

## ДЕСЯТЬ ЛЕТ ПРЕОДОЛЕНИЯ ТРУДНОСТЕЙ В МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Токарев В.В., Полянцев Е.И.

*ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск*

Камера сгорания ГТД должна отвечать многим конструктивным, эксплуатационным требованиям, касающихся ее работоспособности, характеристик, долговечности и стоимости. Последние 15 лет к камере сгорания в системе ГТД применяются разносторонние экологические требования определенные нормированием эмиссии ряда веществ  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  и дым (углерод).

Требования противоречивы и их удовлетворение возможно при определенном уровне компромисса в характеристиках для создания оптимальной конструкции камеры сгорания.

Современные малоэмиссионные камеры сгорания, а только они необходимы в авиационных и стационарных ГТД, должны быть конструктивно дешевыми в производстве и эксплуатации. Иначе, завышенные затраты стоимости изготовления, эксплуатации и экологические затраты могут сделать их неприемлемыми для покупателя.

Наибольшее влияние на развитие конструирования камер сгорания, как авиационных так и стационарных ГТД оказало введение норм, ограничивающих в выхлопных газах концентрации вредных веществ  $HC$ ,  $CO$ , углерод (дым) и собственно окислов азота  $NO_x$  ( $NO + NO_2$ ).

Нормы на концентрацию  $NO_x$  для авиационных и стационарных ГТД непрерывно ужесточаются, что требует новых технологий организации горения и конструкций камеры сгорания. Практика развития камер сгорания показывает, что достижение требуемых уровней эмиссии  $NO_x$  становится возможным, только с помощью сложных конструкций и соответствующих им систем автоматического управления процессом горения и работы двигателя.

Рассмотрение путей достижения низких эмиссий показывает, что все создатели авиационных и промышленных ГТД идут своими отличными путями в создании малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС).

Сегодня по прошествии 10 лет с начала эксплуатации ГТД с МЭКС представляет интерес рассмотреть эти камеры сгорания их проблемы, достигнутые результаты и ограничения, накладываемые МЭКС на эксплуатацию ГТД.


	Rolls-Royce	GE	Solar
Конфигурация камеры сгорания	трубчато-кольцевая	кольцевая	кольцевая
Ступени подачи топлива	осевое размещение, две ступени	радиальное размещение, три ступени (три изолированных кольца)	одна
Геометрия/ступени систем регулирования подачи воздуха	фиксированная геометрия КС (Coberra 6000-RB211)	регулируемый ВНА, клапаны отбора в компрессоре, фиксированная геометрия КС (LM6000)	отбор из инжектора (Taurus 70S, Mars 100S); отбор от корпуса КС, регулируемые лопатки и входные заслонки завихрителя (Centaur 40S/50S, Taurus 60S)
			

Рис. 1. Концепции формирования малоэмиссионного горения

Рассмотрим технологии малоэмиссионного горения и конструкций камер сгорания четырех фирм, три из которых создали МЭКС для конвертируемых авиационных ГТД это R-R, GE и PW. Четвертая фирма – фирма Solar производитель МЭКС для своих стационарных ГТД.

Информация о МЭКС отечественных ГТД дается в ряде публикаций.

10 лет эксплуатации ГТД с МЭКС выявил ряд проблем обусловленных низкотемпературным горением ( $T_{nl}^* \leq 1900$  К). В первую очередь к ним относятся пульсационное горение, делающее работу ГТД не допустимой, сложность регулирования системы «МЭКС – Двигатель» и ряд других эксплуатационных факторов. Последнее становится весьма проблематичным при отрицательных атмосферных температурах. Есть сообщения о невозможности работать при  $t_H$  ниже  $-15$  °С в режиме «бедного» горения с  $T_{nl}^* \leq 1900$  К. Для фирмы Siemens эксплуатация ГТД V-94,2 с МЭКС в районе Санкт – Петербурга является самой северной географической точкой с низкими атмосферными температурами. Эксплуатация в таких условиях не позволяет надежно работать с  $NO_x = 25$  ppm, возникает пульсационное горение, ограничения по регулированию двигателя и как следствие рост эмиссии  $NO_x$  до 40 ppm.

Годы исследования авиационных камер сгорания (МЭКС) с использованием предварительно подготовленных топливо-воздушных смесей для уменьшения эмиссии  $NO_x$  на 70...80 % не привели к созданию эксплуатационного образца МЭКС для авиационного ГТД. Исследования показали ряд проблем тождественных проблемам МЭКС стационарных ГТД; пульсационное горение; просок пламени; самовоспламенение ТВС и т.д.

В работе как альтернативное решение проблем МЭКС с предварительным смешением исследовались МЭКС на основе технологии RQQL.

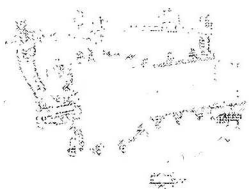


Рис. 2 А. Камера сгорания MSQ

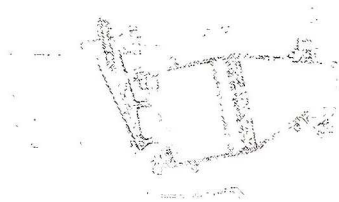


Рис. 2 Б. Камера сгорания RSQ



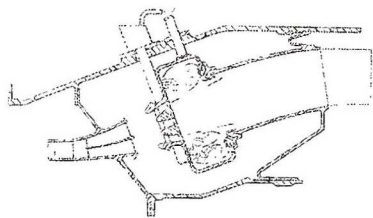


Рис. 2 В. Камера сгорания RQQL/  
TVC

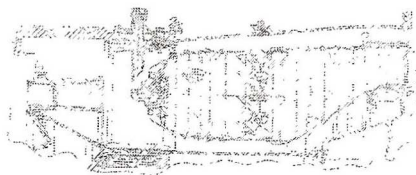


Рис. 2 Г. Камера сгорания ОАО Авиа-  
двигатель

Возможны ли альтернативные подходы в создании малоэмиссионных камер сгорания для авиационных и стационарных двигателей. Анализ публикаций дает утвердительный ответ. В ряде публикаций в качестве альтернативы технологии предварительного смешения топлива с воздухом и организации горения топлива с избытком воздуха во фронте пламени рассматривает технология ступенчатого (стадийного горения). Такой альтернативой в авиационных и стационарных ГТД рассматривается ступенчатое горение RQQL («богатое» горение – быстрое разбавление – «бедное» горение) и его разновидности. Схемы камер сгорания, реализующих технологию ступенчатого горения, показаны на рис 2. Технология горения, формируемая конструкцией PW (рис 2 Г) объединяет преимущества ступенчатой камеры сгорания «богатое» горение – быстрое разбавление – «бедное» горение (RQQL) и революционную концепцию камеры сгорания с удержанными вихрями (Tropped Vortex Combustor - TVC). Согласно публикациям технология ступенчатого горения уменьшает эмиссию  $NO_x$  на 70...80 %. В двухзонных камерах сгорания авиационных двигателей CFM56-5B, GE-90 и V2500 эмиссия окислов азота уменьшается на 30...35%.

В последнее время появились публикации, в которых технология RQQL рассматривается как решение проблемы создания стационарного ГТД, способного работать с низкими эмиссиями  $CO$  и  $NO_x$  на различных газообразных топлива, включая топлива с высокой теплотворной способностью (природный газ). В работе сообщаются результаты ( $NO_x = 40$  ppm), достигнутые с помощью технологии RQQL/TVC в условии на входе в камеру сгорания  $p_k^* = 1$  МПа,  $T_k^* = 647$  К.

Исследования и применение технологии RQQL в промышленных ГТД ведется а ОАО «Авиадвигатель». В исследованиях для интенсифи-

кации смещения продуктов неполного сгорания из «богатой» зоны с чистым воздухом в зоне QQ используется дробление масштаба применением смесительных устройств.

Достигнутые уровни эмиссии близки к опубликованным в работе.

В докладе анализируется применение технологии RQQL в стационарных и авиационных ГТД и ее преимущества по сравнению с технологией «бедного» горения.

УДК 621.45.022.2

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА И РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОПЛИВА В ТРЕХЪЯРУСНОМ ФОРСУНОЧНОМ МОДУЛЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С ГОМОГЕНИЗАЦИЕЙ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ**

Третьяков В.В.

*Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва*

В настоящее время и в нашей стране, и за рубежом, ведутся активные поисковые исследования по созданию малоэмиссионных камер сгорания. Одним из направлений этих исследований являются модули камер сгорания, в которых гомогенизация горючей смеси достигается на стадии ее предварительной подготовки. Данная работа посвящена вопросам математического моделирования и расчетам концентраций капельно-жидкого топлива в форсуночном модуле камеры сгорания, разработанном в ЦИАМ.

Рассматриваемый модуль представляет собой трехъярусный завихритель, внутренняя часть которого выполнена в виде вихревой камеры смещения, в которой смешиваются воздушные струи, поступающие в камеру через систему тангенциальных отверстий, расположенных на боковой поверхности ее цилиндрической части. В торце цилиндра на его оси располагается центробежная топливная форсунка. Наружная часть центрального завихрителя представляет собой осевой лопаточный завихритель.