

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДОВОДКА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

© 2007 Б. Г. Мингазов

Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева

Особое место при доводке узлов газотурбинного двигателя (ГТД) отводится камере сгорания, которая требует большого объема экспериментальных исследований, как в лабораторных, так и в стендовых условиях. Применение компьютерных программ, реализующих математические модели, как в проектировочных, так и в поверочных расчетах, облегчает процесс проектирования и доводки, а также существенно уменьшает их стоимость.

Основным требованием при доводке камер сгорания является обеспечение высокой надежности, эффективности ее работы и снижения выбросов.

Известно [1, 3], что для этого необходимо обеспечить хорошее смешение топлива с воздухом и улучшить процесс выгорания топлива, при этом распределение температуры газов по длине жаровой трубы должно иметь максимальные значения в зоне горения (не более 2000 К) и минимальное время пребывания продуктов сгорания в области высоких температур. Необходимое распределение температур газа можно обеспечить путем соответствующей организации подвода вторичного воздуха по тракту жаровой трубы. В данной работе рассмотрен алгоритм получения требуемых характеристик камеры сгорания с помощью системы автоматизированной доводки, применение которой позволяет значительно уменьшить объем этих работ. Данная система основана на одномерном моделировании внутрикамерных процессов: распыливания, испарения, смешения и выгорания топлива по длине жаровой трубы.

В ходе автоматизированной доводки требуется получить оптимальное распределение воздуха по длине жаровой трубы, обеспечивающее высокую полноту сгорания, надежность работы при минимальных выбросах токсичных компонентов.

1. На начальном этапе расчетов формируется облик камеры сгорания, который может быть получен на основе среднестатистических данных и гидравлического расчета, или на основе прототипа, имеющего:

- конфигурацию наружной и внутренней оболочки жаровой трубы;
- раскрытие фронтального устройства;
- распределение относительных площадей отверстий.

2. Исходя из заданной геометрии и уравнений баланса воздуха, топлива и продуктов сгорания, находится распределение местных составов смеси подлине жаровой трубы:

$$a_i = G_b / (G_{Ti} L_0).$$

3. Располагая исходными значениями теплосодержаний смеси топлива, воздуха и продуктов сгорания можно определить среднюю температуру газов:

$$T_{n.ci} = \frac{c_{pн.с} T_{pн.ci-1} G_{n.ci-1} + c_{pв} T_{вi} \Delta G_{вi} + \eta G_{Ti} z H u}{c_{pн.с} G_{n.ci}},$$

где  $c_{pн.с}$ ,  $c_{pв}$  – теплоемкость газа и воздуха в соответствующих сечениях;  $T_{n.с}$ ,  $T_{в}$  – температура газа и воздуха;  $G_{т}$  – расход топлива;  $G_{п.с}$ ,  $G_{в}$  – расходы продуктов сгорания и воздуха;  $H$  – теплотворная способность топлива;  $\eta$  – полнота сгорания,  $z$  – степень испарения топлива.

4. При определении местных значений составов смеси необходимо знать количество вторичного воздуха, поступившего в исследуемую зону горения. Для этого определяется доля воздуха, смешавшегося с газовым потоком, с помощью коэффициентов смешения

$$G_{вi} = G_{в\Sigma} \bar{F}_{фр} (1 + m_{пi} + m_{аi}).$$

Здесь

$$m_{pi}(x, r) = A \frac{T_r W_o}{T_o W_r} \frac{1}{k} \frac{\exp K \left( 1 + \frac{r^2}{R_{30T}^2} \right) F_i}{I_0 \left( 2K \frac{r}{R_{30T}} \right) F_\Sigma} ;$$

$$k = \frac{R_{30T}}{B \left( 1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \right)^{0,5} (x + \Delta x)} ; I_0 - \text{функция}$$

Бесселя нулевого порядка;  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных, полученных при испытаниях КС прототипа:

$$m_{ai} = \frac{h_i(x) d_{oi} n_{oi} \cos \varphi}{R_{30T}^2} ;$$

$h_i$  – глубина проникновения поперечной струи в поток.

5. При решении уравнения смешения можно определить также максимальную неравномерность полей температур на выходе из камеры сгорания:

$$\Theta = 1 - \bar{F}_{\text{фр}} \left( 1 + A_1 \frac{T_r W_o}{T_o W_r} \frac{F_i}{F_m K} \frac{e^{\left( 1 + \frac{r^2}{R_{30T}^2} \right) K}}{I_0 \left( 2K \frac{r}{R_{30T}} \right)} + \sum_{i=1}^k A_2 \frac{d_{oi} n_{oi} h_{oi} \cos \varphi_i}{F_{mi}} \right) \left( 1 + \frac{1}{L_0 \alpha_{\text{фр}}} \right),$$

где  $\alpha_{\text{фр}}$  – состав смеси за фронтовым устройством;  $h_{oi}$  – глубина проникновения струи в поток;  $F_m$  – площадь жаровой трубы в  $i$ -м сечении;  $d_{oi}$ ,  $n_{oi}$  – диаметр и количество  $i$ -го ряда отверстий;  $k$  – количество отверстий;  $K = (R_{30T}^2 W_o) / (D_r l_K)$  – безразмерный комплекс.

Эмпирические коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  находятся по экспериментальным данным продувок КС-прототипов или же по испытаниям первых образцов вновь создаваемых КС. После определения постоянных коэффициентов можно выявить влияние тех или иных конструктивных параметров:  $\bar{F}_{\text{фр}}$  – степени раскрытия фронтового устройства;  $d_{oi}$ ,  $n_{oi}$  – диаметра и количества отверстий;  $F_{mi}$ ,  $l_K$  – площади миделевого сечения и

длины жаровой трубы, а также режимных параметров температуры  $T_r$  и скорости газа  $W_r$ , степени испарения топлива  $z$ , коэффициента избытка воздуха за фронтом  $\alpha_{\text{фр}}$  и коэффициента турбулентной диффузии  $D_r$ .

6. На основе теории турбулентного сгорания осредненного “объема” смеси [2] находится зависимость для определения локальной полноты сгорания топлива:

$$\eta = \frac{3U_{m0}^3}{W'^3} \left\{ \frac{1}{3} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{3\Delta x \varepsilon}{l_i} \right) \right] - \frac{U_n}{U_{m0}} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{2\Delta x \varepsilon}{l_i} \right) \right] + \frac{U_n^2}{U_{m0}^2} \left[ \left( 1 - \exp \left( - \frac{\Delta x \varepsilon}{l_i} \right) \right) \right] \right\} .$$

Здесь  $W'$  – пульсационная скорость потока;  $W' = \varepsilon W$ , где  $\varepsilon$  – интенсивность турбулентности.

Данная зависимость позволяет определить полноту сгорания осредненного объема смеси размером пропорциональным масштабу турбулентности  $l_i$  и коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_i$  за время прохождения расстояния  $\Delta x$  со скоростью потока  $W$  и сгорающей за это время с турбулентной скоростью  $U_{m0} = U_n + W'$ , где  $U_n$  – нормальная скорость горения.

7. Определение эмиссии токсичных веществ. Основной расчетной зависимостью при определении образования  $\text{NO}_x$  является уравнение Я. Б. Зельдовича:

$$\frac{d\text{NO}}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{O_2}} \exp \left( - \frac{86000}{RT_r} \right) \left[ O_2 N_2 \frac{64}{3} \exp \left( - \frac{43000}{RT_r} \right) - (\text{NO})^2 \right],$$

где  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $\text{NO}$  – мгновенные концентрации компонентов газовой смеси;  $\tau$  – время;  $T_r$  – температура в зоне реакции.

Мгновенные значения концентраций  $O_2$ ,  $N_2$  и  $T_r$  определяются по известным методам расчета состава термодинамически равновесных продуктов сгорания.

Расчеты с помощью данного дифференциального уравнения позволяют определить выделение “термических”  $\text{NO}_x$  в послепламенной зоне в результате цепной неразветвленной реакции азота и свободного кислорода в воздухе.

8. Приведенная схема автоматизированной доводки была применена при разработ-

ке камеры сгорания одного из отечественных двигателей. Как было сказано ранее, целью проведения расчетов с помощью приведенных моделей являлось снижение эмиссии  $\text{NO}_x$  и повышение надежности КС.

Предварительный анализ рабочего процесса в камере сгорания показал, что для уменьшения выделения  $\text{NO}_x$  необходимо снизить температуру газа в зоне горения путем перераспределения вторичного воздуха. Исходя из этого, были внесены соответствующие изменения в распределение вторичного воздуха путем закрытия патрубков смесителей и перераспределения этой площади на два пояса отверстий, расположенных в передней части жаровой трубы.

Расчеты характеристик, проведенные для этих вариантов конфигурации жаровой трубы, показали, что можно добиться существенного изменения характеристик путем перераспределения вторичного воздуха. На рис. 1 приведены графики изменения температуры газа, полноты сгорания и выделения  $\text{NO}_x$  по длине жаровой трубы.

Из анализа полученных расчетных кривых следует, что перераспределение вторичного воздуха приводит к снижению температуры газа в зоне горения в результате дополнительного подвода воздуха в зону горения.

В то же время, как следует из приведенных графиков, полнота сгорания снижается незначительно по сравнению с исходным вариантом. Снижение максимума температуры газа и протяженности высокотемпературной зоны позволяет уменьшить концентрацию  $\text{NO}_x$  с 0,02 до 0,01 % объема выхлопных газов.

Перераспределение воздуха также снижает общий уровень температурного напряжения стенок жаровой трубы, вследствие этого повышается надежность работы камеры сгорания.

Из приведенных результатов следует, что предложенная система автоматизированной доводки позволяет оперативно прогнозировать изменения в конструкции и соответственно значительно сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований.

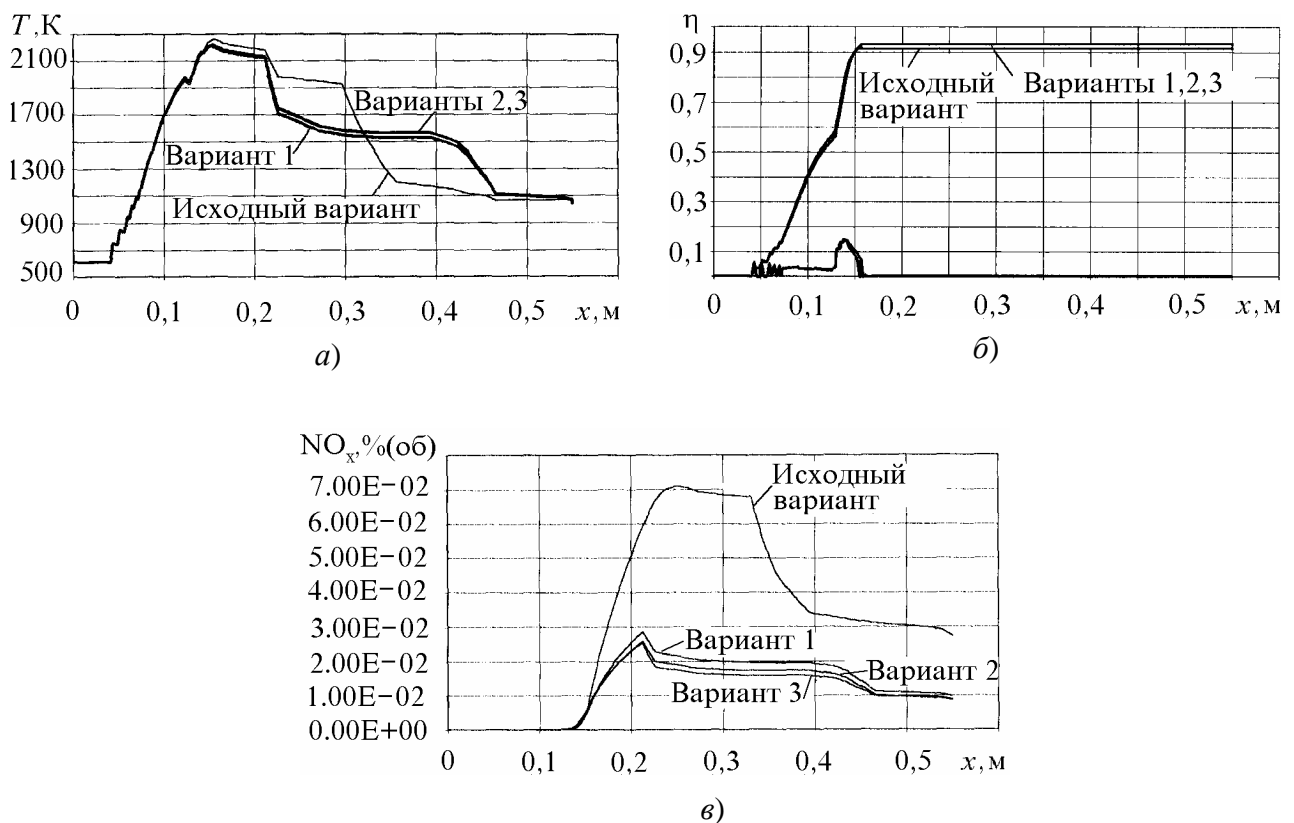


Рис. 1. Распределение параметров (а – температуры газа; б – полноты сгорания; в – концентрации  $\text{NO}_x$ ) по тракту КС при  $\alpha_k = 5,6$ ;  $T_k^* = 610 K$ ;  $P_k^* = 1,0 MPa$

Автоматизированная доводка заключается в том, что в камеру сгорания вносятся изменения с целью получения требуемых значений параметров, затем проводятся расчеты, позволяющие определить новые характеристики. На основе полученных данных корректируется облик камеры сгорания, создается экспериментальный образец и проводятся испытания.

Результаты испытаний сравниваются с заданными по техническим условиям. В случае несоответствия полученных характеристик этим условиям проводятся повторные расчеты путем внесения дополнительных изменений в конфигурацию жаровой трубы

до тех пор, пока не будет достигнуто их соответствие условиям технического задания. При достижении соответствия экспериментальных и расчетных данных условиям технического задания выполняется схемный чертеж камеры сгорания.

#### **Список литературы**

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
2. Ильяшенко С. М., Талантов А. В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. - М.: Машиностроение, 1964. – 306 с.
3. Мингазов Б. Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева (КАИ), 2006. – 219 с.

### **AUTOMATED ACCURATE FINISHING OF GAS TURBINE ENGINE'S COMBUSTION CHAMBER**

© 2007 B. G. Mingazov

Kazan State Technical University

During process of accurate grinding of gas turbine engine's elements it is paid attention to combustion chamber, because it requires a lot of experiments in laboratories and in real conditions. Software applications, realizing math models, either in design calculations or in verification calculations makes a design and accurate grinding process easy, but also decrease their costs.