

## ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Т. С. ХАРИСОВ<sup>1</sup>, Д. В. СКИБА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> kharisov\_ts@mail.ru, <sup>2</sup> d.skiba@teplophysics.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассматриваются основные проблемы создания малоэмиссионной камеры сгорания с предварительным смешением топлива и воздуха на примере газотурбинного двигателя ДГ-90. Вкратце описываются противоречия между низкими показателями оксидов азота и углерода, уровнем пульсаций давления, показателями статической устойчивости и ресурса камеры сгорания.

**Ключевые слова:** малоэмиссионная камера сгорания; предварительное смешение топлива; виброгорение; оксиды углерода; оксиды азота.

На сегодняшний день создание малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС) ГТУ является актуальной проблемой в соответствии с планом импортозамещения, утвержденным Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.09.2014 г. № 19361, Приказами Минпромторга России от 31.03.2015 г. №653, № 645, а также с учетом требований Федерального закона от 21.07.2014 г. №219-ФЗ, по которому предприятия должны внедрять экологически рентабельные технологии, минимизирующие выбросы загрязняющих веществ. Однако, зачастую отсутствуют четкие описания последовательности создания МЭКС (разработка ее конструкции и систем управления процессом горения для двигателя) и возможных трудностей при этом. Поэтому в данной статье вкратце рассматриваются потенциальные проблемы создания МЭКС и ее доводки до требуемых технических и эмиссионных характеристик. В соответствии с экологическими нормами ГОСТ-28775, для ГТУ газоперекачивающих агрегатов установлены следующие требования по эмиссии  $NO_x$  и  $CO$ :

– содержание оксидов азота не должно превышать  $150 \text{ мг/м}^3$ ;

– содержание оксида углерода не должно превышать  $300 \text{ мг/м}^3$ .

В ПАО «Газпром» оборотный фонд двигателей производства ГП НПКТ «Зоря» – «Машпроект» составляет 963 единицы,

в т.ч. 309 двигателей серии ДГ-90 (ДГ-90Л2, ДГ-90Л2.1, ДГ-90П, ДГ-90П2), в которых установлены 11 вариантов конструкций камер сгорания – результат поэтапного изменения разработчиком конструкции элементов камеры сгорания, направленных на устранение таких неисправностей, как:

– ненадежный розжиг;

– прогар горелочных устройств и жаровых труб;

– высокие уровни выбросов  $NO_x$  и  $CO$ .

Наиболее успешная по экологическим показателям – двухзонная камера сгорания, установленная на двигателях серии ДГ-90Л2.1 не удовлетворяет требованиям по выбросам  $NO_x$  не более  $50 \text{ мг/м}^3$ . В процессе эксплуатации выявлены случаи прогара элементов горелок и возникновения пульсаций давления на переходных режимах, на режимах пониженной нагрузки высокие уровни выбросов  $CO$ .

Поэтому разработка малоэмиссионных камер сгорания является актуальной проблемой в том числе и для двигателей серии ДГ-90.

В мировой практике применительно к ГТД, работающим на природном газе, абсолютный приоритет отдан «сухим» методам сжигания топлива. В зарубежной терминологии эта концепция снижения выбросов  $NO_x$  и  $CO$  обозначена как *DLE (Dry Low Emission)* и принята как наилучшая доступная технология организации рабочего цикла

в камере сгорания на основе предварительного смешения топлива с воздухом (ПСТ).

Практическая реализация концепции *DLE* заключается в обеспечении, на первый взгляд, «простых» условий:

- высокая однородность по составу «бедной» топливовоздушной смеси;
- статическая и динамическая устойчивость горения на всех режимах работы двигателя;
- исключение взаимодействия зоны горения с охлаждающими элементами камеры сгорания воздухом.

Ведущие иностранные фирмы – разработчики приводных ГТД, при создании малоэмиссионных камер сгорания применяют сложные, дорогие и требующие постоянного обслуживания системы контроля и комплексы регулирования. Все эти мероприятия направлены на обеспечение устойчивости горения смеси «бедного» топливом состава. Трудности в организации малоэмиссионного сжигания заранее смешанных газов заключаются в узком диапазоне состава смеси, при котором обеспечиваются низкие уровни выбросов  $NO_x$  и  $CO$ , пульсации давления. Использование зарубежными разработчиками сложных систем (в том числе использование подвижных элементов) направлено на обеспечение этих условий. Все это существенно повышает стоимость разработки, производства камер сгорания и затраты на их обслуживание.

Последовательность работ по созданию новой камеры сгорания, принятая, к примеру, в ООО «НПФ «Теплофизика», предусматривает, в первую очередь, полную отработку принятых технических решений по формированию облика конструкции в модельных условиях (как в масштабных, так и в полномасштабных вариантах) с целью сокращения длительности и уменьшения объема трудоемких опытно-промышленных испытаний по доводке конструкций и систем управления горением. Работа по проекту начинается с экспериментального исследования параметров рабочего цикла штатной камеры сгорания. Необходимость подобного исследования обусловлена зачастую неполнотой доступных разработчику сведений о

режимных параметрах и условиях эксплуатации, имеющихся в открытых источниках.

На основе математических и расчетно-эмпирических моделей, учитывающих химическую кинетику горения метана и образования  $NO_x$ , турбулентное смешение газовых струй, нестационарность процессов теплопереноса, разрабатываются принципы и схемы организации подачи топлива в зоны смешения, розжига стабилизации фронта пламени, импактное охлаждение стенок жаровой трубы, подавление пульсаций давления, управление процессом горения.

С учетом высоких уровней выбросов  $CO$  на режимах пониженной нагрузки, круг задач, требующих решения, расширяется. Окисление  $CO$  до  $CO_2$  зависит от температуры и времени пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур. Эти параметры определяют также температуру металла конструктивных элементов камеры сгорания.

Все это обуславливает и определяет уровень сложности решения первой проблемы: обеспечить требуемые уровни эмиссии  $CO$  и ресурсные показатели конструкции за счет поиска компромиссных мероприятий, направленных, с одной стороны, на снижение эмиссии  $CO$ , и, с другой, на сохранение температуры стенки жаровой трубы, обеспечивающей требуемые ресурсные показатели. Острота проблемы обеспечения допустимых уровней эмиссии  $CO$  в случае применения технологии *DLE* (ПСТ) обусловлена следующими распространенными причинами:

- широкий диапазон изменения средне-массовой температуры пламени  $T_g$  в первичной зоне в зависимости от мощности  $N$  и температуры атмосферного воздуха, как например, в разрабатываемой ООО «НПФ «Теплофизика» МЭКС для двигателя серии ДГ-90 ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект» (рис. 1);

- высокая теплонапряженность камеры сгорания.

Применительно к штатным малоэмиссионным сгорания двигателя ДГ-90 эта проблема усугубляется вследствие использования пленочного охлаждения жаровой трубы,

приводящего к «замораживанию» химических реакций окисления топлива в пристенной области. Вероятно, разработчик (ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект») сознательно пожертвовал экологическими показателями для обеспечения требуемого ресурса жаровой трубы.

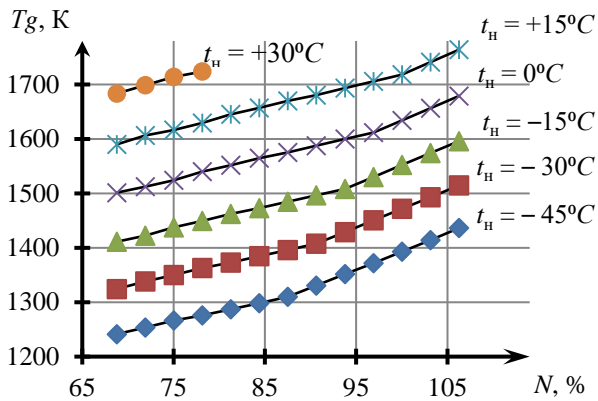


Рис. 1. Зависимость среднемаховой температуры пламени в первичной зоне горения камеры сгорания от мощности ГТД и температуры окружающей среды

Уровень  $T_g$  наряду с давлением в камере сгорания определяет скорость химических реакций, а, следовательно, и выбросы  $NO_x$  и  $CO$ . Максимально допустимое значение  $T_g$  ограничивается заданным уровнем выбросов  $NO_x$  и при реально достижимом уровне качества предварительного смешения не превышает  $T_{g\max} = 1800$  К.

Вторая проблема, возникающая при проектировании камеры сгорания ПСТ, заключается в склонности к возникновению пульсаций давления в зоне горения заранее смешанных газов (виброгорение). Решение этой проблемы, как показывает мировой опыт и опыт ООО «НПФ «Теплофизика», заключается в создании условий, повышающих поглощение акустической энергии на частотах, возбуждающих автоколебания.

Третья проблема создания камеры сгорания ПСТ ( $DLE$ ) заключается в организации эффективного охлаждения стенок жаровой трубы. Оптимизация расхода воздуха на охлаждение, способ подачи и организация течения в зоне интенсивного теплообмена, конфигурация канала подачи охлаждающего воздуха – все это требует не только массива вычислительных циклов, развития моделей расчета, но и детальных стендовых испытаний как различных конструктивных схем организации охлаждения

стенок жаровой трубы, так и изучения влияния на температуру металла параметров и характеристик термозащитного покрытия.

Четвертая проблема заключается в обеспечении низких уровней эмиссии  $NO_x$  и  $CO$  на режимах пониженной нагрузки. Эта проблема решается за счет регулирования расхода воздуха через зону горения, что снижает эффективность работы двигателя на пониженных режимах, или за счет многоканальной подачи топлива со сложной системой регулирования расхода и сложной схемой распределения топлива в зоне предварительной подготовки рабочей смеси.

При разработке МЭКС для находящегося в эксплуатации ГТД возникают дополнительные задачи, например, необходимость размещения новой конструкции в пределах штатного корпуса, поиск компромисса между штатным алгоритмом работы САУ и алгоритмом управления процессом горения и т.п.

Кроме того, применение системы зажигания с запальными устройствами в каждой индивидуальной МЭКС предъявляет повышенные требования к надежности системы зажигания, разработка которой также может потребоваться при невозможности использования серийных свечей зажигания поверхностного разряда вследствие конструктивных ограничений и/или условий эксплуатации.

Для решения указанных проблем сформировался следующий порядок разработки МЭКС:

- 1) получить параметры рабочего цикла штатной камеры сгорания;
- 2) разработать математическую модель газотурбинного двигателя;
- 3) смоделировать процесс окисления монооксида углерода  $CO$  для создания полупырической модели его окисления и связи данной модели с реальным процессом горения в камере сгорания;
- 4) выполнить расчет камеры сгорания, определить температуры пламени на различных режимах работы и температуры ее стенок;
- 5) выбрать концепцию камеры сгорания (концепция МЭКС для двигателя ДГ-90 включает следующие элементы: однокоре-

лочная компоновка фронтального устройства; многоканальная подача топливного газа; применение внешнего ударно-конвективного охлаждения жаровой трубы; отсутствие пламяперехватных патрубков, установка запальных устройств в каждой индивидуальной камере сгорания; управление работой камеры сгорания по расчетному значению  $T_g$ );

б) разработать конструкции основных составляющих МЭКС с учетом размещения ее новой конструкции в пределах штатного корпуса;

7) провести после компьютерного моделирования испытания в стендовых условиях с замером характеристик рабочего тела разработанной конструкции МЭКС и выявить элементы, конструкции которых являются причинами каких-либо неудовлетворительных показателей;

8) разработать методику пересчета результатов измерения эмиссионных характеристик и амплитуды пульсаций давления в стендовых условиях на натурные параметры двигателя;

9) доработать данные элементы с учетом п.б. и п.8 до удовлетворения всем необходимым требованиям.

Таким образом, несмотря на простоту и ясность основных принципов решения обозначенных проблем, разработка малоэмиссионной камеры сгорания – длительный процесс. Следует отметить, что задача создания индивидуальной малоэмиссионной камеры сгорания на основе концепции ПСТ (*DLE*) является задачей многофакторной оптимизации и требует разрешения противоречий между заданными экологическими показателями, уровнем пульсаций давления, показателями статической устойчивости и ресурса.

Также в заключении отметим, что для двигателя ДГ-90 в ООО «НПФ «Теплофизика» решение описанных проблем обусловлено применением системы импактного охлаждения защитного экрана жаровой трубы, оптимизацией конструкции горелочного устройства, способа подачи топлива по двум контурам в камере сгорания, разработкой принципиально нового устройства подавления пульсаций давления и разработкой новой системы зажигания на базе свечи

накаливания. Более подробное описание решений без применения многоконтурных систем подачи топлива и каких-либо дорогостоящих и ненадежных подвижных частей будет рассмотрено в следующих работах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ишков А. Г.** Совершенствование экологических показателей приводных ГТУ ПАО «Газпром» / А. Г. Ишков, В. Г. Никитин, Р. С. Кашапов, А. О. Прокопец, А. Н. Пошелюзный // Газовая промышленность, 2017. спецвыпуск № 1/750. [A.G. Ishkov Improving the environmental performance of driven GTE at PJSC «Gazprom» / A. G. Ishkov, V. G. Nikitin, R. S. Kashapov, A. O. Prokopets, Pouchelyuzny A. N. // Gasovaya Promyshlennost, 2017. special issue № 1/750.]

#### ОБ АВТОРАХ

**ХАРИСОВ Тимур Салаватович**, аспирант 2-го курса УГАТУ, инженер 1 категории ООО «НПФ «Теплофизика».

**СКИБА Дмитрий Владимирович**, канд. техн. наук, зам. научного руководителя ООО «НПФ «Теплофизика».

#### METADATA

**Title:** Problems of creating a low emission combustion chamber

**Authors:** T. S. Kharisov <sup>1</sup>, D. V. Skiba <sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>kharisov\_ts@mail.ru, <sup>2</sup>d.skiba@teplophysics.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (21), pp. 134-137, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The main problems of creating a low-emission combustion chamber with fuel and air premixing are considered on the example of the DG-90 gas turbine engine. Briefly described contradiction between low levels of nitrogen and carbon oxides, level of pressure pulsation, parameters of the static stability and resource of the combustion chamber.

**Key words:** low emission combustion chamber; fuel pre-mix; vibroinflation; carbon oxides; nitrogen oxides.

**About authors:**

**Kharisov, Timur Salavatovich.**, postgraduate 2<sup>nd</sup> year student, Ufa state aviation technical University; Engineer of 1 category in LLC “Scientific-Production Company “Teplophısica”

**SKIBA, Dmitry Vladimirovich.**, candidate of technical Sciences, Deputy Director for Science in LLC “Scientific-Production Company “Teplophısica”