

УДК 621.431.75

МНОГОФОРСУНОЧНАЯ КАМЕРА СГОРАНИЯ – ОСНОВА ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Бирюк В.В., Горшкалёв А.А., Лукачёв С.В., Цыбизов Ю.И.

*Самарский государственный аэрокосмический университет
(национальный исследовательский университет)
им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия*

Данная работа была выполнена при поддержке
Министерства образования и науки Российской Федерации
в рамках реализации программы
«Исследования и разработки по приоритетным
направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014- 2020»

АННОТАЦИЯ

Обеспечение экологической безопасности авиационных двигателей является важной задачей для разработчиков. Эта проблема становится более актуальной в связи с увеличением мощности двигателя, поскольку увеличение мощности достигается, в первую очередь, за счет повышения температуры в камере сгорания, приводящее к увеличению выбросов NO_x . По мнению авторов данной статьи существенно снизить образование вредных веществ в процессе эксплуатации авиационного двигателя можно с использованием многоочагового режима горения топлива в камере сгорания.

ВВЕДЕНИЕ

Авиационный транспорт является источником загрязнения окружающей среды. Основной вклад в загрязнения от этого вида транспорта вносят самолетные двигатели. При работе авиационных двигателей происходит выброс в атмосферу вредных веществ: CO (монооксид углерода), C_xH_y (несгоревшие углеводороды), NO_x (оксиды азота). Разработчики должны обеспечивать соответствие экологических параметров авиационных двигателей стандартам, принятым Международной организацией гражданской авиации (ИКАО). Это позволит создавать двигатели, которые будут успешно конкурировать на международном рынке.

В Российской Федерации основные направления развития авиационных двигателей определяются Центральным институтом авиационного моторостроения (ЦИАМ). Институт разработал основные направления развития авиационного двигателестроения на ближайшие годы. Главной

в работе приводятся данные по экологическим характеристикам авиационных газотурбинных двигателей различных мировых производителей. Представлены результаты анализа разработки и испытаний многофорсуночной малоэмиссионной камеры сгорания двигателей ОАО «Кузнецов» (г. Самара, Российская Федерация). Показано, что предложенная компоновка многофорсуночной камеры сгорания позволяет обеспечить экологическую безопасность и высокую надежность работы двигателя на различных режимах эксплуатации.

идеей данных направлений является уменьшение количества разработок новых двигателей и сосредоточение внимания на модификации существующих изделий с целью улучшения их экологических, тяговых характеристик и повышения надежности [1, 2].

Авиационный двигатель работает в нескольких режимах эксплуатации: режим малого газа, режим взлета-посадки, режим крейсерского полета. При этом режим крейсерского полета характерен тем, что он выполняется при внешних условиях больших высот, существенно отличающихся от двух других режимов: экстремально низкие температуры, пониженное давление и т.д.

В настоящее время в авиации применяются, в основном, газотурбинные двигатели (ГТД). Одним из наиболее эффективных способов увеличения мощности и улучшения экологических характеристик ГТД является оптимизация процесса горения топлива

в камере сгорания (КС) двигателя. Кроме того, от стабильности процесса горения топлива зависит также его способность надежно работать на разных режимах эксплуатации.

В течение последних 2-х десятилетий в рамках программы ЦИАМ по улучшению характеристик авиационных двигателей выполняются научные исследования и разрабатываются конструкции различных типов камер сгорания. В Самарском Государственном Аэрокосмическом Университете им. акад. С.П. Королева (г. Самара, Российская Федерация) выполнялись научные исследования многоочагового (многофакельного) процесса горения топлива [3]. Результаты этих исследований позволили совместно с ОАО «Кузнецов» (г. Самара,

Российская Федерация) разработать многофорсуночную КС, удовлетворяющую современным требованиям ICAO. Камеры сгорания такого типа устанавливаются на авиационных двигателях семейства «НК», разрабатываемых ОАО «Кузнецов». В работах [4-11] представлены основные результаты данных исследований. Они составляют основу для дальнейших разработок надежных и экологически безопасных КС авиационных и наземных ГТД.

Ниже описаны основные элементы методологии разработки и доводки многофорсуночных малоэмиссионных КС с точки зрения вопросов экологии и надежности.

ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ И НОРМИРОВАНИЕ ЭМИССИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

Вредное воздействие ГТД принято разделять на выбросы вредных веществ в приземной области – до 900 м и в области больших высот – от 11 до 20 км [12].

В приземной области авиационный двигатель работает на режиме малого газа (рулежка) и в режиме взлет-посадка в зоне аэропорта. Основное влияние проявляется в выбросах CO , C_xH_y , NO_x . На больших высотах в режиме длительного крейсерского полета к выбросам вредных веществ добавляется еще образование конденсационных следов. Результаты исследований [13, 14] показывают, что конденсационные следы, образующиеся при работе авиационного двигателя на больших высотах, вызывают нарушения радиационного баланса между атмосферой и земной поверхностью. Это приводит к изменению воздушных течений в атмосфере, появлению расслоения (стратификации) [15], образованию перистых облаков, которые являются основной причиной возникновения парникового эффекта [16].

Увеличение тяги двигателя может быть достигнуто за счет повышения термодинамических параметров процесса: температуры газа перед турбиной, давления и др. Увеличение этих характеристик повышает риск возникновения конденсационных следов. Кроме того, известно, что скорость образования оксидов азота также увеличивается с ростом температуры. Эти явления в совокупности с возрастающим год от года трафиком авиационных перевозок приводят к сильному воздействию на экологию. Ожидается, что к 2050 году вклад авиации в изменение климата будет составлять до 5% от общего воздействия.

Использование водорода в качестве топлива является перспективным направлением в разработке новых видов авиационных двигателей. При его сжигании образование вредных веществ минимально. Однако следует заметить, что на сегодняшний

момент водородное топливо является достаточно дорогим. Кроме того, при его использовании конденсационные следы будут образовываться все равно.

Для контроля эмиссии вредных веществ продуктов сгорания топлива на авиационном транспорте в 1986 г. комитет ICAO по защите окружающей среды от воздействия авиации (CAEP) ввел первые Международные нормы на эмиссию NO_x , CO , C_xH_y и дыма. Основной целью этих норм является контроль загрязненности атмосферы в районе аэропортов за стандартный взлетно-посадочный цикл (СВПЦ) работы двигателя. Нормирование эмиссии авиационных двигателей производится по величине параметра эмиссии оксидов азота I_{NO_x} , который представляет собой отношение массы NO_x в граммах, выброшенной из двигателя в атмосферу за режим СВПЦ, к установленной взлетной тяге двигателя в кН. С 1986 г. ICAO последовательно ужесточала международные нормы по эмиссии NO_x от ГТД (CAEP/2 в 1996 г., CAEP/4 в 2004 г., CAEP/6 в 2008 г.). Нормы выбросов остальных вредных веществ (ВВ) сохраняются на прежнем уровне. В 2014 г. введена норма CAEP/8, регламентирующая уменьшение эмиссии NO_x на 15% по сравнению с нормами 2008 г. (или на 50% к нормам 1986 г.). Планируется дальнейшее снижение Международных норм к 2020 г. по параметру I_{NO_x} на 45 %, а к 2030 г. – на 60 % по отношению к нормам 2008 г.

Значения эмиссии вредных веществ изложены в Международном стандарте ICAO (Приложение 16 «Охрана окружающей среды» к Конвенции о международной авиации, том II «Эмиссия авиационных двигателей»).

Необходимо отметить, что многие страны определяют свои стандарты на выбросы, опираясь на нормы ICAO. В России стандарт ICAO лежит в основе национальных Авиационных правил (часть 34

«Охрана окружающей среды. Нормы эмиссии для авиационных двигателей»). Эти стандарты определяют также порядок проведения сертификационных испытаний.

Как уже отмечалось выше, повышение мощности газотурбинного двигателя и КПД использования топлива в нем связаны с увеличением температуры и давления газа перед турбиной. Для этого необходимо повышать температуру горения топлива в КС двигателя. Повышение температуры в зоне горения приводит к росту скорости образования NO_x в продуктах горения топлива. Таким образом, совершенствование ГТД путем простого повышения термодинамических параметров цикла двигателя вступает в конфликт с требованиями экологической безопасности.

Согласно требованиям ИКАО по нормированию уровня эмиссии определяется параметр эмиссии Π_k загрязняющего вещества k за СВЩ [11]. Параметр эмиссии Π_k рассчитывается по формуле:

$$\Pi_k = \frac{\sum_i \tau_i \cdot 60 \cdot G_{fuel} \cdot EI_{ki} \cdot 10^{-3}}{R_{oo}}$$

Здесь: i –

режим работы двигателя;

k –

вид токсичного вещества (CO , NO_x , C_xH_y);

τ_i –

время работы двигателя на i -м режиме, в мин;

R_{oo} –

сертифицированная максимальная тяга для взлета при нормальных эксплуатационных условиях в статических условиях Международной Стандартной Атмосферы (МСА) на уровне моря, в кН;

$G_{топл}$ –

расход топлива на i -м режиме работы двигателя;

EI_{ki} –

индекс эмиссии k -го вещества на i -м режиме работы двигателя.

Стандартный взлетно-посадочный цикл включает следующие режимы работы двигателя:

- взлет ($R_{oo} = 100\%$) в течение 0.7 мин;
- набор высоты ($R = 85\% R_{oo}$) в течение 2.2 мин;
- посадка ($R = 30\% R_{oo}$) в течение 4 мин;
- малый газ ($R = 7\% R_{oo}$) в течение 26 мин.

Параметр эмиссии Π_k зависит от совершенства КС и экономичности двигателя. Совершенство горения с точки зрения выброса вредных веществ определяет индекс эмиссии EI_{ki} – отношение массы k -го загрязняющего вещества в граммах к массе топлива в кг на i -м режиме работы двигателя.

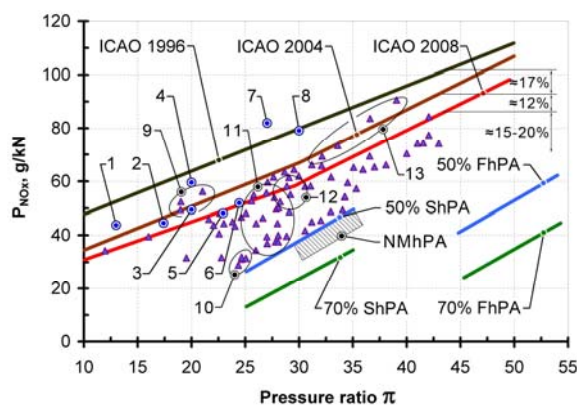


Рис. 1. Зависимость параметра эмиссии Π_{NO_x} от $\pi_{к0}$.

На рис. 1 на основании данных ЦИАМ представлены действующие и перспективные нормы ИКАО в виде зависимости параметра эмиссии оксида азота Π_{NO_x} от суммарной степени сжатия компрессора на взлетном режиме $\pi_{к0}$. Эти стандарты распространяются на ГТД с тягой более 26.7 кН. Здесь же в сравнении приведены эмиссионные характеристики ряда современных двигателей.

Обозначения на рисунке:

- Авиационные двигатели:

- 1 – Kuznetsov NK-86;
- 2 – Soloviev D-30KU-154 with LECC;
- 3 – Soloviev D-30KP;
- 4 – Lotarev-D-36;
- 5 – Progress D-436;
- 6 – Progress D-18;
- 7 – Aviadvigatel PS-90A-76;
- 8 – Aviadvigatel PS-90A;
- 9 – Pratt & Whitney JT8D-200;
- 10 – General Electric CFM56-5B;
- 11 – General Electric CFM56-7B;
- 12 – Pratt & Whitney V2520-A5;
- 13 – Pratt & Whitney PW 4090

- ИКАО 1996, ИКАО 2004, ИКАО 2008 – нормы ИКАО по годам;
- 50 % FhPA/ShPA – 50 % цели NASA для дальне/ближне-магистральных самолетов;
- 70 % FhPA/ShPA – 70 % цели NASA для дальне/ближне-магистральных самолетов;
- NMhP – область турбовентиляторных ближне- и средне-магистральных самолетов.

В таблице 1 представлены данные по параметрам эмиссии для ряда современных ГТД.

Табл. 1 Параметры двигателей

Двигатель \ Параметр	$\pi_{к0}$	P_{NO_x}	P_{CO}	$P_{C_xH_y}$
		г/кН	г/кН	г/кН
Aviadvigatel PS-90	30.8	86.04	16.66	1.4
General Electric CFM-56	25.6	43.9	36.1	0.5
Rolls-Royce RB 211-524D4	31.5	86...92	42.86	9.09
General Electric CF6-50C	29.4	48.3	38.1	2.3
Pratt & Whitney V-2500	29	48	16.52	0.98

В настоящее время ICAO продолжает работы по распространению действующих норм на эмиссию и

шум с зоны аэропортов на весь полет по маршруту [17]. Ожидается, что в высотных условиях крейсерского полета индекс эмиссии EI_{NO_x} не будет превышать величины 5...10 г/кг топлива.

Все развитые страны вводят и свои строгие ограничения на эмиссию выбросов.

Так, например, для аэропорта в Цюрихе действует система штрафов за превышение выброса вредных веществ. Оценка оплаты определяется фактором эмиссии EEF . Он определяется как сумма P_{NO_x} и $P_{C_xH_y}$. По тяговым характеристикам двигателей самолеты разделены на классы. Для каждого класса определен допустимый уровень величины EEF . При превышении этого уровня взывается дополнительная плата.

ПРОБЛЕМЫ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ СОЗДАНИИ МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Как уже указывалось выше, повышение эффективности ГТД за счет увеличения термодинамических параметров цикла: температуры и давления продуктов сгорания перед турбиной приводит к росту эмиссии NO_x и конфликту с существующими и будущими нормами ICAO. При разработке камеры сгорания авиационного двигателя существуют ограничения, накладываемые на габариты и массу изделия. Кроме того, необходимо обеспечивать стабильный процесс горения топлива в различных условиях эксплуатации: как вблизи поверхности, так и на больших высотах. Наконец, для авиационных ГТД характерными являются высокие требования к динамике изменения режимов работы двигателя (приемистость, реверсирование тяги и т.д.). Таким образом, создание высокоэффективной и экологически чистой КС является очень сложным многофакторным процессом. [18].

Анализ вышеперечисленных факторов позволил сформулировать следующие основные требования к перспективным камерам сгорания ГТД:

- обеспечение работоспособности КС при повышенных температурах воздуха на входе в КС до 930 К и продуктов сгорания на выходе из нее до 2000 К;
- увеличение долговечности жаровой трубы КС до 20 000 полетных циклов (40 000 ч);
- обеспечение работоспособности КС в широком диапазоне эксплуатационных условий двигателей (при температуре окружающего воздуха от -55°C до $+50^{\circ}\text{C}$), на режимах приемистости двигателя и других переменных режимах;

- обеспечение эмиссии вредных веществ ниже норм ICAO 2008 года на 30%;
- в перспективе, дополнительное снижение эмиссии оксидов азота NO_x на 45% (к 2020 г.) и на 60% (к 2030 г.) в зоне аэропортов;
- обеспечение эмиссии NO_x на уровне 5...10 г/кг топлива в верхних слоях атмосферы.

В сравнении с существующими величинами этих параметров повышение температуры газов происходит на 200 ... 300 К, долговечность жаровой трубы должна увеличиться в 3 ... 4 раза, величина уровня эмиссии NO_x должна уменьшиться более, чем в 2 раза.

Поиски решения данных задач привели разработчиков к технологии организации процесса горения топливовоздушной смеси с использованием большого количества форсунок. Существуют публикации, в которых представлены результаты разработки и исследования работы КС с количеством форсунок от 100 до 600 [19, 20, 21]. Главным достоинством этой технологии является высокая управляемость процессом горения.

В настоящее время выполняются исследования по уменьшению выбросов оксидов азота в таких камерах сгорания. Эти исследования показали, что использование многоочагового горения в КС традиционной схемы позволяет снизить уровень эмиссии NO_x на 10 ... 15%. В связи с этим было предложено разделить зону горения на 2 области – дежурную и основную. Для реализации такой схемы была внедрена сложная и дорогостоящая система автоматического регулирования подачи топлива. Это обеспечило уменьшение величины выбросов оксидов азота на 30 ... 35%. Однако, как видно, этого

недостаточно для достижения описанных выше перспективных требований по нормативам. Поэтому исследования и разработки в данном направлении продолжаются. В этих разработках используется комплексный подход, который включает в себя следующие направления:

- совершенствование рабочего процесса в КС;
- определение оптимальных параметров термодинамического цикла работы ГТД в целом;

- повышение КПД отдельных узлов двигателя;
- определение оптимальной степени двухконтурности ГТД;
- совершенствование и удешевление системы топливopодачи;
- переход на альтернативные виды топлива: сжиженный природный газ, водород [22, 23].

СУЩЕСТВУЮЩИЙ ОПЫТ РАЗРАБОТКИ МАЛОЭМИССИОННОЙ КС

Наиболее эффективными подходами к снижению выбросов вредных веществ в результате сжигания топлива в КС авиационных ГТД являются концепции LPP и RQL.

LPP – Lean Lean, Premixed, Prevaporized – горение бедной предварительно перемешанной и распыленной топливовоздушной смеси

RQL – Reach-Quench-Lean – горение богатой смеси топлива и воздуха.

Оба подхода детально описаны в [24] и развиваются различными производителями авиационных двигателей в мире.

Особое внимание следует уделить конструктивным разработкам малоэмиссионных КС, которые выполняются ведущими компаниями. В частности, к ним можно отнести фирмы **Дженерал Электрик** и **Пратт-Уитни**. В 80-х годах прошлого столетия обе компании работали по программе NASA E³ – Energy Efficient Engine.

В рамках программы NASA E³ компания **Дженерал Электрик** разрабатывала малоэмиссионную камеру сгорания. В этой КС организовано 2-х зонное горение. Зоны горения расположены параллельно. Дежурная зона располагается с внешней стороны двигателя. В ней поддерживается оптимальный процесс горения топлива с низкими уровнями CO и C_xH_y. На режимах малого газа все топливо подается только в дежурную зону, которая полностью обеспечивает работу двигателя в этом случае. На режимах большой тяги двигателя дежурная зона обеспечивает предварительное смешение и частичное сжигание топливовоздушной смеси для подогрева основной зоны горения. В основной зоне горения используется сжигание бедной ($\alpha = 1.8$) топливовоздушной смеси при высоких температурах. Однако, благодаря организации 2-х зонного параллельного сжигания, продольные размеры КС невелики. За счет этого время пребывания смеси в области высоких температур мало. Это приводит к существенному уменьшению образования NO_x на режимах СПВЦ и крейсерского полета.

В процессе работы на этой КС компания **Дженерал Электрик** разработала:

- новую систему охлаждения стенок жаровой трубы. Система состоит из отдельных сегментов. Это позволило уменьшить расход воздуха на охлаждение и, за счет этого, обеднить топливовоздушную смесь в горелках основной зоны;
- безотрывный диффузор, снабженный рассекателем и поддерживающими стойками. Диффузор имеет малую величину гидравлических потерь. Его эффективность не зависит от входных неоднородностей воздушного потока. Конструкция с рассекателем и стойками обеспечивает необходимое распределение воздуха по элементам КС.
- горелки дежурной и основной зон горения. Они снабжены центробежными форсунками, в которых установлены соосные завихрители с противоположным направлением вращения.

Результаты испытаний описанной КС представлены в таблице 2. Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что уровень выбросов вредных веществ в данной КС снижается на 27 % по NO_x, на 42 % по CO и на 93 % по C_xH_y, по сравнению с КС традиционной схемы.

Табл. 2 Результаты испытаний малоэмиссионной КС фирмы **Дженерал Электрик** (NASA E³)

Тип камеры сгорания	Эмиссия в единицах EPA, принятая в США в 80-х г.		
	NO _x	CO	C _x H _y
Серийная (штатная)	7.7	10.8	4.3
Двухъярусная (малоэмиссионная)	5.6	6.3	0.3

После завершения работ по программе E³ компания **Дженерал Электрик** выполняла исследования по программе NASA ALECP. Основной целью этой программы была дальнейшая разработка перспективных схем малоэмиссионных КС со

сжиганием бедной смеси предварительно испаренного и перемешанного с воздухом топлива (концепция LPP).

В этой программе исследовались две разные конструкции КС. Конструкции отличались друг от друга **параллельным** и **последовательным** расположением зон горения.

Стендовые испытания этих двух вариантов камеры сгорания показали, что последовательное расположение зон горения позволяет существенно улучшить экологические характеристики камеры. Например, на режиме крейсерского полета индекс эмиссии NO_x составил рекордно низкий уровень: 3.1 г/кг топлива. Для КС с параллельным расположением зон горения он составлял 5.2 г/кг топлива.

Как видно, оба варианта КС обеспечивают выполнение требований ИСАО (5...10 г/кг топлива). Их экологические показатели существенно лучше индекса эмиссии традиционной КС (16 г/кг топлива). Более высокое значение имеет также полнота сгорания топлива.

По результатам проведенных исследований компанией была разработана двухъярусная многофорсуночная камера сгорания, которая

установлена на модификации двигателей CFM-56 и GE-90.

Следует отметить, что данная КС обладает очень сложной конструкцией. Ее техническое обслуживание требует больших затрат. Это вынудило компанию Дженерал Электрик в дальнейшем отказаться от ее применения и вернуться к КС традиционной схемы.

В отличие от Дженерал Электрик, компания **Пратт-Уитни** в процессе выполнения работ по программе NASA E³ выбрала схему камеры сгорания с последовательным расположением зон горения при 2-х стадийном сжигании. Компанией также выполнен большой цикл фундаментальных исследований процесса горения, проведены стендовые и натурные испытания КС. В результате испытаний получены оптимистичные данные по существенному снижению выбросов загрязнений.

В **Российской Федерации** также проводятся исследования и конструкторские разработки по совершенствованию авиационных и наземных ГТД.

Научно-техническое руководство в этом направлении осуществляет ЦИАМ. Разработки ведутся в различных образовательных и научно-технических центрах Российской Федерации.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ РФ В ОБЛАСТИ МАЛОЭМИССИОННОГО ГОРЕНИЯ

В.Р. Кузнецов и В.А. Сабельников (ЦИАМ) разработали теорию турбулентного горения [25]. В его основу положено физически обоснованное предположение о тонкой зоне горения в области смешения, где концентрации компонентов и температура горения близки к стехиометрическим значениям. Считается, что в КС с уровнем турбулентности 50...100% смешение топлива с воздухом и горение практически полностью определяются турбулентностью. Выдвинутая В.Р.Кузнецовым идея позволила математически строго разделить уравнения газовой динамики течения и уравнения кинетики горения. Подход авторов предполагает на первом этапе решение уравнений кинетики. На следующем этапе решается задача течения потока смеси газов с учетом результатов расчета горения.

Авторами выполнен большой объем теоретических и расчетных исследований основных закономерностей сжигания топлива в КС двигателей различного назначения. Обработка результатов этих исследований позволила внедрить в практику проектирования следующие методики:

- расчет неравномерности полей температур для теплонапряженных КС;
- определение эффективности сгорания топлива
- определение характеристик стабилизации пламени с помощью коэффициента форсирования,

учитывающего кинетику горения и время пребывания в первичной зоне;

- методику расчетной оценки теплового состояния стенок жаровой трубы;
- методику расчета нестационарного трехмерного турбулентного течения реагирующей смеси. Данная методика реализована в программном обеспечении AEROSHAM, которое также позволяет оценить влияние режимных и геометрических параметров на устойчивость процесса горения.

Также выполнено обобщение по исследованиям вибрационного горения и термоакустической устойчивости горения.

Эти и другие работы ЦИАМ по вопросам горения составили теоретическую основу методологии создания и отработки рабочего процесса и параметров КС авиационных двигателей.

Исследования моделей двухзонных КС с двухстадийным подводом топлива и последовательным расположением зон горения в ЦИАМ были начаты практически одновременно с программой NASA E³.

Основная цель работ заключалась в оценке потенциальных возможностей такой КС. В первую очередь проводились исследования по снижению выбросов вредных веществ на взлетном режиме.

По результатам исследований установлено, что лучший вариант такой КС на режиме малого газа при

$P_k = 0.27 \dots 0.35$ МПа, $T_k = 440$ К, $\alpha = 5.5 \dots 6.2$ обеспечивает высокую полноту сгорания и низкие уровни выбросов: $EI_{CO} = 20 \dots 27$ г/кг топлива и $EI_{C_xH_y} = 0.5$ г/кг топлива. Это в 2 ... 3 раза меньше величин, характерных для традиционных КС ГТД. При оптимальном распределении топлива по зонам горения на взлетном режиме при $P_k = 1.7$ МПа, $T_k = 730$ К, $\alpha = 3.5$ индекс выброса оксида азота EI_{NO_x} составил 10 г/кг топлива.

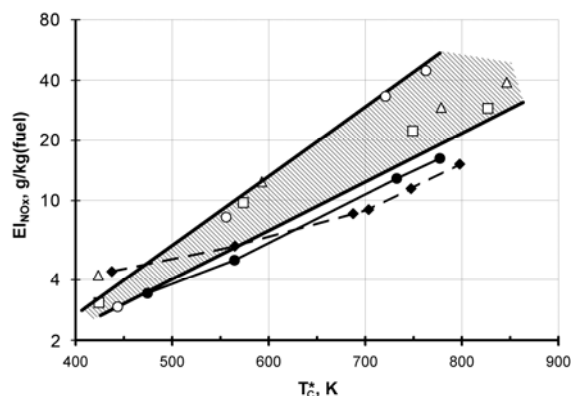
Сравнение экологических характеристик камеры сгорания ЦИАМ с лучшими образцами Дженерал Электрик и Пратт-Уитни приведено на рис. 2. Видно, что при температурах газа за компрессором $T_c^* > 650$ К такая КС не уступает двухзонной КС двигателя JT9D-7 по величине индекса эмиссий оксида азота.

В результате выполненных исследований выявлены следующие принципиальные особенности рабочего процесса применительно к малоэмиссионной КС:

- закрученные воздушные струи, вводимые в основную зону, обеспечивают интенсивное перемешивание топлива с воздухом и продуктами сгорания, вытекающими из дежурной зоны. Это обеспечивает устойчивое воспламенение и стабилизацию пламени в широком диапазоне изменения режимов работы двигателя;
- распределение воздуха по зонам горения существенно зависит от теплового сопротивления дежурной зоны. При изменении α в дежурной зоне

с 2 до 6 относительный расход воздуха в дежурную зону может увеличиваться на 30 %;

- основной вклад в суммарный выброс NO_x вносит дежурная зона. Индекс EI_{NO_x} дежурной зоны почти в 3 раза выше, чем основной. Поэтому уменьшение расхода топлива в дежурную зону приводит к снижению выброса NO_x



Δ , ∇ , \circ - CF6-50 ($\pi_k = 29.5$); CFM-56 (25.6); JT9D-7 (22); \bullet - JT9D-7A (22), \blacklozenge - камера ЦИАМ (29.5)

Рис. 2 Зависимость индекса эмиссии NO_x от температуры за компрессором ГТД

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ МНОГОФОРСУНОЧНОЙ КС ДВИГАТЕЛЕЙ ОАО «КУЗНЕЦОВ»

Проектирование и разработку конструкций КС для авиационных двигателей в Российской Федерации выполняют различные конструкторские и технологические организации. ОАО «Кузнецов» разрабатывает многофорсуночные камеры сгорания с 60-х годов прошлого столетия [11, 12]. В этих КС внедрены различные инновации, которые отличают их от аналогичных разработок других компаний.

Авиационные двигатели ОАО «Кузнецов» хорошо известны специалистам во всем мире и классифицируются префиксом НК. Многофорсуночные КС ОАО «Кузнецов» применяются в двигателях самолетов с дозвуковыми скоростями полета (НК-8, НК-8-2У, НК-86, НК-86МА) и сверхзвуковыми скоростями полета (НК-144, НК-22, НК25, НК-32). Они работают на жидком углеводородном топливе – керосин. Существуют модификации авиационных двигателей НК, использующих многофорсуночные камеры сгорания и работающие на жидком водороде (НК-88 и НК-89) [23], а также на сжиженном природном газе [11].

На рис. 3 представлена эволюция многофорсуночных КС авиационных ГТД семейства

НК, внедренных в серийное производство. Направление эволюции показано стрелкой. Все КС соответствуют стандартам ИКАО по эмиссии загрязняющих веществ. Основная конструктивная особенность таких КС - кольцевая КС с большим числом модульных горелок с воздушным распыливанием топлива.

В этих КС впервые на практике применено предварительное смешение топлива с большим количеством первичного воздуха.

Процесс смешения протекает в объеме горелочных модулей, которые обеспечивают последовательно:

- начальную стадию распыливания топлива;
- финальную стадию распыливания топлива;
- организацию зоны циркуляций за каждой горелкой для стабилизации пламени с помощью закрученных потоков воздуха и топлива [26].

Конструкция пневматических модулей - форсунок обеспечивает тонкое распыливание топлива и хорошее перемешивание топлива с воздухом, благодаря аэрации топливного факела.

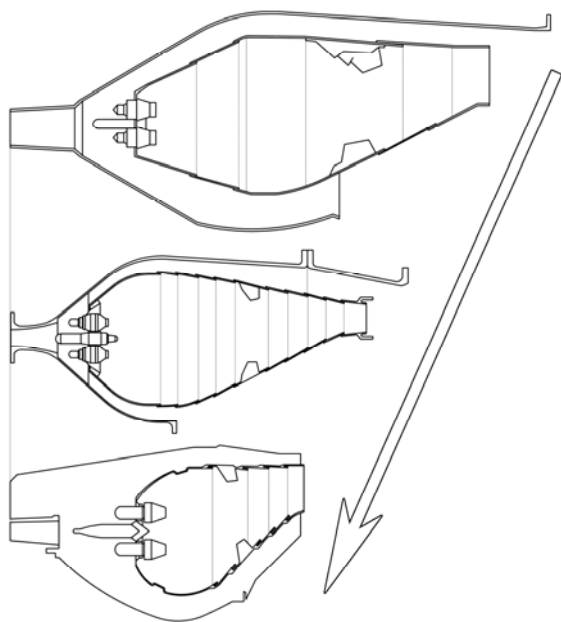


Рис. 3 Эволюция многофорсуночных КС двигателей семейства "НК"

Общий вид многофорсуночных КС представлен на рис. 4.

Обобщение многолетнего опыта эксплуатации и совершенствования многофорсуночных КС показывает их значительные преимущества перед камерами с традиционной схемой организации горения.

Принципиальные отличия многофорсуночной КС:

- короткопламенный фронт горения;
- низкие градиенты температур по стенкам жаровой трубы (ЖТ) в окружном направлении (вблизи фронтальной плиты менее 100°C);
- низкая окружная неравномерность температурного поля в выходном сечении КС ($\theta_{\text{макс}} \leq 1.25$);
- радиационный тепловой поток в КС на 40% ниже, чем в традиционных камерах с небольшим числом форсунок [10, 11];
- исключена возможность сажеобразования (число дымности менее 10);

- частичная гомогенизация топливо-воздушной смеси в горелках. За счет этого в КС образуются моли, горящие с температурой, более низкой, чем при сжигании жидких капель. Это обуславливает относительно низкую эмиссию оксидов азота и оксида углерода.
- большое число форсунок малого диаметра способствует полному выгоранию топлива и формирует требуемое температурное поле на выходе при малой длине КС.
- модульность горелок позволяет относительно просто изменять размер КС при необходимости. При этом выполняются условия подобия процессов в КС;
- конструктивно исключен локальный прогар стенок жаровой трубы благодаря более равномерному распределению топливо-воздушной смеси в объеме КС. Это обеспечивает высокую надежность и длительный ресурс использования такой КС.



Рис. 4. Общий вид многофорсуночной камеры сгорания.

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОЛОГИИ ОТРАБОТКИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Обобщение опыта создания эффективных КС [27] показывает, что для сокращения времени конструкторских работ и уменьшения затрат на испытания при доводке отдельных элементов конструкции КС широко используются пакеты прикладных программ и апробированные методики расчета параметров и характера рабочего процесса. Такой подход позволяет увеличить число

рассматриваемых вариантов конструкции с целью выбора оптимального варианта.

Разработка малоэмиссионной КС требует проведения значительного количества расчетных и экспериментальных исследований. В связи со сложностью конструкции КС и процессов, протекающих в ней, разработчики должны иметь мощные компьютерные комплексы и кластеры. Экспериментальные стенды должны обеспечивать

возможность имитации различных рабочих условий и поддерживаться современным контрольно-измерительным оборудованием.

В качестве примера может служить подобный комплекс NEWAC, использующийся в Евросоюзе. Комплекс обслуживает ведущие мировые фирмы-производители авиационных двигателей. NEWAC последовательно проводит дорогостоящую и долгосрочную политику по созданию новых схем малоэмиссионных КС для новых двигателей с участием всех двигательных фирм Европы. Аналогичные программы выполняются в США и Японии.

Все новые схемы КС ориентированы на определенный тип разрабатываемого двигателя, в основном, по степени сжатия в двигателе.

В программе NEWAC принята стандартизированная методология разработки для всех типов новых КС:

1. Проведение расчетных исследований современными методами на всех этапах работы;
2. Экспериментальные исследования в два этапа:
 - а. испытания одногорелочной модели;

- б. испытания кольцевой камеры: автономные испытания с предельно возможной имитацией параметров и испытания камеры в составе газогенератора.

Разработчики ОАО «Кузнецов» при проектировании малоэмиссионных камер сгорания авиационных ГТД имеют возможность использовать вычислительный комплекс, установленный в Самарском Государственном Аэрокосмическом Университете. Его основу составляет супер ЭВМ «СЕРГЕЙ КОРОЛЕВ» (производительность – 10 TFlops, количество процессоров – 224, количество ядер – 896) и супер ЭВМ ПСК-1ТФ (производительность – 1 TFlops, количество ядер – 144) [28]. Моделирование процесса горения осуществляется с помощью подхода конечных объемов Finite-Rate/Eddy-Dissipation. При этом выполняется моделирование уравнений переноса, описывающих конвекцию, диффузию и источники членов каждого компонента топливо-воздушной смеси. Кроме того, выполняется расчетная оценка эмиссии оксидов азота в зависимости от режимных и конструктивных особенностей КС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Разработка многофорсуночной малоэмиссионной КС является основой кардинального улучшения экологических характеристик авиационных ГТД. Это позволит эффективно решать задачи экологической

безопасности и высокой надежности двигателей в соответствии с намеченной концепцией развития авиадвигателестроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солонин В.И., Цховребов М.М., Ланшин А.И., и др. Анализ тенденций и прогнозирование развития двигателей гражданской авиации». II-я Международная научно-техническая конференция // *Авиадвигатели XXI века*. Сборник тезисов т.1. Москва. 2005. С. 60.
Solonin V.I., Tskhovrebov M.M., Lanshin A.I., i dr. Analiz tendentsy i prognozirovaniye razvitiya dvigateley grazhdanskoy aviatsii». II-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya // *Aviadvigateli XXI veka*. Sbornik tezisov t.1. Moskva. 2005. S. 60.
2. Скибин В.А., Солонин В.Н. Перспективы и проблемы развития авиационного двигателестроения // *Двигатель*. 1999. № 1. С. 1.
Skibin V.A., Solonin V.N. Perspektivy i problemy razvitiya aviatsionnogo dvigatelestroeniya // *Dvigatel*. 1999. № 1. С. 1.
3. Лукачев С.В. Развитие научного направления «горение и рабочие процессы камер сгорания ГТД» в КуАИ-СГАУ // *Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей*. Выпуск 1. Самара 1998. С. 5.
Lukachev S.V. Razvitiye nauchnogo napravleniya «gorenie i rabochie protsessy kamer sgoraniya GTD» v KuAI-SGAU // *Vestnik SGAU. Seriya: Protsessy goreniya, teploobmena i ekologiya teplovykh dvigateley*. Vypusk 1. Samara 1998. S. 5.
4. Orlov, M. Y., & Matveev, S. S. (2014). Numerical simulation application for the design and fine-tuning of small-sized gas turbine engine combustor. *Open Mechanical Engineering Journal*, 8, 450-456. Retrieved from www.scopus.com
5. Matveev, S. S., Zubrilin, I. A., Orlov, M. Y., & Matveev, S. G. (2015). Numerical investigation of the influence of flow parameters nonuniformity at the diffuser inlet on characteristics of the GTE annular combustion chamber. Paper presented at the Proceedings of the ASME Turbo Expo, , 4A doi:10.1115/GT2015-42676
6. Orlov, M. Y., & Matveev, S. S. (2014). Numerical simulation of an influence of a compressor and a turbine on characteristics of a combustion chamber of a small-sizes gas turbine engine. *Life Science*

- Journal, 11(11), 650-654. Retrieved from www.scopus.com
7. Orlov, M. Y., Matveev, S. S., Makarov, N. S., & Zubrilin, I. A. (2014). Numerical modeling problems of operating process of combustion chambers of GTE and solution approaches. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(12), 2894-2899. Retrieved from www.scopus.com
 8. Ermakov, A. I., Shklovets, A. O., Popov, G. M., & Kolmakova, D. A. (2014). Investigation of the effect of the gas turbine compressor supports on gas flow circumferential nonuniformity. *Research Journal of Applied Sciences*, 9(10), 684-690. doi:10.3923/rjasci.2014.684.690
 9. Krivcov, A., Shabliy, L., & Baturin, O. (2014). Account the mutual influence of the simulation components of GTE. Paper presented at the ASME 2014 Gas Turbine India Conference, GTINDIA 2014, doi:10.1115/GTINDIA2014-8211
 10. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л., Резник В.Е., Цыбизов Ю.И. Некоторые вопросы проектирования авиационных ГТД. Самара: Изд-во СНЦ РАН. 2002. 527 с.
Gritsenko E.A., Danilchenko V.P., Lukachev S.V., Kovylov Yu.L., Reznik V.E., Tsybizov Yu.I. Nekotorye voprosy proektirovaniya aviatsionnykh GTD. Samara: Izd-vo SNTs RAN. 2002. 527 s.
 11. Данильченко В.П., Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л., Резник В.Е., Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. Самара: Изд-во СНЦ РАН. 2008. 619 с.
Danilchenko V.P., Lukachev S.V., Kovylov Yu.L., Reznik V.E., Fedorchenko D.G., Tsybizov Yu.I. Proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley. Samara: Izd-vo SNTs RAN. 2008. 619 s.
 12. Николайкин Н.И., Смирнова Ю.В. Оценка уровня загрязнения атмосферы авиадвигателями с учетом относительной негативности компонентов выбросов // Научно-технический конгресс по двигателестроению. 9-й Международный Салон «Двигатели -2006» Москва. 2006. Сб.докладов. С.
Nikolaykin N.I., Smirnova Yu.V. Otsenka urovnya zagryazneniya atmosfery aviadvigatelyami s uchetom otositelnoy negativnosti komponentov vybrosov // Nauchno-tehnicheskyy kongress po dvigatelestroeniyu. 9-y Mezhdunarodnyy Salon «Dvigateli -2006» Moskva. 2006. Sb.dokladov. C.
 13. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (обзор) // ТВТ. 2013. Т. 51. № 3. С. 421.
Varaksin A.Yu. Gidrogazodinamika i teplofizika dvukhfaznykh potokov: problemy i dostizheniya (obzor) // TVT. 2013. T. 51. № 3. S. 421.
 14. Вараксин А.Ю. Кластеризация частиц в турбулентных и вихревых двухфазных потоках (обзор) // ТВТ. 2014. Т. 52. № 5. С. 777.
Varaksin A.Yu. Klasterizatsiya chastits v turbulentnykh i vikhrevykh dvukhfaznykh potokakh (obzor) // TVT. 2014. T. 52. № 5. pp. 777.
 15. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) // ТВТ. 2014. Т. 52. № 2. С. 310. DOI: 10.7868/S0040364413060069
Burtsev S.A., Leontyev A.I. Issledovanie vliyaniya dissipativnykh effektiv na temperaturnyuyu stratifikatsiyu v potokakh gaza (obzor) // TVT. 2014. T. 52. № 2. S. 310. DOI: 10.7868/S0040364413060069
 16. Дедеш В.Т., Тенишев Р.Х., Леут А.П., и др. Необходимость разработки методик летных исследований условий образования и существования конденсационных следов самолетов с ГТД в крейсерских полетах // Научно-технический конгресс по двигателестроению. 9-й Международный Салон «Двигатели -2006». Москва. 2006. Сб.докладов. С.
Dedesh V.T., Tenishev R.Kh., Leut A.P., i dr. Neobkhodimost razrabotki metodik letnykh issledovaniy uslovy obrazovaniya i sushchestvovaniya kondensatsionnykh sledov samoletov s GTD v kreyserskikh poletakh // Nauchno-tehnicheskyy kongress po dvigatelestroeniyu. 9-y Mezhdunarodnyy Salon «Dvigateli -2006». Moskva. 2006. Sb.dokladov. C.
 17. Волков С.А. Ужесточение Международных норм на эмиссию вредных веществ от авиационных двигателей и последствия для отечественных разработчиков и эксплуатантов авиационной техники // Научно-технический конгресс по двигателестроению. 9-й Международный Салон «Двигатели -2006». Москва. 2006. Сб.докладов. С.
Volkov S.A. Uzhestochenie Mezhdunarodnykh norm na emissiyu vrednykh veshchestv ot aviatsionnykh dvigateley i posledstviya dlya otechestvennykh razrabotchikov i ekspluatantov aviatsionnoy tekhniki // Nauchno-tehnicheskyy kongress po dvigatelestroeniyu. 9-y Mezhdunarodnyy Salon «Dvigateli -2006». Moskva. 2006. Sb.dokladov. C.
 18. Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Kayukov S.S., Uglanov D.A. Gas-dynamic analysis of processes in a small-sizes two-stroke combustion engine // *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, 8, P. 441.
 19. Кузнецов Н.Д., Токарев В.В., Иванов Ю.А. Многофорсуночная камера сгорания двигателей «НК», как прототип камер сгорания

- перспективных ГТД // Труды ЦИАМ №1229, 1987. с.
- Kuznetsov N.D., Tokarev V.V., Ivanov Yu.A. *Mnogoforsunochnaya kamera sgoraniya dvigateley «NK», kak prototip kamer sgoraniya perspektivnykh GTD // Trudy TsIAM №1229, 1987. с.*
20. Кузнецов Н.Д., Токарев В.В., Многогорелочные камеры сгорания – одно из перспективных направлений развития двигателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. №2, С. Kuznetsov N.D., Tokarev V.V., *Mnogogorelochnye kamery sgoraniya – odno iz perspektivnykh napravleniy razvitiya dvigateley // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 1995. №2, S.*
21. Biryuk V., Kayukov, S., Zvyagintsev, V., Lysenko, U. Ways of speed increase for internal combustion engine fuel injectors // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Volume 9, Issue 11, P. 721.
22. Авиация и альтернативные виды авиационного топлива. Рабочий документ А37-WP/23. Монреаль: ИКАО, 2010, 5 с.
Aviatsiya i alternativnye vidy aviatsionnogo topliva. Rabochy dokument A37-WP/23. Monreal: IKAO, 2010, 5 s.
23. Епейкин Л.Ф., Крыжановский А.И., Лавров В.Н., Спивак Ю.В., Цыбизов Ю.И. Результаты отработки многофорсуночных камер сгорания авиационных ГТД на альтернативных видах топлива // Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. 1998. Выпуск 1. Самара 1998. С. 141.
Epeykin L.F., Kryzhanovsky A.I., Lavrov V.N., Spivak Yu.V., Tsybizov Yu.I. *Rezultaty otrabotki mnogoforsunochnykh kamer sgoraniya aviatsionnykh GTD na alternativnykh vidakh topliva // Vestnik SGAU. Seriya: Protsessy goreniya, teploobmena i ekologiya teplovykh dvigateley. 1998. Vypusk 1. Samara 1998. S. 141.*
24. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions, CRC press, 2010, 537 p.*
25. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение. М.: Наука, Физматлит, 1986, 287 с.
Kuznetsov V. R., Sabelnikov V. A. *Turbulentnost i gorenie. M.: Nauka, Fizmatlit, 1986, 287 s.*
26. Матвеев С.Г., Орлов М.Ю., Цыбизов Ю.И., Зубрилин И.А. Многофорсуночная малоэмиссионная камера сгорания современных ТРДД - творческое наследие Н.Д.Кузнецова // Вестник СГАУ. 2014. №2. С. 17.
Matveev S.G., Orlov M.Yu., Tsybizov Yu.I., Zubrilin I.A. *Mnogoforsunochnaya maloemissionnaya kamera sgoraniya sovremennykh TRDD - tvorcheskoe nasledie N.D.Kuznetsova // Vestnik SGAU. 2014. №2. S. 17.*
27. Гриценко Е.А., Цыбизов Ю.И. Методология создания малоэмиссионных камер сгорания авиационных и конвертируемых двигателей семейства НК // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. Вып.2(8). Казань. Дайтона Бич. 1999. с. 16.
Gritsenko E.A., Tsybizov Yu.I. *Metodologiya sozdaniya maloemissionnykh kamer sgoraniya aviatsionnykh i konvertiruemykh dvigateley semeystva NK // Aktualnye problemy aviatsionnykh i aerokosmicheskikh sistem. Vyp.2(8). Kazan. Daytona Bich. 1999. s. 16.*
28. Saigakov E.A., Gorshkalev A.A., Kayukov S.S., Blagin E.V. Strength analysis of the internal combustion engine elements by using CAD/CAE-systems // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Volume 9, Issue 10, P. 669.