

УДК 621.438:504.3.064

В.П. ГЕРАСИМЕНКО, В.В. ОСИПОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ВЫХЛОПНЫМИ ГАЗАМИ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Описаны основные мероприятия по улучшению экологических характеристик газотурбинных двигателей и установок. Предложена методика расчета вредных веществ в выхлопных газах ГТД и установок при сгорании различных углеводородных топлив по измерениям их концентраций газоанализаторами в сухих продуктах сгорания. На основе модели "суммарной реакции" в цепном механизме Зельдовича получены уравнения Аррениуса скорости образования окислов азота в камере сгорания ГТД. В полученных уравнениях скорости образования окислов азота учтен также механизм образования быстрых окислов азота.

газотурбинный двигатель, вредные выбросы, загрязнение атмосферы, газоанализатор

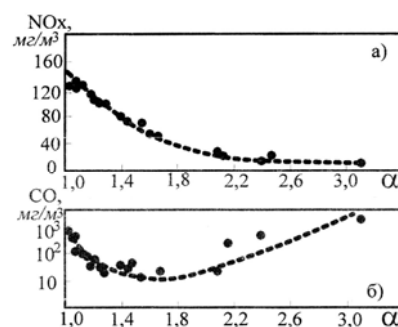
Введение

Озабоченность международной общественности экологическими катастрофами, начиная от кислотных дождей до аварий на атомных электростанциях и глобального потепления климата на Земле, – характерная проблема, связанная с обеспечением комфорта человека. Ужесточение международных норм, государственных и отраслевых стандартов по допустимым уровням выбросов в атмосферу требует комплексного подхода в решении данной проблемы. Снижение вредных выбросов в выхлопных газах энергетических и транспортных установок – одно из направлений ее решения в газотурбостроении. Оптимизация режимов работы, надлежащий контроль и техническое обслуживание установок в эксплуатации, подготовка топлив и рациональное регулирование систем топливопитания в значительной мере влияют на их экологические характеристики.

Формулирование проблемы. Мероприятия по снижению выбросов в выхлопных газах газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) определяются областью их использования: Создание малоэмиссионных многозонных камер сгорания [1] с пневмофорсунками и специальной стабилизацией пламени в авиационных ГТД [2, 3]. Впрыск воды пара (STIG, "Водолей") в зону горения в ГТУ [4], использование каталитических камер сгорания [2]

или когерентных систем дожигания [5] и др.

Выбросы NO_x и CO прямопротивоположно зависят от большинства параметров в зоне горения (температуры, времени пребывания, объема зоны горения, расхода воздуха и др.), поэтому необходим поиск компромиссных решений при их минимизации. Примером являются зависимости массовых выбросов NO_x и CO от коэффициента избытка воздуха (рис. 1) [5] при использовании горелочных устройств с диффузионным смесеобразованием в дожигательных камерах. При $\alpha = 1,7 \dots 2,0$ выбросы NO_x и CO минимальны. Подобные зависимости можно ожидать и для основных камер сгорания ГТД.

Рис. 1 Влияние α на образование NO_x и CO при горении природного газа

Цель статьи – описание путей учета и снижения загрязнения атмосферы выхлопными газами ГТД.

Области применения ГТД накладывают отпечаток на нормирование выбросов. Так, в авиации, согласно ИКАО – Международной организации граждан

данской авиации, нормирование осуществляют в районе аэропортов в виде массы вредного вещества в выхлопных газах за взлетно-посадочный цикл, отнесенной к взлетной тяге. При этом пока не нормируется наносимый вред в крейсерском полете самолетов разрушением окислами азота защитного озонного слоя атмосферы от солнечного ультрафиолета, снижением прозрачности атмосферы за счет дымления двигателей и "парниковым эффектом".

Наземные ГТУ электростанций, газоперекачивающих агрегатов (ГПА), транспортных средств ввиду больших мощностей, продолжительностей работы, общего количества агрегатов, а следовательно, и объемов сжигаемого часто низкосортного топлива находятся под более пристальным вниманием по экологическим характеристикам. Специфика областей применения ГТД, видов производств, сортов топлив определяет и разнообразие этих характеристик. Принятая в авиации характеристика EI – индекс эмиссии, называемый как "удельный выброс", представляет собой количество вредного вещества, образованного при сгорании одного килограмма топлива (г/кг). Под "удельным выбросом" в газовой отрасли понимают количество вредного вещества, отнесенное к единице располагаемого тепла сжигаемого топлива (г/МДж), а массовую концентрацию вредного вещества принято оценивать в единицах измерения мг/м^3 или $\text{мг/н}\cdot\text{м}^3$ – количество вещества, содержащееся в одном кубическом метре выхлопных газов или "нормальном" кубическом метре при температуре 0°C и давлении 101,3 кПа. Применяют также единицы измерения вредных выбросов: объемные концентрации в % или ppm, мощность выбросов в г/с, валовый выброс и др. [2, 3, 6].

Методика учета загрязнения атмосферы

Существующие методики по учету вредных выбросов двигателей и энергетических установок отличаются в зависимости от видов топлив, принципов нормирования, единиц измерения и др., несмот-

ря на использование одних и тех же газоанализаторов. Поэтому целесообразно описать основные положения таких методик [6]. Объемные концентрации $[CO]$, $[NO]$, $[NO_2]$, $[SO_2]$ и др. измеряют газоанализатором в единицах ppm (10^{-6}). Эти концентрации пересчитывают в массовые ($\text{мг/н}\cdot\text{м}^3$) умножением на соответствующие плотности веществ при нормальных условиях ($t = 0^\circ\text{C}$; $p = 101,3$ кПа):

$$C_{CO} = 1,25[CO]; \quad C_{NO_x} = 1,34[NO] + 2,05[NO_2]; \quad (1)$$

Концентрация NO_x в пересчете на диоксид азота:

$$C_{NO_x}^{NO_2} = C_{NO_2} + 1,53C_{NO}. \quad (2)$$

Одновременно с указанными концентрациями измеряют содержание кислорода $[O_2]$ и $[CO_2]$, позволяющих определять коэффициент избытка воздуха в сухих продуктах сгорания $\alpha_{сн}$.

Измеряемые на выходе ГТД концентрации веществ получают в сухих продуктах сгорания, поскольку непосредственно в приборе предусмотрено осушивание от влаги проб выхлопных газов для защиты от быстрого изнашивания электрохимических датчиков (сенсоров). Действительный коэффициент избытка воздуха α связан с коэффициентом избытка воздуха в сухих продуктах сгорания $\alpha_{сн}$ ("коэффициентом разбавления сухих продуктов"). Эта связь может быть получена анализом процесса горения топливо-воздушной смеси со структурной формулой углеводородного топлива C_nH_m по модели "суммарной реакции" [7] при полном сгорании топлива ($\eta_c \approx 1,0$), когда концентрации вредных веществ в продуктах сгорания составляют малые величины в сравнении с основными продуктами:

$$C_nH_m + \alpha \left(n + \frac{m}{4} \right) \left[O_2 + \left(\frac{1}{K_0} - 1 \right) N_2 \right] = nCO_2 + \frac{m}{2} H_2O + \left(n + \frac{m}{4} \right) \left[(\alpha - 1) O_2 + \left(\frac{1}{K_0} - 1 \right) \alpha N_2 \right], \quad (3)$$

где K_0 и $(1 - K_0)$ – объемные доли O_2 и N_2 в воздухе; $\frac{1}{K_0} \left(n + \frac{m}{4} \right) = L_0$ – объемный стехиометрический коэффициент. Формула (3) записана для горе-

ния одной молекулы углеводородного топлива C_nH_m в воздухе. Отсюда объемные концентрации кислорода во влажных и сухих продуктах сгорания:

$$[O_2] = \frac{(n+m/4)(\alpha-1)}{\alpha L_0 + m/4}; [O_2]_{cn} = \frac{(n+m/4)(\alpha-1)}{\alpha L_0 - m/4}. \quad (4)$$

Отношение этих концентраций называют "коэффициентом соотношения объемных расходов влажных и сухих продуктов сгорания"

$$K_{ce} = [O_2]/[O_2]_{cn} = (\alpha L_0 - m/4)/(\alpha L_0 + m/4). \quad (5)$$

Коэффициент избытка воздуха в сухих продуктах сгорания α_{cn} , как отношение объемной концентрации кислорода в исходном воздухе к величине, на которую уменьшилась эта концентрация в результате окисления топлива, определяют по формуле

$$\alpha_{cn} = K_0 / (K_0 - [O_2]_{cn}). \quad (6)$$

Подставив в эту формулу выражение (4) для $[O_2]_{cn}$ получим связь коэффициентов избытка воздуха в сухих и влажных продуктах сгорания:

$$\alpha = \alpha_{cn} - K_0(\alpha_{cn} - 1)/(1 + 4n/m). \quad (7)$$

При сопоставлении экологических характеристик ГТД, кроме учета влажности выхлопных газов, принято "приводить" концентрации выбросов к стандартизованным продуктам сгорания с 15-ти процентной концентрацией кислорода. Такая концентрация кислорода, принятая за условную в продуктах сгорания по сравнению с 21-но процентной объемной концентрацией кислорода в стандартном атмосферном воздухе, предусматривает расходование 6-ти % кислорода воздуха на окисление углеводородов в камере сгорания. Эти 6% условно приняты за потребное стехиометрическое количество кислорода, а следовательно и относительное количество воздуха, которое определяет условный коэффициент избытка воздуха $\alpha_y = 21/6 = 3,5$. Массовые концентрации CO и NO_x , приведенные к условной 15-ти процентной концентрации кислорода в сухих продуктах сгорания, определяют по формулам:

$$C_{CO}^{15} = C_{CO} \cdot \alpha_{cn} / \alpha_y; C_{NO_x}^{15} = C_{NO_x} \cdot \alpha_{cn} / \alpha_y. \quad (8)$$

где массовые концентрации C_{CO} и C_{NO_x} (1) рассчитаны по результатам измерений газоанализатором.

Описанная методика принята при определении экологических характеристик ГТД по результатам измерений газоанализаторами. Для пересчета концентраций вредных веществ, измеренных газоанализатором в сухих продуктах сгорания, к их действительным концентрациям во влажных выхлопных газах используют коэффициент K_{ce} (5). При измерении расхода топлива в ГТД Q_m , $nm^3/час$, определяют объемный и массовый расход воздуха в нормальных условиях по коэффициенту избытка воздуха α (7) и стехиометрическому коэффициенту L_0 :

$$Q_e = \alpha L_0 Q_m / 3600, \text{ } nm^3/c; G_e = \rho_0 Q_e = 1,293 Q_e, \text{ } кг/c.$$

Расход выхлопных газов при этом составляет:

$$Q_2 = Q_e + Q_m / 3600 = (1 + \alpha L_0) Q_m / 3600, \text{ } nm^3/c; \\ G_2 = (1 + 1/\alpha L_0') G_e, \text{ } кг/c,$$

где L_0' – массовый стехиометрический коэффициент, $кг/кг$.

По расходу выхлопных газов Q_2 и измеренным газоанализатором концентрациям в сухих продуктах сгорания вредных веществ C_i (1) рассчитывают мощности выбросов по каждому веществу:

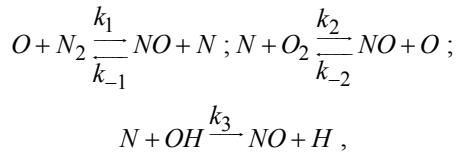
$$M_i = Q_2 C_i K_{ce} \cdot 10^{-3}, \text{ } г/c.$$

Как отмечалось выше, в авиационных ГТД удельный выброс в виде индекса эмиссии EI отличается от удельного выброса m_i ГПА – количества вредного вещества, отнесенного к единице располагаемого тепла расходуемого топлива за 1 секунду

$$m_i = 3600 \frac{M_i}{Q_m \cdot H_u}, \text{ } г/МДж,$$

где H_u – теплота сгорания топлива, $МДж/м^3$.

Наряду с экспериментальным определением загрязняющих атмосферу веществ не менее важным является разработка расчетных методов оценки образования этих выбросов. Оба направления рассматриваем как взаимно дополняющие друг друга. Среди быстрых (сверхравновесных), воздушных (термических) и топливных окислов азота, которые образуются в камерах ГТД при сгорании керосина, около 75% составляют термические NO [2, 4]. Согласно цепному механизму образования термических NO :



скорость этого процесса может быть представлена, ограничиваясь ее первым порядком, формулой:

$$d[NO]/dt = k_1 [O][N_2] - k_{-1} [NO][N] + k_2 [N][O_2] - k_{-2} [NO][O] + k_3 [N][OH], \quad (9)$$

где коэффициенты Аррениуса $k_i = z \exp(-E/RT)$ прямых и обратных реакций определяются уровнем температуры в зоне горения и энергиями активации E этих реакций, среди которых в первом коэффициенте k_1 она наибольшая, что делает эту реакцию лимитирующей. При достатке кислорода O_2 в зоне горения ($\alpha_{O_2} \geq 1,0$) и с учетом того, что энергия активации в коэффициенте k_1 белее чем на порядок выше в сравнении с другими коэффициентами, уравнению (9) можно придать подобный вид [4, 8]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \lambda k_1 [O][N_2] \frac{1 - k_{-1} k_{-2} [NO]^2 / k_1 [N_2] k_2 [O_2]}{1 + k_{-1} [NO] / (k_2 [O_2] + k_3 [OH])}$$

Здесь коэффициент $\lambda = f(n, m)$ учитывает долю образования быстрых NO и зависит от соотношения n и m в топливе $C_n H_m$ ввиду того, что быстрые NO образуются посредством HCN .

Необходимо отметить, что цепочка образования NO при горении керосинов состоит из порядка 196 прямых и обратных реакций [8], поэтому представленное описание может быть отнесено к модели "суммарной реакции" [2]. Это подтверждается формой записи уравнения (9), в котором за текущие концентрации веществ приняты начальные концентрации прямой и обратной реакций. Такое представление скоростей реакций позволяет упрощать интегрирование по времени пребывания для определения концентрации NO в выхлопных газах ГТД.

Заключение

Изложенные методики опытного и расчетного определения вредных выбросов в выхлопных газах

ГТД, несмотря на большое количество публикаций по данной проблеме и программных средств (ASTRA), дополняют практические рекомендации специалистам, занимающимся разработкой и эксплуатацией ГТД с различными топливами.

Литература

1. Романовский Г.Ф. Технология малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей / Г.Ф. Романовский, С.И. Сербин, В.Г. Ванцовский, В.В. Вилкул // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – Х.: НТУ «ХПИ», 2005. – № 6. – С. 154-160.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, моделирование процессов и расчет. – Казань: КГТУ, 2004. – 220 с.
4. Туф. Модель расчета выбросов воздушных, быстрых и топливных окислов азота из газотурбинных установок // Тр. амер. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки. – 1986. – №2. – С. 91–101.
5. Любчик Г.М. Розвиток систем допалювання на вихлопі утилізаційних ГТУ / Г.М. Любчик, Г.Б. Варламов, Г.О. Мікулін, Р.М. Говдяк, Л.Б. Чабанович, Б.І. Шелковський // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – 2005. – № 6. – С. 145-153.
6. Герасименко В.П., Ефремов М.С. Учет загрязнения окружающей среды выхлопными газами газоперекачивающих агрегатов // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – Х.: НТУ "ХПИ", 2008. – № 6. – С. 162–165.
7. Герасименко В.П. Проблемы неустойчивости горения в малоэмиссионных камерах сгорания ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 2 (38). – С. 68-70.
8. Химия горения: Пер. с англ. / Под ред. У. Гардинера. – М.: Мир, 1988. – 464 с.

Поступила в редакцию 3.04.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.П. Мельник, УкрНИИГаз, Харьков.