

## ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВС И СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ИХ СОДЕРЖАНИЯ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ

*В.В. Кривопапов, И.В. Максакова, В.В. Фомин*

## FORMATION OF NITROGEN OXIDE IN CHAMBERS OF MODERN INTERNAL COMBUSTION ENGINES AND WAYS OF DECREASE IN THEIR MAINTENANCE IN THE FULFILLED GASES

*V.V. Krivopalov, I.V. Maksakova, V.V. Fomin*

Оценено соответствие нормам выбросов содержание наиболее токсичного оксида азота в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания. Разработана методика определения параметров химической реакции образования NO и влияния на него процесса смесеобразования и сгорания в поршневых и газотурбинных двигателях. Предложен альтернативный объемному и послойному методам, подтвержденный экспериментально, пленочно-вихревой способ сжигания бедных смесей, позволяющий повысить экологические показатели по NO, CH и CO без ухудшения ресурсосберегающих параметров.

*Ключевые слова:* химические реакции, способы смесеобразования, нормы NO<sub>x</sub>, методика, пленочно-вихревое смесеобразование.

Conformity of the maintenance of the most toxic nitrogen oxide of exhaust gases of internal combustion engines to exhaust's standards is estimated. The technique of definition of parameters of chemical reaction of formation NO and influences on it of process mixing and combustion in piston and gas-turbine engines is developed. Film-vortical way of burning of the poor mixes, confirmed experimentally, is offered alternative to the volume and level-by-level methods, allowing to raise ecological indicators on NO, CH and without deterioration resources parameters.

*Keywords:* chemical reactions, ways mixing, norms NO<sub>x</sub>, a technique, film-vortical mixing.

Основными оценочными параметрами современных энергетических установок на базе поршневых и газотурбинных ДВС, определяющими их область применения, являются:

1. Ресурсосберегающие показатели:

– удельная мощность –  $N_y$ , равная массовому расходу материалов  $G$  на единицу мощности  $N_e$ :  

$$N_y = G/N_e, \text{ кг/кВт}; \quad (1)$$

– удельный эффективный расход топлива –  $g_e$ , равный расходу топлива  $G_T$ , на единицу мощности  $N_e$ :

$$g_e = G_T/N_e, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (2)$$

2. Приспособляемость двигателя к изменению нагрузки –  $K$ , определяемая отношением максимального крутящего момента –  $M_{\max}$  к моменту при максимальной мощности –  $M_N$ :

$$K = M_{\max}/M_N. \quad (3)$$

3. Экологичность отработавших газов (ОГ), определяемая содержанием в них нормируемых токсичных компонентов: оксида углерода (CO), несгоревших углеводородов (CH) и наиболее токсичных оксидов азота (NO<sub>x</sub>), а также сажи в дизельных и газотурбинных ДВС.

Количественный рост автотракторной и другой техники с силовыми установками с ДВС, работающими на углеводородном топливе, для окисления которого используется кислород воздуха, привел к усилению влияния токсичных компонентов ОГ на экологию окружающей среды. Это привело к тому, что основным оценочным параметром стала нормированная экологичность (Евро-0–5).

Значения основных (критериальных) параметров современных ДВС приведены в таблице.

Значения основных (критериальных) параметров современных ДВС

Тип двигателя		Параметры			
		$N_y$ , кг/кВт	$g_e$ , г/кВт·ч	$K$	Экологичность
Дизель четырехтактный		1,5–1,8	165–220	1,05–1,15	Сажа, $NO_x$
Поршневые	Карбюраторный	0,8–2,5	200–250	1,25–1,35	$NO_x$ , CO, CH
	Четырехтактный Инжекторный	0,9–2,6	205–255	1,25–1,35	Катализатор
	Двухтактный	1,3–1,5	350	1,3	$NO_x$ , CO, CH и $C_nH_m$
Газотурбинные	Авиационный	0,2–2,0	190	2–2,5	C, $NO_x$
	Промышленный	0,2–2,0	200	2–2,5	C, $NO_x$
	Танковый (Т-1250)	–	300	2–2,5	C, $NO_x$

Из таблицы видно, что ни один из поршневых (ПД) и газотурбинных (ГТД) двигателей внутреннего сгорания не имеет одновременно всех наилучших ресурсосберегающих и динамических параметров, но всем им свойственна высокая токсичность продуктов сгорания ОГ, превышающая нормы Евро-5 (2009 г.), особенно по наиболее токсичным оксидам азота  $NO_x$ .

Из таблицы также видно, что наилучшие массовые, экономические, динамические и экологические (по нормам Евро на CO, CH,  $NO_x$  и C) показатели имеют авиационные ГТД большой агрегатной мощности ( $N_a \leq 100$  МВт). КПД этих ДВС при простейшей термодинамической схеме и температуре газа  $\sim 1000$  К составляет 25 %. При утилизации тепла в теплообменнике двух и более ступенчатых схем промышленных газотурбинных установок средней агрегатной мощности ( $N_a = 10–50$  МВт) КПД достигает 42–45 % [1].

Но учитывая, что суммарный выброс токсичных компонентов с ОГ в атмосферу определяется не только концентрацией этих компонентов, но и агрегатной мощностью двигателя, то даже при соблюдении норм Евро-5 по  $NO_x$  (при  $g_{NO_x}$  равной 2 г/кВт·ч) и мощности авиационных ГТД  $\geq 100$  МВт суммарный выброс  $G_{NO_x}$  – не менее 200 кг/ч, CO – 150 кг/ч и C – 50 кг/ч.

Поэтому наилучший по другим критериальным показателям авиационный ГТД не следует относить к экологически чистым, и это является одной из причин ограничения полетов отечественных самолетов на международных линиях.

Не внушает оптимизма и перспектива снижения токсичности по  $NO_x$  использованием альтернативных топлив (например, водорода) и адиабатных двигателей, в которых предполагается применение воздуха в качестве окислителя. Это связано с тем, что при содержании в воздухе 78 % азота и 21 % кислорода вместе с основными реакциями:  $2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$  и  $C + O_2 \leftrightarrow CO_2$  – при определенных условиях в зоне горения последовательно активируются две параллельные реакции [2]:  $N_2 + O_2 \rightarrow 2N + 2O \rightarrow 2NO$  – также с последующим образованием других оксидов азота –  $NO_x$ .

Для активации первой эндотермической реакции образования NO по уравнению  $O_2 + N_2 \leftrightarrow \leftrightarrow NO + N$  требуется достаточно большая энергия  $\Delta H$ , определяемая по уравнению [3]:

$$\Delta H = \Delta_f H^\circ(NO_r) + \Delta_f H^\circ(N_r) - \Delta_f H^\circ(O_r) - \Delta_f H^\circ(N_{2r}), \quad (4)$$

по которому энергия активации первой реакции:

$$E_{акт} = 91,265 \pm 0,4 + 472,68 \pm 0,4 - 249,17 \pm 0,1 - 0 = 314,775 \pm 0,93, \text{ кДж/моль.}$$

Расчет температуры рабочего тела  $T_{кв}$  в камере сгорания, при которой начинается реакция образования окиси NO –  $T_{акт}$ , по формуле  $T_{акт} = E_{акт}/C_p$  достаточно сложен и неточен.

Это связано с определением удельной теплоемкости  $C_p$ , зависящей:

– от состава продуктов сгорания на момент начала образования NO ( $CO_2$ , CO,  $H_2O$ ,  $N_2O$  и др.);

## Расчет и конструирование

– парциальности компонентов продуктов сгорания;  
– теплоемкости  $C_p$  отдельных компонентов продуктов сгорания;  
– температуры, давления и плотности, главной из которых по теории Я.Б. Зельдовича является зависимость  $C_p$  от температуры, представленной в виде:

$$C_p = a + bT_{\text{акт}} + cT_{\text{акт}}^2 + dT_{\text{акт}} \quad (5)$$

Определение  $T_{\text{акт}}$  и зависимости параметров образования  $\text{NO}_x$  от температуры (скорости реакции, констант равновесия и количества  $\text{NO}_x$ ) в ОГ в принятой по Евро размерности с большей точностью можно выполнить по уравнению, описывающему квазистационарные сложные реакции в камере сгорания ГТД.

В этих реакциях окисление азота является элементарным актом совокупности простых реакций при непрерывной подаче с постоянной скоростью реагирующих веществ, так что их количество не меняется во времени. При такой конфигурации процесса качественное определение температуры и других параметров образования  $\text{NO}_x$  с рядом допущений и упрощений (ввиду сложности) может быть осуществлено по закону действующих масс:

$$K = \frac{[\text{NO}] \cdot [\text{N}]}{[\text{N}_2] \cdot [\text{O}]} \quad (6)$$

где  $K$  – константа равновесия;  $[\text{N}_2]$  и  $[\text{O}]$  – концентрация реагирующих веществ.

Согласно закону действующих масс:

А. Скорость  $\omega$  образования  $\text{NO}$  в прямой реакции пропорциональна произведению концентрации  $\text{N}_2$  и  $\text{O}$  прямой реакции  $\text{N}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{N}$ :  $\omega_n = k_n (P_{\text{N}_2} \cdot P_{\text{O}})$ , а скорость обратной реакции –  $\omega_{\text{об}} = k_{\text{об}} (P_{\text{NO}} \cdot P_{\text{N}})$ .

При равновесии процессов ( $\omega_n = \omega_{\text{об}}$ ) константа равновесия  $K$  определяется по выражению:

$$K = k_n / k_{\text{об}} = (P_{\text{NO}} \cdot P_{\text{N}}) / (P_{\text{N}_2} \cdot P_{\text{O}}) \quad (7)$$

Б. Константа равновесия для идеальной газовой реакции  $K_p$  и ее зависимость от температуры  $T$  может быть определена по статистическому методу исследования свойств газов, основанному на кинетическом уравнении Л. Больцмана, в следующей последовательности:

1. Исходные данные:

1.1. Минимальное расчетное количество  $\text{NO}$  в ОГ в реакции  $\text{O} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{N}$  в размерности норм Евро –  $g_{\text{NO}}$ , г/кВт·ч.

1.2. Удельный индикаторный расход топлива для выбранного типа двигателя –  $g_i$ , г/кВт·ч.

1.3. Стехиометрический расход воздуха  $\text{кг}_{\text{воз}}/\text{кг}_{\text{топ}} - L_0$ , кг/кг и коэффициента избытка воздуха –  $\alpha = 1$ .

1.4. Плотность воздуха при стационарных условиях:

$$\rho_{\text{в}} = T_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{ст}} / T_{\text{г}} = 24,46, \text{ г/л.}$$

2. Расчетное определение параметров реакции образования  $\text{NO}$ :

2.1. Расход воздуха –  $V_{\text{в}}$ , л/кВт·ч:

$$V_{\text{в}} = \frac{\alpha(L_0 + 1) \cdot g_i \cdot 1000}{\rho_{\text{в}}} \quad (8)$$

2.2. Объем  $\text{NO}$  в ОГ, л/кВт·ч:

$$V_{\text{NO}} = \frac{g_{\text{NO}} \cdot V_{\text{м}}}{30} \quad (9)$$

где  $V_{\text{м}}$  – молярный объем газа ( $\text{NO}$ ) при стандартных условиях равный  $22,438 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{моль}$ .

2.3. Парциальное давление  $\text{NO}$  в ОГ –  $P_{\text{NO}}$ :

$$P_{\text{NO}} = V_{\text{NO}} / V_{\text{в}} = (g_{\text{NO}} \cdot V_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{в}}) / (30\alpha(L_0 + 1) \cdot g_i \cdot 10^3) \quad (10)$$

2.4. Константа равновесия –  $K_p$ :

$$K_p = P_{\text{NO}}^2 / (P_{\text{N}_2} P_{\text{O}_2}) = c \cdot P_{\text{NO}}^2 \quad (11)$$

где  $P_{\text{N}_2} = 0,78$  и  $P_{\text{O}_2} = 0,21$  – парциальные давления  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  в воздухе.

Статистическая обработка экспериментальных данных представляет зависимости  $K_p$  от температуры в виде [4]:

$$\lg K_p = 6,34934 \cdot 33,690 \cdot 10^3 / T \quad (12)$$

2.5. Решение уравнения (12) относительно  $T$  определяет температуру  $T_{\text{акт}}$  реакции образования  $g_{\text{NO}}$ . Так как определение  $T_{\text{акт}}$  при  $g_{\text{NO}} = 0$  по уравнению (12) не представляется возможным ( $P_{\text{NO}} = 0$ ),  $T_{\text{акт}}$  может быть определена экстраполированием по графику  $g_{\text{NO}} = f(T)$  – рис. 1.

Определение  $T_{\text{акт}}$  по статистическому методу обработки экспериментальных данных, без учета влияния других факторов (в частности, давления) претендует на достаточную точность только при низких давлениях 0,1 МПа. Поэтому необходимо выполнение экспериментальных исследований для конкретных условий образования  $\text{NO}$  (и  $\text{NO}_x$ ) в камере сгорания (КС) ДВС.

Экспериментальные данные по определению температуры  $T_{\text{акт}}$  образования  $\text{NO}_x$  целого ряда исследований, в том числе и полученные авторами при отработке рабочего процесса, в КС двухтактного дизель-гидронасоса, в КС стенда испытаний ТКР-11Н и высокотемпературной малогабаритной камере сгорания (для турбореактивного двигателя (ТРД)) [5] позволяют принимать при расчете ориентировочное значение  $T_{\text{акт}} = 1700 \pm 50 \text{ К}$  для ГТД.

Равенство максимальной температуры  $T_{\text{max}}$  в зоне сгорания любого вида топлива с окислителем, содержащим азот ( $\text{N}_2$ ), температуре начала образования  $\text{NO}$  –  $T_{\text{акт}}$  является необходимым условием минимального содержания  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания. Обеспечение полного отсутствия  $\text{NO}_x$  в ОГ невозможно как по уравнению (6), так и потому, что при любом известном способе смесеобразования (и нейтрализации) не исключено локальное условие  $T_{\text{max}} > T_{\text{акт}}$ .

$T_{\text{max}}$  сгорания однородной смеси определяется по уравнению:

$$T_{\text{max}} = \frac{H_u \cdot \xi}{\alpha \cdot (L_0 + 1) C_p}, \quad (13)$$

где  $H_u$  – теплота сгорания топлива, Дж/кг;  $C_p$  – удельная массовая теплоемкость воздуха, Дж/кг·К;  $\xi$  – коэффициент использования теплоты, учитывающий потери тепловой энергии рабочего тела в окружающую среду.

При организации смесеобразования и в системах управления мощностью ДВС управляющим параметром является коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  (например, электронные системы управления двигателем (ЭСУД) ВАЗ-21083 обеспечивают  $\alpha = 0,96 \pm 0,03$  на основных режимах). Поэтому уравнение (10) целесообразно перестроить в уравнение  $T_{\text{max}} = f(\alpha)$ , а «экологическое» уравнение – в  $g_{\text{NO}} = f(\alpha)$  вида (14):

$$g_{\text{NO}} = \alpha \left[ \frac{P_{\text{NO}} \cdot V_{\text{NO}} \cdot (L_0 + 1) \cdot C_p}{\xi \cdot R_{\text{NO}} \cdot H_u \cdot 10^3} \right], \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (14)$$

Это позволяет зависимости  $T = f(\alpha)$  и  $g_{\text{NO}} = f(\alpha)$  совместить на одном графике (рис. 1).

На рис. 1 также приведены зависимости от  $\alpha$  содержания других нормируемых экологических компонентов ( $\text{CO}$ ,  $C_nH_m$ ) [6], значения которых для  $\alpha \gg 1$  близки к нулю. Наличие в ОГ токсичных компонентов объясняется тем, что в КС всех типов ДВС, приведенных в таблице, имеют место спонтанные или конструктивно организованные зоны горения, в которых даже при  $\alpha \gg 1$  температура  $T_{\text{лок}} > T_{\text{акт}}$ , что свидетельствует о несовершенстве процесса смесеобразования и сгорания топлива в этих КС.

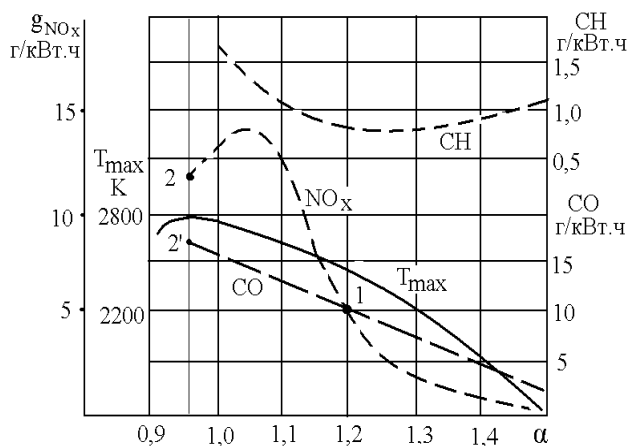


Рис. 1. Концентрация токсичных веществ в ОГ четырехтактного бензинового двигателя

В карбюраторных ДВС наличие  $\text{NO}_x$  в ОГ объясняется тем, что на основных обедненных режимах работы, при объемном способе смесеобразования и сгорании однородной бензовоздушной смеси коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  не выходит за нижний предел воспламеняемости, равный 1,15–1,2. При этом минимальное значение  $T_{\text{max}} \sim 2500 \text{ К}$  значительно больше  $T_{\text{акт}}$  и содержание  $\text{NO}_x$  также велико (точка 1 рис. 1). Работа на режиме максимальной мощности при  $\alpha = 0,9\text{--}0,96$  (инжекторные ДВС), при еще более высокой  $T_{\text{max}}$ , из-за недостатка кислорода сопровождается ухудшением экономичности, увеличением содержания  $\text{NO}_x$ , термическим крекингом с образованием сажи (точка 2' рис. 1).

## Расчет и конструирование

При ужесточении норм Евро-1 (в РФ с 1999 г.) до норм Евро-5 (с 2009 г.) по  $g_{NO}$  с 8 до 2 г/кВт·ч четырехтактные карбюраторные двигатели с объемным способом сжигания гомогенной топливно-воздушной смеси с  $\alpha = 0,95-1,2$  заменяются «инжекторными» двигателями ЭСУД с  $\alpha = 0,96 \pm 0,03$  с тем же способом сжигания и еще большим образованием  $NO_x$ .

В этих ДВС методом снижения  $g_{NO}$  до норм Евро-5 является не снижение образования  $G_{NO_x}$  в кг/ч в зоне реакции (КС), а восстановление  $N_2$  за счет доокисления CO по реакции  $NO + CO \leftrightarrow N_2 + CO_2$  в трехкомпонентном нейтрализаторе (NO, CO и CH) с контролем  $O_2$  датчиком кислорода ЭБУ. Улучшение экологических показателей по этому методу осуществляется за счет конструктивных усложнений, ухудшения экономичности (4–7 %), удельной весовой мощности и увеличения стоимости.

Поэтому при дальнейшем ужесточении нормы  $g_{NO}$  за счет уменьшения  $\alpha$  метод становится бесперспективным, в том числе и за счет увеличения  $g_{CO}$  и  $g_{CH}$ .

Методом снижения  $g_{NO}$  дизелей является совершенствование топливоподающих систем: повышение давления впрыскивания топлива, выбор оптимальных характеристик управления углом опережения, электронным управлением топливоподачей, внедрение аккумуляторной системы и др.

Внедрение этих мероприятий позволило несколько улучшить экологические показатели дизелей, но большинство отечественных ДВС не удовлетворяет требованиям уровня Евро-2 по токсичности ОГ. Это связано с тем, что объемный, послыйный и другие близкие к ним способы смесеобразования и сгорания не обеспечивают создания в КС дизелей высокой степени однородности смеси топлива и воздуха (с отсутствием локальных зон с  $\alpha \approx 1$ ) с  $\alpha$  не ниже 1,32, при котором  $T_{акт} = 1700$  К.

Температурная неоднородность, связанная с неоднородностью состава смеси, ведет к наличию  $T_{лок}$  до 2500 К, образованию  $NO_x$ , а недостаток кислорода – к пиролизу топлива с образованием сажи.

Методы совершенствования топливоподачи, особенно повышением давления впрыска (до 200 МПа) топлива, повышая тонкость распыла существенно не улучшают равномерность  $\alpha$  по сечению конуса факела [7].

В ГТД, из условий безопасности полета, для обеспечения надежного зажигания и сгорания топлива, независимо от типа КС (кольцевой или блочной), с помощью конструктивных устройств (рис. 2) осуществляется послыйный способ смесеобразования с образованием двух зон:

– зоны горения (зоны обратных токов) – 5, в которой для надежного горения  $\alpha = 0,8-0,9$  и  $T_{max} = 2500-2700$  К и, следовательно, большое количество всех токсичных компонентов (в частности, до 200 кг/ч  $NO_x$  при норме Евро-5  $g_{NO} = 2$  г/кВт·ч для ГТД  $N_a \geq 100$  МВт);

– зоны смешения – 6, в которой осуществляется «разбавление» продуктов сгорания вторичным и третичным воздухом ( $B_1, B_2, B_3$ ) с  $\alpha \gg 1$  до температуры, выдерживаемой материалом лопаток соплового аппарата и турбины –  $T_{лоп}$  ( $T_{лоп}$  ГТД типа Т-1250 равна 1340 К). При этом происходит догорание CO до  $CO_2$ , CH до  $CO_2$  и  $H_2O$ . При быстром понижении  $T$  до 2300 К происходит «закалка»  $NO_x$  на уровне равновесной концентрации и  $g_{NO_x}$  несколько снижается. При дальнейшем «разбавлении» концентрация  $NO_x$  в ОГ становится значительно меньше нормы Евро-5 и поэтому не контролируется, т. е. в атмосферу выбрасывается около 150–200 кг/ч  $NO_x$  при  $g_{NO_x} \rightarrow 0$ .

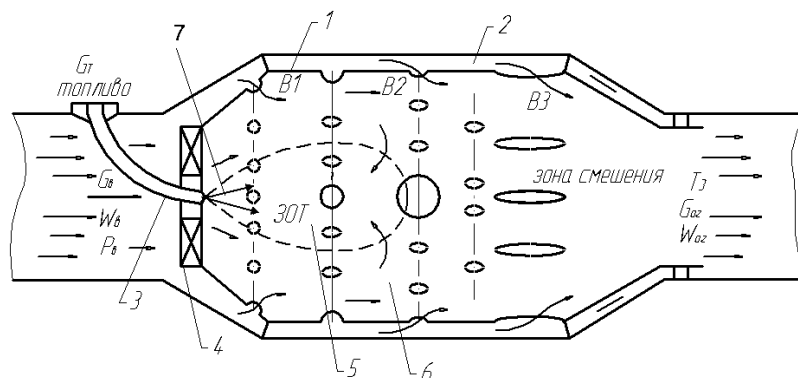


Рис. 2. Схема камеры сгорания и распределения первичного воздуха: 1 – корпус; 2 – жаровая труба; 3 – форсунка; 4 – завихритель; 5 – зона испарения смесеобразования и горения смеси; 6 – зона смешения продуктов сгорания и воздуха; 7 – факел топлива

Таким образом, ГТД с  $T_{\text{лоп}} < 1700 \text{ К}$  и  $T_{\text{max}} > T_{\text{акт}}$  является генератором оксидов азота в количестве

$$G_{\text{NO}} = g'_{\text{NO}} \cdot N_a \cdot 10^3, \text{ кг/ч}, \quad (15)$$

где  $g'_{\text{NO}}$  – количество  $\text{NO}_x$  (г/кВт·ч), образующихся при  $\alpha = 0,8-0,9$  и  $T = 2700-2800 \text{ К}$ . Недостаток кислорода при этом  $\alpha$  предопределяет пиролиз топлива и образование сажи.

Анализ механизма образования токсичных компонентов, их содержания в ОГ, а также современных методов улучшения их параметров показал:

– при объемном способе смесеобразования и сгорания топлива в карбюраторных и «инжекторных» ДВС с  $\alpha < 1,2$ ,  $T_{\text{max}} > T_{\text{акт}}$  образование  $\text{NO}_x$  велико. Для соблюдения условия  $T_{\text{max}} = T_{\text{акт}}$  необходима разработка способа сжигания топлива, обеспечивающего сгорание бедной смеси с  $\alpha$  больше нижнего предела воспламеняемости ( $\alpha = 1,2$ );

– при любых известных способах сжигания смеси в дизелях снижение токсичности по  $\text{NO}_x$  при  $\alpha_{\text{min}} > 1,3$  необходимо повышение качества перемешивания смеси, т. е. интенсификация тепломассообмена при достаточном значении  $\alpha = 1,32-1,35$ , обеспечивающем  $T_{\text{max}} \leq 1700 \text{ К}$ .

– в КС ГТД с диффузионным ламинарным тепломассообменом (при послыном способе с  $\alpha_{\text{зот}} = 0,95$  и  $\alpha_{\text{з.с.}} \gg 1$ ) необходимо организовать более эффективный конвективный (турбулентный) тепломассообмен, при котором  $\alpha$  определяется по уравнению (13), решенному относительно  $\alpha$  вида:

$$\alpha = (H_u \cdot \xi) / (L_0 + 1) C_p \cdot T_{\text{лоп}}, \quad (16)$$

где  $T_{\text{лоп}}$  – температура рабочего тела на входе в сопловой аппарат турбины, определяемая термостойкостью лопаток.

Так как  $T_{\text{лоп}} < T_{\text{акт}} = 1700 \text{ К}$ , тепलोперепад около  $360 \text{ К}$  является резервом повышения термического КПД ГТД, равного  $\eta_t = 1 - T_4/T_3$ , где  $T_3$  – температура рабочего тела на входе в сопловой аппарат турбины, а  $T_4 = T_{\text{акт}}$ .

Это предопределяет возможность одновременного повышения  $\eta_e$  и снижения суммарного выброса  $\text{NO}_x$  и сажи.

Такой способ сжигания обедненной смеси с целью увеличения экономичности и уменьшения токсичности двигателей был рекомендован школой МВТУ [8] за счет интенсификации процесса сгорания при «мелкокомасштабной турбулентной пульсации» топливовоздушного заряда. Один из способов такого решения проблемы сжигания бедной смеси запатентован и реализован при создании свободно-поршневого дизель-гидронасоса (СПДГН) и в КС стенда контрольных испытаний ТКР-11Н и других работах авторов.

Принцип организации сжигания бедной смеси ( $\alpha \gg 1$ ) по пленочно-вихревому способу, реализованному в КС ГТД, сводится к ликвидации зоны обратных токов, внешнему смесеобразованию и зажиганию смеси и к ограничению функции КС только сжиганием топлива при  $\alpha \gg 1,2$ .

Процесс интенсификации передачи тепловой энергии из зоны горения осуществлялся не только лучистой и диффузионной теплопередачей, но и более (в сотни раз) эффективным (за счет тангенциальной составляющей скорости вихревого воздушного потока) и естественным конвективным тепло-массообменом. Это увеличивает скорость распространения фронта пламени (скорость выгорания топлива) и выравнивает  $\alpha$  и температуру рабочего тела.

Целью организации пленочно-вихревого способа сжигания топлива в КС СПДГН было понижение температуры стенок и днища поршней.

В КС стенда при этом выполнялось требование ограничения температуры ОГ на входе в турбину ( $1073-1130 \text{ К}$ ) из условий термостойкости лопаток турбины ТКР ( $T_{\text{лоп}} \leq 1130 \text{ К}$ ).

Переход от послыного к ПВСС в КС ГТД с вращающимися камерами сгорания [5] имеет целью:

- повышение КПД за счет увеличения срабатываемого теплоперепада –  $\Delta H$  и снижения токсичности в ТРД или только снижение токсичности в ГТД;
- снижение токсичности (особенно по  $\text{NO}_x$ ) за счет ликвидации зоны обратных токов с  $\alpha \leq 1$ ;
- охлаждение стенок вращающейся камеры сгорания реактивной ступени ТРД;
- ликвидацию стабилизатора и жаровой трубы.

Выводы и предложения:

1. Во всех современных поршневых и газотурбинных ДВС, даже при нормативном содержании токсичных компонентов в ОГ –  $g_x$  образуется значительное количество токсичных компонентов ОГ –  $G_x = N_a g_x \text{ кг/ч}$ , и прежде всего наиболее токсичных оксидов азота  $\text{NO}_x$ .

## Расчет и конструирование

2. Причиной образования  $\text{NO}_x$  в камере сгорания является превышение максимальной температуры рабочего тела  $T_{\max}$  над температурой активации  $T_{\text{акт}}$  химической реакции образования  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_x$ , равной для квазистационарных сложных реакций в КС ГТД  $\approx 1700$  К.

3. Величина  $T_{\max}$  определяется величиной коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и способом смесеобразования (однородности смеси). В КС ГТД при конструктивно организованном послонном способе в слое (зоне обратных токов)  $\alpha = 0,85-0,95$  и  $T_{\max} = 2300-2500$  К, что обеспечивает при большой мощности  $N_a$  (даже при  $g_{\text{NO}}$ , равной норме Евро-5) выброс в окружающую среду значительного суммарного количества  $\text{NO}_x - G_{\text{NO}_x}$ .

4. Переход на пленочно-вихревой способ сжигания топлива при  $\alpha = 1,35-1,4$ , апробированный при создании вращающейся КС реактивного колеса турбореактивного двигателя (около 100 ч наработки), позволил понизить  $T_{\max}$  до 1700 К.

5. Одновременное снижение токсичности компонентов ОГ и повышение КПД за счет интенсификации тепломассообмена при пленочно-вихревом способе сжигания бедной смеси в КС ГТД дает основание рекомендовать замену на ПВСС:

- а) объемного способа в КС бензиновых (как карбюраторных, так и инжекторных) ДВС;
- б) способов сжигания топлива в КС дизелей за счет повышения однородности смеси при  $\alpha_{\min} \geq 1,3$ .

### Литература

1. Ковецкий, В.М. Газотурбинные двигатели в энергетике. Достижения, особенности, возможности / В.М. Ковецкий, Ю.Ю. Ковецкая. – Киев: Науч. кн., 2008. – 254 с.
2. Семенов, Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Н.Н. Семенов. – М.: Машиностроение, 1958. – 120 с.
3. Химическая энциклопедия: в 5 т. – М.: СЭ, 1988. – Т. 1. – 1019 с.
4. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: в 4 т. – М.: Наука АН СССР, 1978. – Т. 1, кн. 2. – 840 с.
5. Пат. № 2406933 RU, МПК (51) F23/R3/16 (2006.01). Малогабаритная камера сгорания газотурбинного двигателя / В.М. Мысляев, И.В. Максакова, Д.Н. Ахметов, В.В. Фомин, В.В. Кривоपालов, А.В. Ушаков. – № 2009117001/06; заявл. 04.05.2009; опубл. 20.12.2010.
6. Автомобильный справочник: пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЗАО «КЖИ: За рулем», 2004. – 992 с.
7. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 342 с.
8. Двигатели внутреннего сгорания. Система поршневых и комбинированных двигателей: учеб. по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / С.И. Ефремов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 456 с.

*Поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.*

**Кривоपालов Вячеслав Владимирович.** Соискатель кафедры «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – совершенствование технико-экономических и экологических параметров двигателей внутреннего сгорания.

**Vyacheslav V. Krivopalov.** Aspirant of “Wheel and full-track machines” department, South Ural state university. The area of scientific interests – perfection of technical and economical parameters of internal combustion engine.

**Максакова Ирина Вениаминовна.** Кандидат технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – газовая динамика.

**Irina V. Maksakova.** The candidate of engineering science, docent, South Ural state university. The area of scientific interests – gas dynamic.

**Фомин Виталий Владимирович.** Аспирант кафедры «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – совершенствование технико-экономических и экологических параметров двигателей внутреннего сгорания. E-mail: v.fomin@list.ru

**Vitaly V. Fomin.** Aspirant of “Wheel and full-track machines” department, South Ural state university. The area of scientific interests – perfection of technical and economical parameters of internal combustion engine. E-mail: v.fomin@list.ru