации за счет сильной тройной связи в молекуле азота N_2 , поэтому она является быстрой при высоких температурах. При низких температурах она медленная, поэтому для достижения ее равновесия требуется гораздо больше времени, чем для смеси в области высокой температуры. Поскольку скорость реакции (2) достаточно низкая, это лимитирующая стадия процесса термического образования NO. Содержание молекулярного кислорода и азота в зоне продуктов сгорания соответствует условиям равновесия [7]. Содержание атомарного кислорода r_O в зоне продуктов сгорания определяется по равновесию с молекулярным кислородом r_{O_2} :

$$r_O = 4.1 \exp\left(-\frac{244100}{RT}\right) \sqrt{\frac{RT r_{O_2}}{p}},$$

где $R=8.31$ Дж/(моль·К) – удельная газовая постоянная.

Закон сгорания топлива определяется по эмпирическим уравнениям Вибе. Средняя температура газа в цилиндре определяется по уравнению состояния. Текущее значение температуры смеси подсчитывается по уравнению адиабаты. Температура продуктов сгорания T_z определяется для каждого момента цикла из баланса энтальпий.

Расчет образования NO по уравнению цепного механизма производится для зоны сгорания, затем определяется средняя концентрация NO по камере сгорания. Образование NO по цепному механизму представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, которое численно решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Объемная доля оксида азота в продуктах сгорания r_{NO} , образовавшихся в зоне:

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = \frac{2.333 \cdot 10^7 e^{-\frac{38020}{T_c}} r_{N_2eq} r_{Oeq} \left(1 - \left(\frac{r_{NO}}{r_{NOeq}}\right)^2\right)}{RT_c \left(1 + \frac{2346}{T_c} e^{\frac{3365}{T_c}} \frac{r_{NO}}{r_{O_2eq}}\right)} \frac{p}{\omega}$$

где p – давление в цилиндре, Па; ω – угловая скорость коленчатого вала, рад/с; φ – текущее значение угла поворота кривошипа в процессе сгорания, град; r_{NOeq} , r_{N_2eq} , r_{Oeq} , r_{O_2eq} – равновесные концентрации оксида азота, молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода, соответственно.

Результаты и их обсуждения. На основе реализованного алгоритма расчета процессов в ДДВС и методики расчета образования оксидов азота в цилиндре ДДВС проведено исследование влияния состава входной топливно-воздушной смеси на работу двигателя.

Из расчетов следует, что на процесс образования NO наибольшее влияние оказывает температура, особенно при обогащении смеси. Процесс видимого сгорания и образование NO в ДДВС с выходом на равновесное значение происходит в секторе $15 - 30^\circ$ поворота коленчатого вала (рис.1).

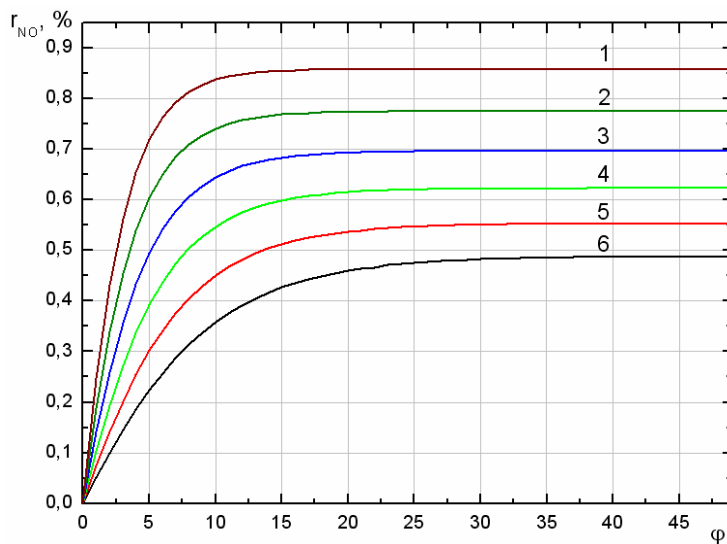


Рис. 1. Влияние температуры на образование оксидов азота: 1 – $T=2250$ К; 2 – $T=2200$ К; 3 – $T=2150$ К; 4 – $T=2100$ К; 5 – $T=2050$ К; 6 – $T=2000$ К

Концентрацию NO можно минимизировать путем уменьшения концентрации кислорода на входе, что уменьшает температуру сгорания и скорость реакции образования оксидов азота (рис.2). При уменьшении содержания кислорода в свежем заряде на 1%, доля оксида азота в продуктах сгорания уменьшается на 0.056%.

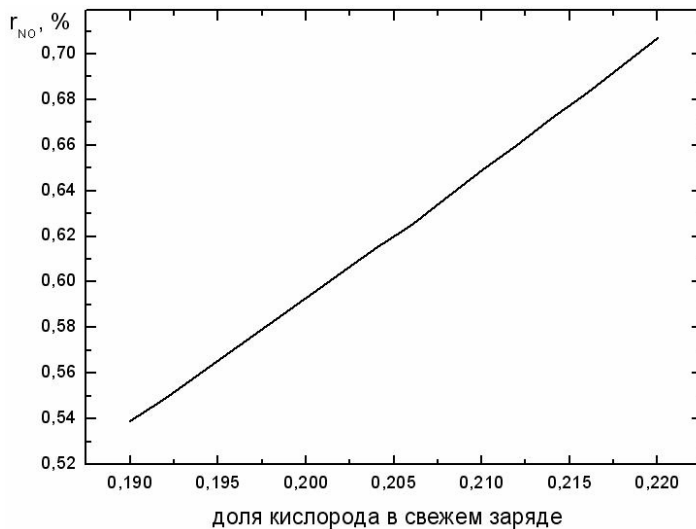


Рис. 2. Зависимость доли оксида азота в продуктах сгорания от доли кислорода в топливно-воздушной смеси

В работе проведены исследования влияния состава входной топливно-воздушной смеси на совершенство тепловых процессов и на совершенство двигателя в целом. Совершенство тепловых процессов, происходящих в цилиндре дизельного двигателя, оценивают по индикаторным показателям цикла: среднему индикаторному давлению p_i , индикаторной мощности N_i , индикаторному КПД η_i и индикаторному удельному расходу топлива g_i . Совершенство двигателя в целом оценивается с учетом потерь мощности на трение и привод вспомогательных механизмов по его эффективным показателям: среднему эффективному давлению p_e , эффективной мощности N_e , механическому η_m и эффективному КПД η_e , эффективному удельному расходу топлива g_e . Эффективные показатели двигателя формируются при совместном воздействии на них индикаторных и механических показателей. Эффективные параметры, характеризующие работу двигателя, отличаются от индикаторных наличием необходимых затрат полезной работы на преодоление различных механических сопротивлений и на совершение процессов впуска и выпуска.

Теоретическое среднее индикаторное давление p_i характеризует теоретическую расчетную работу газов за один цикл, отнесенную к ходу поршня. Меньшие значения

среднего индикаторного давления p_i вызывают дополнительные потери теплоты на нагревание избыточного воздуха. Среднее эффективное давление p_e представляет собой отношение эффективной работы на валу двигателя к единице рабочего объема цилиндра. С уменьшением среднего эффективного давления ухудшаются условия использования рабочего объема цилиндра, что не дает возможность создавать более легкие и компактные двигатели (рис. 3).

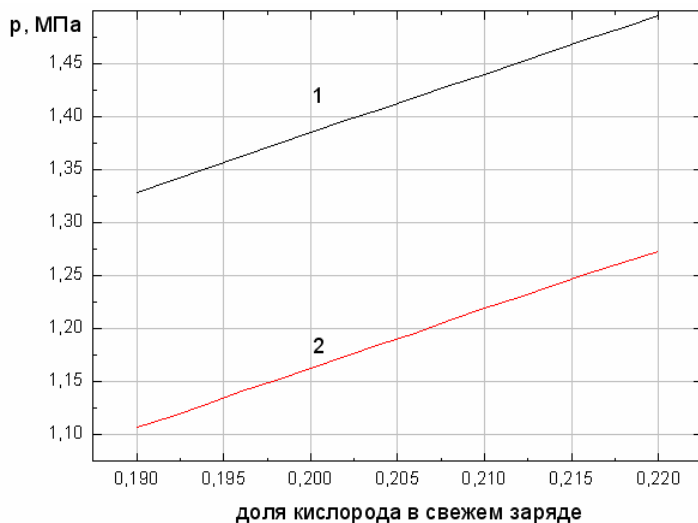


Рис. 3. Зависимости индикаторного давления (1) и эффективного давления (2) от доли кислорода в составе входной смеси

Индикаторная мощность двигателя N_i – работа, совершаемая газами внутри цилиндра в единицу времени. Часть этой мощности N_i , называемая мощностью механических потерь, затрачивается в самом двигателе на преодоление трения и на привод вспомогательных механизмов. Мощность, равная разности индикаторной мощности и механических потерь, называется эффективной мощностью двигателя N_e . Эффективная мощность N_e – полезная работа, получаемая на валу двигателя в единицу времени. Эффективная мощность двигателя N_e повышается за счет повышения плотности заряда и коэффициента наполнения, повышения механического КПД двигателя (рис. 4).

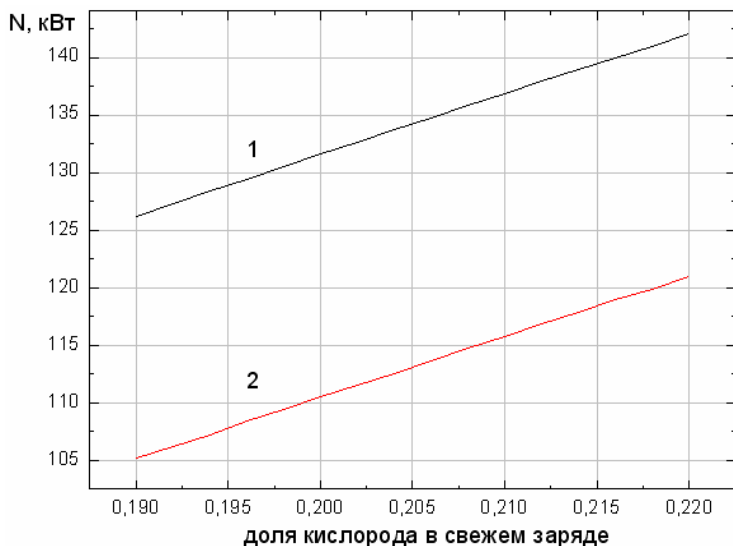


Рис. 4. Зависимости индикаторной мощности (1) и эффективной мощности (2) от доли кислорода в составе входной смеси

Индикаторный КПД η_i характеризует степень использования в действительном цикле теплоты топлива для получения полезной работы и представляет собой отношение теплоты, эквивалентной индикаторной работе цикла, ко всему количеству теплоты, внесенной в цилиндр с топливом. Индикаторный КПД η_i характеризует степень использования в

действительном цикле теплоты топлива для получения полезной работы и представляет собой отношение теплоты, эквивалентной индикаторной работе цикла, ко всему количеству теплоты, внесенной в цилиндр с топливом. Повышения индикаторного КПД с уменьшением доли кислорода в топливно-воздушной смеси происходит за счет совершенствования процесса сгорания и сокращения потерь теплоты топлива в процессах сжатия и расширения, что характеризует экономичность действительного рабочего цикла двигателя (рис. 5). При уменьшении содержания кислорода в составе входной смеси на 1%, индикаторный КПД увеличивается на 0.01 за счет уменьшения отвода тепла в стенки. Механический КПД η_m – отношение среднего эффективного давления к индикаторному, оценочный показатель механических потерь в двигателе. С увеличением потерь в двигателе механический КПД уменьшается. Эффективный КПД η_e – отношение тепла, превращенного в полезную работу, ко всему теплу, подведенному с топливом, т.е. оценивает степень использования тепла топлива с учетом всех видов потерь, как тепловых, так и механических, оценивает экономичность работы двигателя в целом. Уменьшение содержания кислорода в свежем заряде на 1% приводит к увеличению эффективного КПД η_e на 0.005 (рис. 5).

Индикаторный удельный расход топлива g_i – количество топлива, расходуемого в двигателе за 1 ч, отнесенное к индикаторной мощности, развиваемой двигателем. По значению g_i оценивают эффективность теплоиспользования. Удельный эффективный расход топлива g_e представляет собой отношение часового расхода топлива G к эффективной мощности N_e . Расход g_e характеризует экономичность действительного цикла. Эффективный удельный расход топлива g_e падает с уменьшением доли кислорода в топливно-воздушной смеси в результате уменьшения механического КПД, уменьшения тепловых потерь (температура сгорания T_z уменьшается) (рис. 6). При работе дизельного двигателя на входной смеси с меньшим содержанием кислорода вследствие замедленного сгорания мощности двигателя N_i и N_e несколько снижаются, но при этом повышается экономичность.

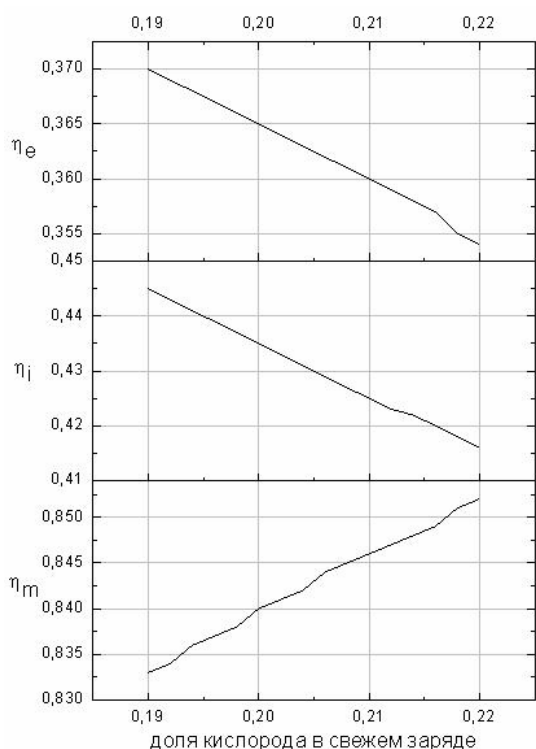


Рис.5. Зависимости эффективного, индикаторного, механического КПД от доли кислорода в составе входной смеси

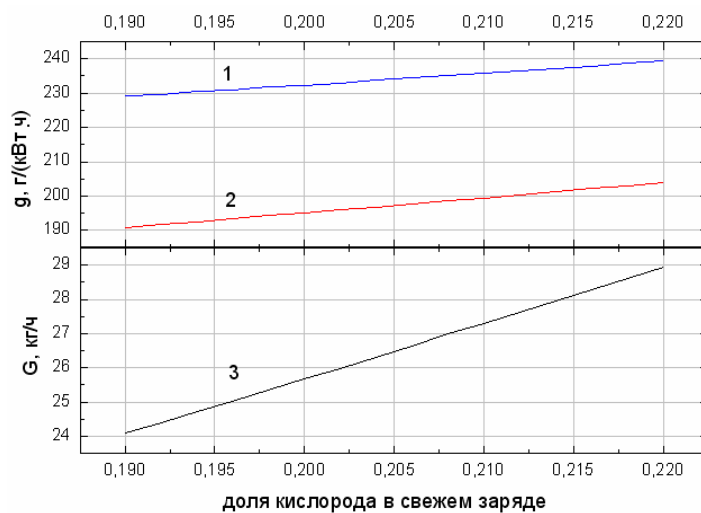


Рис.6. Зависимости эффективного (1) и индикаторного (2) удельных расходов, часового расхода (3) от доли кислорода в составе входной смеси

Заключение. Таким образом, управление составом топливно-воздушной смеси на входе в дизельный двигатель позволяет снизить токсичность оксидов азота в продуктах сгорания дизельных двигателей с улучшением экономичности работы двигателя. На основе реализованного алгоритма расчета процессов в ДДВС и методики расчета образования оксидов азота в цилиндре ДДВС проведено исследование влияния состава входной топливно-воздушной смеси на работу двигателя (индикаторные и эффективные показатели работы) и содержание оксидов азота в выхлопных газах. При уменьшении содержания кислорода в топливно-воздушной смеси на 1% доля оксида азота в продуктах сгорания уменьшается на 0.056%, индикаторный КПД увеличивается на 0.01, эффективный КПД увеличивается на 0.005, расход топлива уменьшается (рис. 6) при одновременном уменьшении механического КПД и мощности.

Работа проводилась в рамках задания “Энергоэффективность 1.12.5”.

Литература

1. Состояние окружающей среды Республики Беларусь : нац. доклад / М-во природ. ресур. и окружающей среды Республики Беларусь. Гос. науч. учр-е «Инс-т природопользования НАНБ». Минск: Белтаможсервис, 2010. – 150 с.
2. Выброс вредных веществ с отработавшими газами автомобильных двигателей Состав газов, снижение доли вредных веществ, нормирование выбросов и т. п. Основные сведения // Программа самообучения 230. ООО “ФОЛЬКСВАГЕН Груп Рус”, 2000. – 28 с.
3. Mollenhauer K., Tschoeke H. Handbook of Diesel Engines. Berlin: Springer, 2010. – 636 p.
4. Дизели Д-245.7ЕЗ, Д-245.9ЕЗ, Д-245.30ЕЗ, Д-245.35ЕЗ. Руководство по эксплуатации 245ЕЗ-0000100 РЭ. Минск: ОАО ММЗ, 2007. – 166 с.
5. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1981.– 155 с.
6. Lakshminarayanan P.A., Aghav Y.V. Modelling Diesel Combustion. New York: Springer, 2010. – 305 p.
7. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: Физматлит, 2003. – 352 с.
8. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. – 688 с.
9. Sabathil D. Beitrag zur NO_x . Darmstadt, 2010. – 135 b.
10. Справочник химика. Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы. Т. 3./ под ред. Никольского Б.П. М.: Химия, 1965. – 1005 с.
11. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. Т. 1. Кн. 2. /Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. М.: Наука, 1978. – 328 с.
12. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. Т. 2. Кн. 2. /Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. М.: Наука, 1978. – 344 с.