

монодисперсных частиц, либо на макетах с числом их размерных фракций не более 4-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.А. Исследование качества распыливания топлива и его влияния на характеристики камер сгорания малоразмерных ГТД // Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т (СГАУ), 1996.-267с.
2. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД. –М: Мир, 1986. – 566с.
3. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола – М: Наука, 1990.-232с.
4. Савельев Б.А. О применимости теории однократного рассеяния для узких световых пучков // Изв. вузов.Физика. –1967, № 12. –С.135-136.

УДК 621.438.056

ОПЫТ ОТРАБОТКИ КАМЕР СГОРАНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ СХЕМ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ГТУ

Маркушин А.Н., Постников А.М., Савченко В.П.

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

Камеры сгорания традиционных схем, в которых топливо сгорает в диффузионных пламенах, обладают рядом очевидных преимуществ перед создаваемыми в настоящее время для улучшения экологических характеристик двухзонными (многозонными) камерами сгорания различных схем, в которых все топливо или его большая часть сгорает в гомогенном (или близким к этому) пламени при низких температурах. Простота, надежность, десятилетиями отработанная технология проектирования, изготовления и эксплуатации, одноконтурная система подачи топлива и однозначность управления ее делают обоснованными многочисленные попытки конструкторов усовершенствовать традиционные камеры сгорания с целью улучшения их экологических характеристик.

Известно, что для авиапроизводных ГТУ с высокими параметрами цикла рабочего процесса ($\pi_k > 20$), особенно актуальны снижение выбросов оксидов азота, NO_x , и надежность «горячих» узлов двигателя, в частности, камеры сгорания.

Целью экспериментальных исследований, выполненных в СНТК им. Н.Д.Кузнецова, являлось:

- отработка технологии «пределных возможностей» по снижению выбросов NO_x камерами сгорания традиционных схем;
- повышение ресурса жаровой трубы.

Исследования проводились на базе высокоэффективного ($\eta_k = 24$) авиапроизводного двигателя НК-36СТ, работающего на природном газе и предназначенного для ГПА-Ц-25/76.

Сравнение различных конструкций традиционных камер сгорания не является предметом рассмотрения данной статьи. Отметим, однако, что при конвертировании авиадвигателей для нужд народного хозяйства, наше предприятие идет на замену оправдавшего себя в авиации многофорсуночного фронтowego устройства камер (рис. 1а) на фронтное устройство с уменьшенным числом горелок (около 30, рис. 1б), исходя из следующих соображений:

- уменьшается вероятность коксования топливных элементов;
- при прочих равных условиях уровень выбросов NO_x многофорсуночными камерами не отличается от уровня выбросов более простых и дешевых камер с умеренным числом горелок;
- при переходе на газообразное топливо конуса форсунок многофорсуночной камеры сгорания, выступающие в жаровую трубу, и плита имеют худшее тепловое состояние, чем при работе на керосине.

Доводка по надежности жаровой трубы производилась на стендах puzzle доводки и в составе двигателей.

Разработаны и внедрены новые конструкции подвески жаровой трубы (рис. 1г), плиты, на которой монтируются горелки (рис. 1д), элементов охлаждения горелок (рис. 1е). Эти разработки позволили соответственно:

- повысить надежность жаровой трубы путем «ухода» от резонансных колебаний;
- повысить надежность жаровой трубы устранением заклепочных швов на стенках;
- повысить надежность горелок организацией заградительного охлаждения.

Конструктивная схема базовой камеры сгорания представлена на рис. 1б, номинальные показатели концентраций выбросов вредных веществ, замеченные на двигателе НК-36СТ, составляют:

- $C_{NOx} = 560 \text{ мг/нм}^3$ и $C_{CO} = 15 \text{ мг/нм}^3$ при норме по ГОСТ 28775-90;
- $C_{NOx} \leq 150 \text{ мг/нм}^3$ и $C_{CO} \leq 300 \text{ мг/нм}^3$ [15% O_2].

Отработка по экологическим характеристикам с целью снижения выбросов NO_x производилось путем:

- обеднения топливоздушнной смеси в первичной зоне;
- интенсификации смешения топлива с воздухом и продуктами сгорания;
- уменьшения времени пребывания газов в зоне горения.

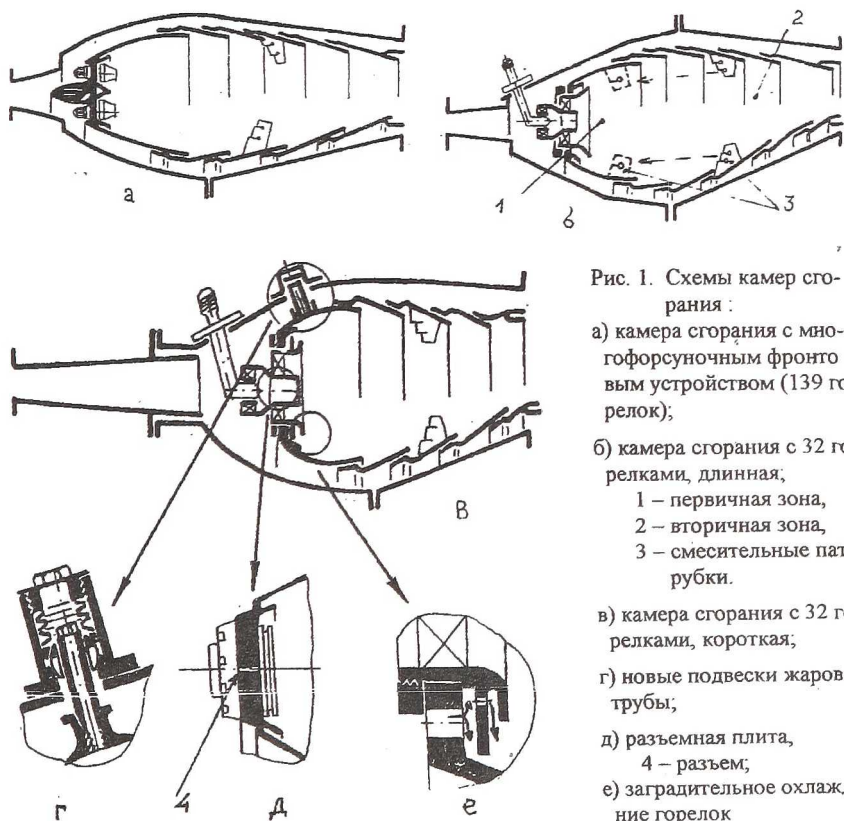


Рис. 1. Схемы камер сгорания :

- а) камера сгорания с многофорсуночным фронтным устройством (139 горелок);
- б) камера сгорания с 32 горелками, длинная;
 - 1 – первичная зона,
 - 2 – вторичная зона,
 - 3 – смесительные патрубki.
- в) камера сгорания с 32 горелками, короткая;
- г) новые подвески жаровой трубы;
- д) разъемная плита,
 - 4 – разъем;
- е) заградительное охлаждение горелок

Было исследовано более 30 вариантов конструктивных решений по реализации указанных принципов, в том числе 22 варианта горелок. Их основные типы приведены на рис. 2.

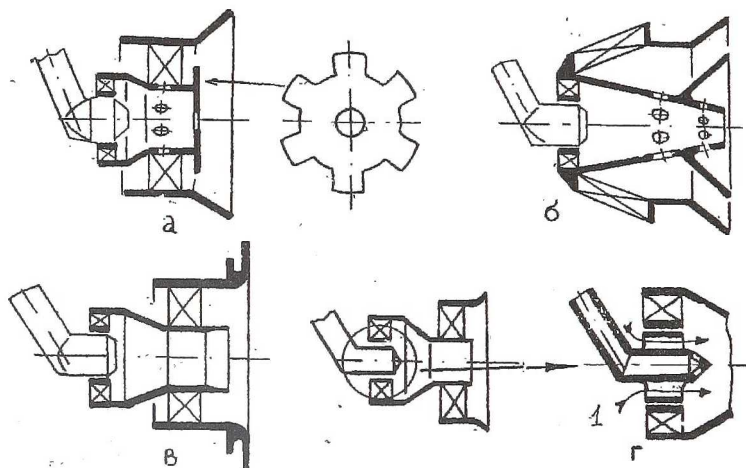


Рис. 2. Основные типы исследованных горелок:

- а) горелки со смесителем в виде «звездочки»; б) горелки с угловым стабилизатором;
 в) вихревая двухконтурная горелка; г) усовершенствованная вихревая горелка
 1 – дополнительная подача воздуха вдоль оси

Уменьшение времени пребывания газов в зоне горения первоначально производилось путем укорочения первичной зоны за счет сдвига смесительных патрубков к головке (рис. 1б). В результате этого и применения лучших (рис. 1в) горелок получено снижение NO_x до 460 мг/нм^3 , т.е. всего на 18% от исходного уровня. И только при уменьшении объема всей жаровой трубы в 2 раза (рис. 1в) удалось снизить выбросы NO_x до 340 мг/нм^3 . Это, по-видимому, объясняется не только уменьшением времени пребывания «горячих газов», но и тем, что по Ф.Дрисколу «ограничивающая геометрия повышает интенсивность процессов в рециркуляционной зоне». Поле температур на выходе из камеры сгорания ухудшилось: $\theta_{\text{max}} = 0.29$ (было на базовом варианте $\theta_{\text{max}} = 0.22$), но осталось в пределах, допускаемых нормами $\theta_{\text{max}} \leq 0.38$ (рис. 3б).

Ухудшалась также устойчивость пламени относительно «бедного» срыва (рис. 3в). «Размен» запасов устойчивости горения на возможность снижения NO_x можно производить при достоверной информации по изменению состава топливовоздушной смеси в камере сгорания в наиболее неблагоприятных условиях.

поприятных условиях работы двигателя по ее обеднению: при выходе на режим малого газа (прогрева) и закрытии клапанов перепуска воздуха компрессора высокого давления, (закрытие клапанов приводит к резкому повышению расхода воздуха в камеру сгорания).

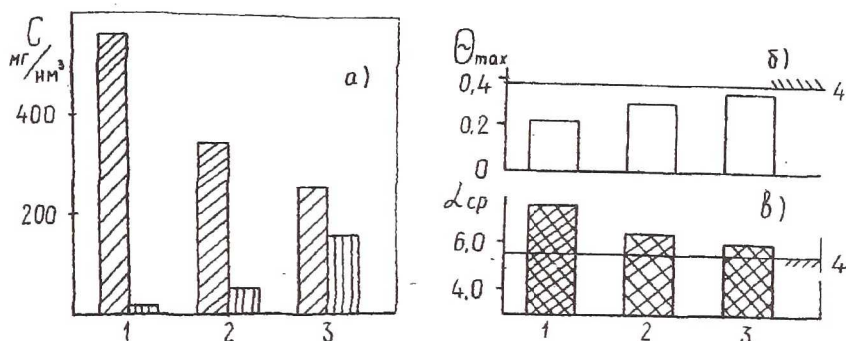


Рис. 3. Характеристики камер сгорания :

а) – эмиссионные характеристики

- – концентрация,
- – концентрация CO ,
- – неравномерность температурного поля, θ_{max} ;

б) – температурное поле

$$\theta_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}}^* - T_{\text{ср}}^*}{T_{\text{ср}}^* - T_{\text{к}}^*};$$

T_{max}^* , $T_{\text{ср}}^*$ – максимальная и средняя температура газа на выходе из КС ;

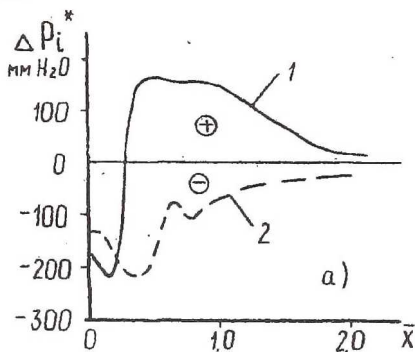
в) – характеристика срыва пламени :

- – коэффициент состава смеси (избытка воздуха) при срыве пламени $\alpha_{\text{ср}}$.
- 1 – исходная длинная КС с 2-х контурными горелками; 2 – короткая КС с 2-х контурными горелками, рис. 2в; 3 – короткая КС с 3-х контурными горелками, рис. 2г; 4 – требование норм

Проведенное осциллографирование по воздушному и топливному трактам двигателя позволили обоснованно назначить границу устойчивости горения по коэффициенту состава смеси α при технологических испытаниях камеры на автономном стенде, линия 4 (рис. 3в).

Дальнейшее снижение NO_x с использованием резервов по устойчивости горения и температурному полю производилось по результатам исследований структуры потока в следе за горелками.

Известно, что наличие в следе за горелками развитой зоны обратных токов (ЗОТ) увеличивает фактическое время пребывания «горячих» газов, а в объеме ЗОТ реализуется максимальная температура пламени. В результате исследований удалось подачей небольшого количества воздуха в виде кольцевой струи вдоль оси горелки (около 8% от воздуха, идущего в горелку), рис. 2г, уменьшить протяженность ЗОТ и «вынести» часть топлива за преде-



$$X = \frac{D_{\text{гор}}}{\Delta P_i}; \quad D_{\text{гор}} - \text{диаметр горелки}; \quad \Delta P_i - \text{осевая составляющая скоростного напора};$$

T_i – температура пламени, рассчитанная по результатам химанализа проб газа;
1 – усовершенствованная вихревая горелка, рис. 2г

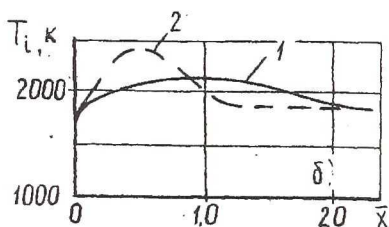


Рис. 4. Результаты измерения параметров вдоль оси горелки при испытании отсека КС в стендовых условиях:
 $P_{\text{вх}}^* = 1,1 \text{ кг/см}^2$; $t_{\text{вх}}^* = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; $\alpha = 3,0$;

лы ЗОТ, снизив тем самым максимальную температуру пламени (рис. 4).

При испытании камеры сгорания с такими горелками в составе двигателя получен значительный эффект – выброс NO_x снизился до 250 мг/нм^3 (рис. 3а). При этом произошло планируемое ухудшение характеристик устойчивости горения, температурного поля и выбросов CO , уровень которых приблизился к допустимым нормам (рис. 3 а, б, в). Необходимо отметить, что понадобилась индивидуальная доводка камеры сгорания по окружной неравномерности температурного поля.

Таким образом, технология «пределных возможностей» позволяет существенно снизить выбросы оксидов азота по сравнению с выбросами ГТУ с традиционными камерами сгорания (рис. 5), а на двигателях со степенью сжатия в компрессоре $\pi_k < 18$ – обеспечить выполнение требований ГОСТ 28775-90.

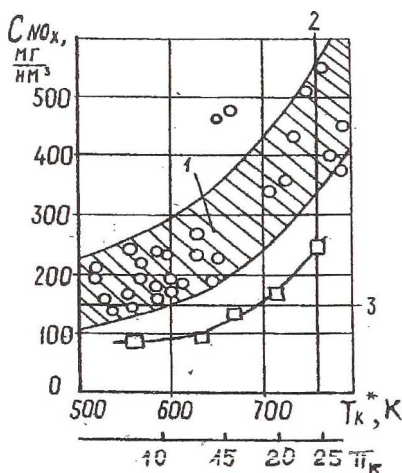


Рис. 5. Сравнение выбросов NO_x двигателем НК-36СТ с усовершенствованной КС со статистикой выбросов промышленными ГТУ с традиционными камерами сгорания.

□ – двигатель НК-36СТ; 1 – статистическое поле выбросов, 2 – номинальный режим двигателя НК-36СТ, 3 – норма C_{NO_x} по ГОСТ 28775-90 для ГПА

«Пределные возможности» ограничиваются:

- запасами по «бедному» срыву пламени;
- полнотой сгорания топлива (которая определяет выбросы CO) особенно на пониженных режимах работы;
- требованиями по равномерности температурного поля перед турбиной.

Реализация технологии «пределных возможностей» в производстве означает ужесточение требований по точности изготовления камер сгорания и введение их контрольных испытаний, а при необходимости и доводки на автономном стенде по температурному полю перед постановкой на двигатель.

Усовершенствованная по надежности и экологическим характеристикам камера сгорания традиционной схемы двигателя НК-36СТ прошла все виды специспытаний, полный объем проверок по программе Межведомственных испытаний в составе двигателя на ГПА-Ц-25/76 Тольяттинской компрессорной станции. Нарботка без замечаний по камере сгорания более 3500 часов. Камера изготавливается серийно АО «Металлист – Самара».

УДК 621.452.32

К ПРОБЛЕМЕ ВЫБРОСА БЕНЗ(а)ПИРЕНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОПЛИВ ШИРОКОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА

Матвеев С.Г., Орлов М.Ю., Чечет И.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Сохраняющийся уровень авиаперевозок и рост количества автомобилей не позволяют снять с повестки дня проблему загрязнения окружающей среды отработавшими газами двигателей, работающих на углеводородных топливах. В настоящее время в отработавших газах авиационных двигателей нормируется содержание окиси углерода, окислов азота, суммарных углеводородов и сажевых частиц. Вместе с тем, доля вредности ненормируемых компонентов соизмерима с суммарной вредностью указанных веществ, а при определенных условиях может и превышать ее. Существующие данные по вы-