

УДК 629.7.036.3

А.Н. Маркушин, А.В. Бакланов

ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»

## ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ В УКОРОЧЕННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ АВИАЦИОННОГО КОНВЕРТИРОВАННОГО ГТД

В статье описываются особенности конструкции и организации процессов в укороченных камерах сгорания на примере газотурбинной установки НК-16СТ. Показано влияние конструкции горелочного устройства, сокращение длины жаровой трубы на эмиссионные характеристики двигателя. Предложен эффективный способ улучшения эмиссионных характеристик конвертированного авиационного газотурбинного двигателя путем минимального изменения конструкции камеры сгорания, сохраняя при этом эксплуатационные свойства и заложенные характеристики двигателя, а также его пусковые качества.

**Ключевые слова:** камера сгорания, токсичность, горелочное устройство, экспериментальное исследование, модернизация, конструкция, газотурбинный двигатель, конвертирование.

### Введение

Снижение уровня выброса токсичных веществ и формирование набора конструктивных способов воздействия на эмиссию при условии сохранения надежной работы камеры сгорания является одной из актуальных задач двигателестроения, настоятельно требующей своего решения для удовлетворения параметров двигателя современным экологическим требованиям.

В настоящее время именно модернизация конструкции камеры, направленная на улучшение экологических характеристик, является экономически оправданным решением, так как создание новых камер с принципиально иной системой организации горения довольно таки дорогостоящее мероприятие, которое могут позволить

себе не многие фирмы, производящие ГТД. Представленная работа посвящена именно данной области знаний – проблеме улучшения эмиссионных характеристик конвертированного авиационного ГТД путем минимального вмешательства в конструкцию камеры.

### 1. Особенности процессов в укороченных камерах сгорания

Камеры сгорания, конструкция которых наследуется в процессе конвертирования летного двигателя в наземные установки, принято называть традиционными. В них заложены технические решения, позволяющие реализовать однозонное диффузионное горение.

Объем жаровой трубы традиционных камер сгорания можно условно разделить на три части: первичную зону горения, промежуточную зону и зону разбавления. В каждой из них протекают различные процессы, характеризующие названия этих зон (рис. 1 а).

Первичная зона горения, расположенная непосредственно за фронтным устройством, служит для подготовки горючей смеси путем распыливания топлива на мелкие капли, испарения и перемешивания его с первичным воздухом, воспламенения, стабилизации пламени и частичного выгорания топлива.

Промежуточная зона предназначена для завершения процесса сгорания топлива. Она является продолжением первичной зоны горения и позволяет увеличить время пребывания газов при высокой температуре. Распределенный по длине жаровой трубы подвод вторичного воздуха в про-

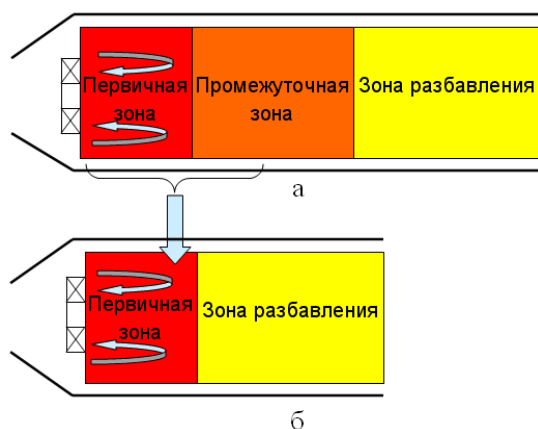


Рис. 1. Схема разделения камеры на зоны  
а - традиционная; б - модернизированная

межуточную зону предотвращает преждевременное охлаждение газа и «замораживание» химических реакций, что обеспечивает получение максимальной полноты сгорания топлива.

Смесительный воздух, который не участвует в горении топлива и охлаждении стенок, подается в зону разбавления жаровой трубы через один или несколько рядов отверстий в ее стенках. В зоне разбавления окончательно формируются среднemasсовая температура газа и температурная неравномерность в выходном сечении камеры сгорания [1].

В камере сгорания конвертированного ГТД, работающего на природном газе, не происходит распыливания и испарения топлива, поэтому процесс сжигания здесь формируется в одной об-

ласти, что в свою очередь позволяет объединить первичную и промежуточную зоны и реализовать сокращение размеров жаровой трубы (рис. 1 б). Однако, требование сокращения длины камеры сгорания стимулирует поиск путей интенсификации процессов сжигания топлива и смешения продуктов сгорания с воздухом, чем обусловлен некоторый отход от традиционных схем организации процессов.

На рис.2. представлены схемы укороченных камер сгорания для ГТД НК-16СТ, разработка которых ведется на ОАО «КМПО».

Камера состоит из корпуса, жаровой трубы и газового коллектора для подачи газа к форсункам. Жаровая труба — кольцевая, малой длины, многосекционная с конвективно-пленочным охлаждением [2].

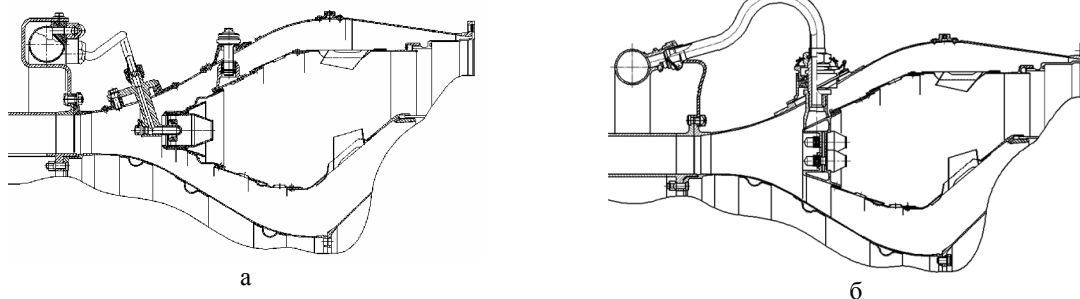


Рис. 2. Конструктивная схема укороченных камер сгорания  
а- 32-х горелочная; б- многофорсуночная

В конструкции фронтного устройства камеры (рис. 2 а), 32-вихревые газовые горелки устанавливаются равномерно по окружности между внутренним и наружным кожухами жаровой трубы (рис. 3 а). Топливо, подаваемое газовыми форсунками вдоль оси каждой из горелок, перемещивается с закрученным в завихрителе потоком воздуха. В результате в первичной зоне камеры сгорания за каждой из вихревых горелок формируются потоки топливоздушной смеси, имеющие приосевые циркуляционные области. Наличие таких областей обеспечивает циркуляцию горячих продуктов сгорания и активных центров из зоны горения к корню факела свежей смеси, что создает условия для устойчивого воспламенения и стабилизации пламени.

Схема многофорсуночной камеры сгорания показана на рис. 2 б. Принципиальной особенностью камеры сгорания этой схемы является фронтное устройство с большим числом форсунок. Это устройство состоит из корпуса, в котором расположены полости топливных коллекторов, соединенные радиальными каналами с топливными форсунками. 136 топливных форсунок установлены в корпусе головки в два ряда в шахматном порядке (рис. 3 б). Форсунки располагаются в отверстиях корпуса головки, вокруг каждой форсунки в корпусе головки выполнены фигурные окна для подвода воздуха к завихрителям. Топливо из струйных форсунок подается во внутреннюю полость конуса.

Основные характеристики серийной и укороченной камеры сгорания занесены в таблицу 1.



Рис. 3. Фронтное устройство укороченных камер сгорания  
а- 32-х горелочная; б- многофорсуночная

Таблица 1

Основные характеристики серийной и укороченной камеры

	$V, \text{ м}^3$	$Q_v, \text{ Дж/ч} \cdot \text{ м}^3 \cdot \text{ Па}$	$t, \text{ с}$	$K_v, \frac{\text{кг}}{\text{атм}^{1,25} \cdot \text{с} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^3}$	$\eta_{\Gamma}$
серийная	0,240244	959215,0893	0,011407	0,0495	0,998
укороченная	0,12037	1894939,197	0,005715	0,0989	0,993

## 2. Расчетные характеристики камер сгорания

1. Параметр объемной теплонапряженности, который характеризует эффективность использования объема жаровой трубы:

$$Q_v = \frac{G_T \cdot H_u \cdot \eta_{\Gamma}}{V_{\text{ж}} \cdot P_K^*}, \quad (1)$$

где  $P_K^*$  – давление за компрессором;

$H_u$  – низшая теплотворная способность;

$\eta_{\Gamma}$  – полнота сгорания;

$V_{\text{ж}}$  – объем жаровой трубы.

2. Среднее время пребывания газа в камере сгорания определяется зависимостью:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{ж}} P_K^*}{R_B T_K^* G_B}, \quad (2)$$

где  $G_B$  – расход воздуха за компрессором;

$T_K^*$  – температура за компрессором.

3. Параметр форсирования, интерпретируемый как отношение времени химической реакции ко времени пребывания смеси в жаровой трубе:

$$K_v = \frac{G_B}{P_K^{*1,25} \cdot T_K^* \cdot V_{\text{ж}}} \quad (3)$$

4. Полнота сгорания топлива

$$\eta_{\Gamma} = 1 - 0,8 \cdot k_v^2 \quad (4)$$

Укорочение длины жаровой трубы на 38,5% с 0,575 до 0,347 м, привело к сокращению ее объема. Вследствие чего уменьшилось время пребывания  $\tau_{\text{пр}}$  газов с 11 мс – серийная камера до 6 мс – укороченная.

Для базовой, серийной конструкции  $Q_v$  составляет 0,95, что свидетельствует о запасе по теплонапряженности. Для укороченной камеры данный параметр составляет  $1,8 \cdot 10^6$  Дж/ч·м<sup>3</sup> Па, что укладывается в диапазон  $Q_v = (1,2 - 6,5) \cdot 10^6$  Дж/ч·м<sup>3</sup> Па [3], рекомендованный для современных камер сгорания ГТД.

Объем жаровой трубы достаточен для обеспечения заданной полноты сгорания топлива на номинальном режиме не менее 99%.

## 3. Результаты испытаний. Анализ

В ходе испытаний полноразмерной камеры сгорания проводилось измерение радиальной неравномерности поля температуры газа (рис. 4).

Измерения показали, что на выходе из 32-х горелочной камеры в районе термопары №4 наблюдается увеличение температуры по сравнению с камерой, имеющей многофорсуночное фронтное устройство. Это позволяет считать, что 32-х горелочное устройство формирует в жаровой трубе более горячее ядро потока. Процесс объясняется смыканием вихревого слоя и уменьшением поперечных размеров зоны рециркуляции, что привело к локализации высокотемпературных масс газа в приосевой области горелки.

В многофорсуночной камере топливовоздушная смесь образуется по схеме с предварительным частичным смешением в горелке. Большое количество горелок обеспечивает увеличение числа поверхностей горения, вследствие чего сжигание заданного количества топлива осуществляется на меньшей длине, чем при использовании малого числа горелок.

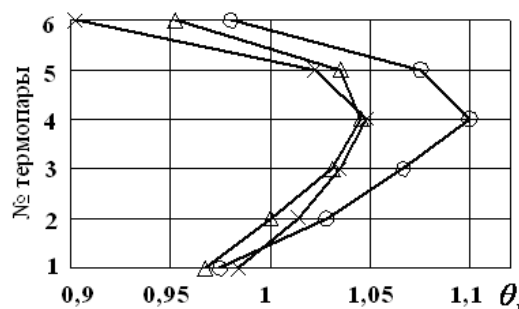


Рис. 4. Профили радиальной температурной неравномерности на выходе из камер сгорания × – 32-х горелочная камера; Δ – многофорсуночная камера; ○ – норма ГТУ

В связи с тем, что ГТУ большую часть своего ресурса работают на режимах (0,7...1,0) от номинального, то наиболее характерными являются показатели выбросов, измеренные на данном режиме.

Поэтому на рис. 5. представлены выбросы СО и NO<sub>x</sub> для серийной и укороченных камер, на номинальном режиме работы двигателя Ne = 16МВт.

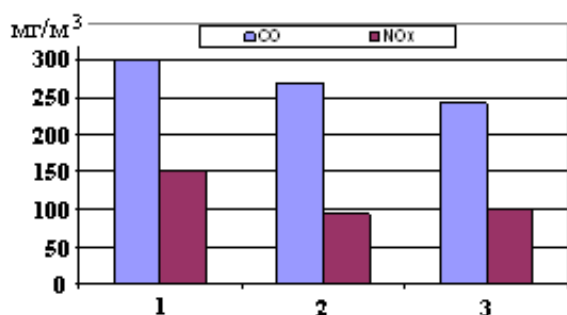


Рис. 5. Концентрация CO и NO<sub>x</sub> (приведены к условному содержанию кислорода в выхлопных газах, равному 15%): 1 - серийная камера; 2 - 32-х горелочная камера; 3 - многофорсуночная камера

### Выводы

Установлено, что снижение времени пребывания продуктов сгорания в камере, путем сокращения объема жаровой трубы позволяет снизить выбросы NO<sub>x</sub> до 40% по сравнению с серийной камерой сгорания, сохранив при этом неизменными основные параметры и эксплуатационные свойства ГТД.

Выявлено, что увеличение числа горелок является эффективным средством управления процессом сжигания газообразного топлива в укоро-

ренных камерах сгорания, позволяющим улучшить эмиссионные характеристики двигателя, работающего на газообразном топливе (рис.5).

Снижение CO в камере с многофорсуночным фронтальным устройством по сравнению с 32-х горелочным объясняется тем, что сжигание заданного количества топлива осуществляется на малом расстоянии и, как следствие, способствует более быстрому выгоранию смеси.

### Литература

1. Конструкция и рабочий процесс камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. пособие / И.Ф. Кравченко, В.Е. Костюк, Ю.А. Гусев, В.Н. Гусев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 89 с.
2. Маркушин А.Н. Снижение токсичности выхлопных газов в конвертированном авиадвигателе путем модернизации конструкции камеры сгорания [Текст]/Маркушин В.К., Бакланов А.В // Вестник двигателестроения. – 2010. - №2. – С. 136-140.
3. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, Ю.Л. Ковылов [и др.]. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 620 с.

Поступила в редакцию 02.05.2012

### A.N. Markushin, A.V. Baklanov. Shortened combustion chamber burning features at converted GTE

*This article is aimed at demonstrating design features and combustion process organization of the shortened combustion chamber installed at NK-16ST gas turbine engine. It shows the influence of the new burner design and shorter flame tube on the environmental performance of the engine. There was introduced the way of improving environmental characteristics of the gas turbine engine with minimal changes to the original design of the combustion chamber. Service characteristics, starting properties and general performance of the engine stay the same.*

**Key words:** the combustion chamber, toxicity, experimental research, modernization, a design, gas turbine engine, converting.