

УДК 621.438:536.38

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ВЫБРОСЫ ОКСИДОВ АЗОТА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД

© 2013 Б. Г. Мингазов, А. В. Бакланов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ

Представлена модель расчёта образования оксидов азота в камере сгорания ГТД. При помощи данной модели проведен расчёт и построены характеристики концентрации оксидов азота от суммарного коэффициента избытка воздуха в камерах сгорания с различной степенью раскрытия фронтального устройства. Проведен анализ процессов в серийной и укороченной камерах сгорания ГТД.

Камера сгорания, моделирование, горение, оксиды азота, токсичность.

Одной из основных задач на этапе создания и экологической модернизации камер сгорания ГТУ является снижение выбросов вредных веществ (оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO) в выхлопных газах. Как правило, при эксплуатации ГТУ преобладают высокие режимы работы, на которых возрастают выбросы NO_x и снижаются выбросы CO . При сжигании природного газа в этих условиях содержание NO_x на 90...95% определяет токсичность выхлопа. Поэтому вопрос моделирования образования оксидов азота является актуальной задачей.

В таких сложных изделиях, как авиационные двигатели, особое место в доводке узлов ГТД отводится камере сгорания, которая наиболее трудно поддается расчетам и требует проведения большого объема экспериментальных исследований как в лабораторных, так и в стендовых условиях. Однако экспериментальные исследования и доводка не только трудоемки, но и весьма дорогостоящи, поэтому даже частичная замена этих испытаний на автоматизированные расчёты позволяет получать ощутимый экономический эффект. Применение компьютерных программ, реализующих математические модели как проектировочных, так и поверочных расчётов, с одной стороны, облегчает процесс проектирования и доводки, а с другой, – позволяет получать более качественный результат.

Для расчёта образования оксидов азота за основу взята одномерная модель камеры сгорания, которая предполагает разделение камеры по длине на ряд зон и допущение, что в пределах каждой зоны приблизительно происходит реагирование части топлива в виде однородной смеси топлива с воздухом, поступившим в каждую зону из предыдущего участка, и воздуха из боковых отверстий жаровой трубы. Такой подход позволяет применять основы теории турбулентного распространения пламени в пределах одной зоны для определения характеристик по длине жаровой трубы (рис.1).

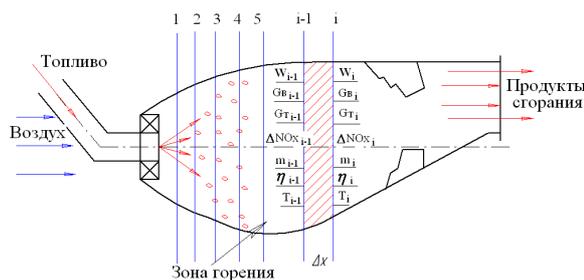


Рис. 1. Схема разделения камеры сгорания на расчётные зоны

Используя данный подход для определения концентрации оксидов азота в камере сгорания ГТД, предполагается, что весь объем жаровой трубы состоит из n зон, в каждой зоне формируется состав непрореагировавшей смеси топлива и

воздуха, а также продуктов сгорания, поступивших из предыдущей зоны. Следовательно, концентрация ΔNO_{xi} в каждой зоне определяется выделившимися в конкретной зоне и поступившими из предыдущей зоны оксидами азота. Для нахождения

ΔNO_{xi} используется дифференциальная зависимость, полученная на основе механизма Я.Б. Зельдовича, для определения термического окисления азота кислородом, которая представлена в виде

$$\frac{dNO}{dt} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{O_2}} \exp\left(-\frac{86000}{RT_r}\right) \left[O_2 N_2 \frac{64}{3} \exp\left(-\frac{43000}{RT_r}\right) - (NO)^2 \right]. \quad (1)$$

Здесь T_r – температура в зоне горения; NO, N_2, O_2 – мгновенные концентрации компонентов газовой смеси, определяются на основе закономерности выгорания топлива, полученной в результате расчёта по модели турбулентного горения [1]; t – длительность реакции.

В модели, исходя из геометрии жаровой трубы и уравнений баланса воздуха, топлива и продуктов сгорания, определяется распределение местных составов смеси:

$$\alpha_i = G_{vi} / (G_{\Gamma i} L_0). \quad (2)$$

Средняя температура газа в i -м сечении находится из уравнения теплового баланса, в котором учитывается теплота Q_{i-1} , принесённая газом из предыдущей зоны; Q_{vi} , внесённая воздухом, поступающим в зону горения из боковых отверстий; $Q_{\Gamma i}$, подведённая к газу за счёт сгорания части топлива в i -й зоне схемы на рис. 2:

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{vi} + \Delta Q_{\Gamma i}. \quad (3)$$

Отсюда получим:

$$T_{\Gamma i} = \frac{c_{p\Gamma} T_{\Gamma i-1} G_{\Gamma i-1} + m \cdot c_{pB} T_k \Delta G_{B_i} + \Delta G_{\Gamma} h H u}{c_{p\Gamma} G_{\Gamma i}}, \quad (4)$$

где $c_{p\Gamma}, c_{pB}$ – теплоёмкость газа и воздуха в соответствующих сечениях; T_k – температура воздуха на входе; $T_{\Gamma i}$ – температура газа в i -м сечении; G_{Γ} – расход топлива; $\Delta G_{B_i}, \Delta G_{\Gamma i}$ – расход воздуха и газа в i -м

сечении; Hu – теплотворная способность топлива; h – полнота сгорания; m – коэффициент смешения в зоне обратных токов (ЗОТ).

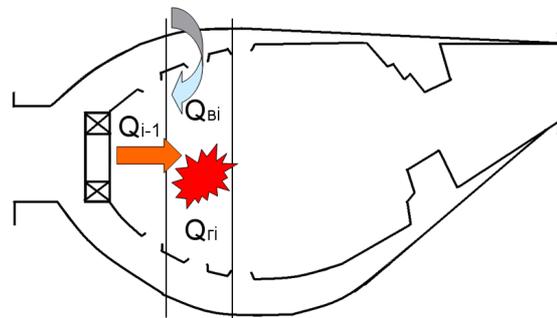


Рис.2. Схема подвода тепла в зону горения

На основе рассмотрения поверхностной теории турбулентного сгорания осреднённого "моля" смеси получена зависимость для определения локальной полноты сгорания топлива на рассматриваемом участке [2]:

$$\eta = \frac{3U_{\text{м0}}^3 t_0^3}{l_0^3} \left[\frac{1}{3} \left(1 - e^{-\frac{3t}{t_0}} \right) - \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{м0}}} \left(1 - e^{-\frac{2t}{t_0}} \right) + \frac{U_{\text{н}}^2}{U_{\text{м0}}^2} \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) \right], \quad (5)$$

где t – время пребывания «моля» в пределах зоны горения, $t = \frac{\Delta x}{W}$; $t_0 = \frac{l_0}{W'}$ – время существования пульсации, где l_0, W' – масштаб и пульсационная скорость в расчетном сечении потока.

С целью определения влияния степени раскрытия фронтного устройства на изменение эмиссионных характеристик были проведены расчёты с помощью пред-

ложенной модели для камеры сгорания НК-16СТ.

На рис. 3 представлены расчётные значения выбросов NO_x в зависимости от α_Σ камеры сгорания.

Из рисунка видно, что увеличение степени раскрытия позволяет смещать максимум выделения оксидов азота в об-

ласть «богатых» смесей, в связи с этим уровень выбросов в зоне рабочих режимов становится ниже. Однако существенного уменьшения выбросов NO_x за счет раскрытия более 30% достичь невозможно вследствие опасности возникновения бедного срыва пламени [3].

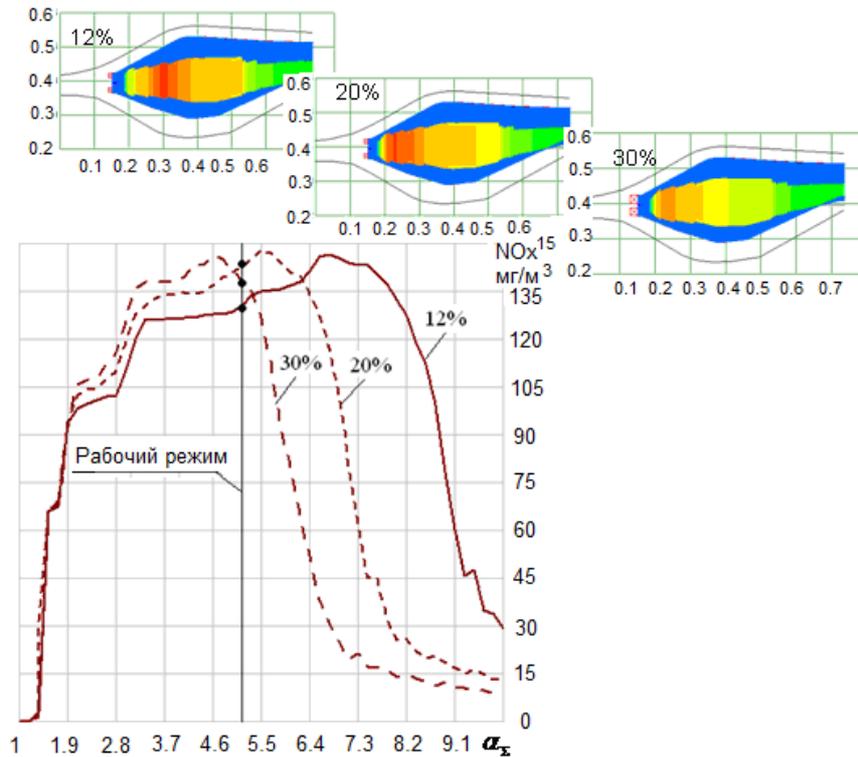


Рис. 3. Расчётные зависимости приведённой концентрации оксидов азота от суммарного коэффициента избытка воздуха в КС в зависимости от раскрытия фронтального устройства

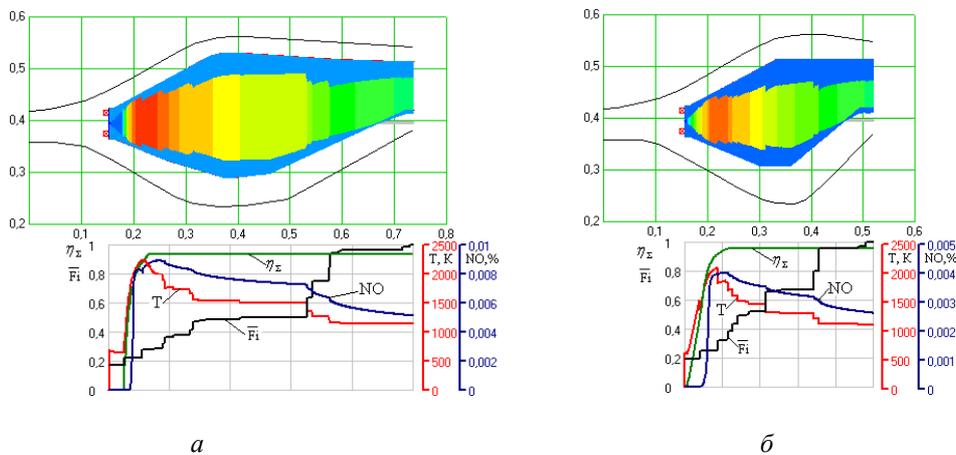


Рис. 4. Распределение параметров по длине жаровой трубы: а – серийная КС; б – укороченная КС; $T_{к*} = 500 \text{ K}$; $P_{к*} = 0,1 \text{ МПа}$; $\alpha_\Sigma = 5$

Другим методом снижения NO_x на рабочем режиме камеры является существенное укорочение жаровой трубы.

С целью выявления основных закономерностей внутрикамерных процессов серийной и укороченной камер сгорания были проведены расчёты с помощью предложенной методики и анализ процессов.

Из рис. 4, б видно, что при работе укороченной КС основное горение происходит в её головной части с небольшой протяжённостью высокотемпературной зоны горения, поэтому выделение NO_x меньше чем в серийной камере, где протяжённость высокотемпературной зоны более продолжительная, в результате чего увеличивается выделение NO_x , что наблюдается на рис. 4, а.

К тому же большой вклад в снижение оксидов азота вносит сокращение времени пребывания продуктов сгорания в камере: 11 мс – базовая КС, 7 мс – укороченная КС, что доказывают расчёты и эксперименты, проведённые в данной работе.

Сравнительный анализ эмиссионных характеристик серийной и укороченной камер (рис. 5) подтвердил, что укорочение жаровой трубы позволяет снижать выбросы оксидов азота. Однако это связано не только с уменьшением времени пребывания продуктов сгорания в камере сгорания, но и с существенным перераспределением воздуха в жаровой трубе, что вызывает интенсивность втекания струй и улучшает смешение топлива с воздухом. Соответственно выравнивается распределение топлива по сечению камеры сгорания (процесс гомогенизации смеси), что приводит к снижению NO_x .

Компьютерная программа, составленная на основе одномерной модели, позволяет рассчитывать полноту, температуру и концентрацию оксидов азота по длине жаровой трубы для разных конструктивных компоновок, где для наглядности представлена цветовая карта распределения температур в жаровой трубе, по которой можно судить о протяжённости зоны горения.

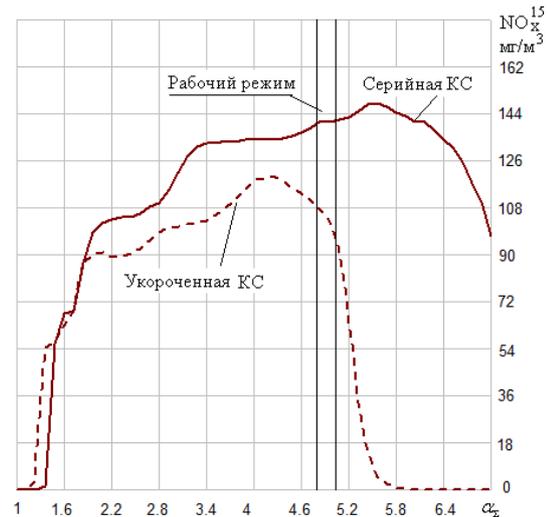


Рис. 5. Расчётные зависимости приведённой концентрации оксидов азота от суммарного коэффициента избытка воздуха

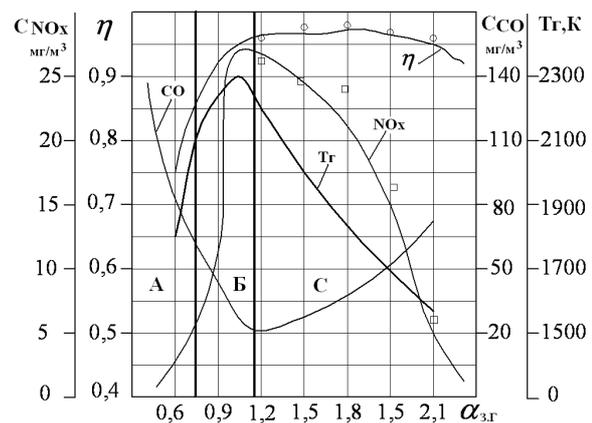


Рис. 6. Расчётно-экспериментальное изменение параметров газа на выходе из КС по коэффициенту избытка воздуха в зоне горения: $T_{к*} = 500 \text{ K}$; $P_{к*} = 0,1 \text{ Мпа}$
○ – эксперимент; — – расчёт

На основе рассмотренной модели были проведены расчёты, которые позволили получить сравнительные графики изменения полноты сгорания, выделения NO_x , CO от коэффициента избытка воздуха в зоне горения $\alpha_{з.г}$ (рис. 6). В данном примере рассматриваются характеристики укороченной камеры сгорания.

При рассмотрении приведённых графиков можно выделить три характерные области: А, Б и С. Первая область А характерна тем, что полнота сгорания

имеет низкий уровень и соответственно высокие значения выделения окиси углерода и углеводородов, в то же время выделение оксидов азота незначительно. В области *B* достигаются максимальные значения полноты сгорания и соответственно максимальное выделение NO_x , в то же время выход CO имеет низкий уровень. В области *C* происходит уменьшение выброса NO_x при относительно низких значениях уровня выделения CO и высокой полноте сгорания топлива.

Исходя из отмеченного можно сделать вывод, что режиму работы исследованной серийной камеры сгорания соответствует область *B*, где имеет место горение «богатой» топливовоздушной смеси при $\alpha_{з.г}=0,8-1,2$. Проведённые конструктивные мероприятия по сокращению размеров жаровой трубы привели к снижению показателей эмиссии NO_x и некоторому увеличению CO в результате смещения рабочего режима в область *C*, соответствующую «бедной» зоне горения.

Таким образом, предложенный метод позволяет оперативно прогнозировать

влияние изменения как режимных, так и конструктивных параметров камеры на образование оксидов азота. Это существенно уменьшает объём экспериментально-доводочных работ в процессе экологической модернизации КС. Метод является простым по сравнению с современными пакетами прикладных газодинамических программ и более доступным при модернизации и доводке камер сгорания ГТД.

Библиографический список

1. Мингазов, Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст]/ Б.Г. Мингазов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. – 220 с.
2. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. [Текст] /под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ, 1971 Т.1. – 266с.
3. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени [Текст]/ под ред. Н.А. Чигир. – М.: Машиностроение, 1981. – 407 с.

THE INFLUENCE OF ENGINEERING CHANGES ON NO_x EMISSION IN A GAS-TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBER

© 2013 B. G. Mingazov, A. V. Baklanov

Kazan Research National Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

The paper presents a model of calculating nitrogen oxide formation in the combustion chamber of a gas turbine engine. The model has made it possible to make the calculations and determine the characteristics of nitrogen oxide concentration from the total air ratio in combustion chambers with various extents of opening the flame tube head. The processes in the commercial and shortened gas turbine engine combustor chambers are analyzed.

Combustion chamber, modeling, burning, turbulence, nitric oxide, toxicity.

Информация об авторах

Мингазов Биалал Галавтдинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой АДЭУ, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. E-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru. Область научных интересов: термодинамика, горение в турбулентном потоке, газодинамика, моделирование, авиационные двигатели, энергосиловые установки.

Бакланов Андрей Владимирович, ассистент кафедры ГПТУиД, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. E-mail: andreybaklanov@bk.ru. Область научных интересов: горение в турбулентном потоке, моделирование, исследование.

Mingazov Bilal Galavtdinovich, head of the department of aircraft engines and power plants, doctor of technical science, professor, Kazan Research National Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. E-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru. Area of research: thermodynamics, combustion in a turbulent flow, gas dynamics, simulation, aircraft engines, power plants.

Baklanov Andrey Vladimirovich, candidate of technical science, the department of gas, steam turbine plants and engines, Kazan Research National Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. E-mail: andreybaklanov@bk.ru. Area of research: burning in a turbulent flow, modelling.