

**Конкурс «Премия «Авиастроитель года» за 2020 год
Номинация «Лучший инновационный проект»**

**Краткое описание работы
«Разработка промышленного двигателя ПС-90ГП-2 с малоэмиссионной
камерой сгорания для ГПА и ГТЭС»**

Актуальность работы

Авиапроизводные промышленные газотурбинные двигатели и, в первую очередь, ГТУ мощностью 16 МВт, востребованы на российском рынке в качестве привода ГПА и ГТЭС, благодаря надежности и экономичности, достигаемой за счет высоких параметров термодинамического цикла. На данный момент продукция АО «ОДК» представлена авиапроизводными ГТД, в которых реализована технология богато-бедного сжигания топливовоздушной смеси. Несмотря на высокую надежность данной технологии, ее главным недостатком является невозможность обеспечить требования по эмиссии оксидов азота (NOx) на общемировом уровне (не более 50 мг/нм³) в ГТД с высокими параметрами термодинамического цикла. Учитывая существенный рост внимания к проблемам экологии, а также крупных действующих и потенциальных заказчиков продукции АО «ОДК» к обеспечению соответствия эмиссионных характеристик ГТД мировому уровню, а также требованиям ГОСТ 29328-92 и 28775-90, создание малоэмиссионных камер сгорания для промышленных ГТД становится крайне актуальной задачей.

Несмотря на большое количество существующих технологий снижения эмиссии оксидов азота (впрыск воды или пара, каталитическое подавление эмиссии), наибольшими преимуществами перед остальными обладает технология «сухого» сжигания обедненной топливовоздушной смеси (ТВС), т.к. она не требует применения каких-либо постоянно расходуемых материалов (вода, катализатор) для обеспечения эмиссионных характеристик. В России серийные КС с реализацией данной технологии в высокопараметрических ГТД отсутствуют.

«Сухая» малоэмиссионная камера сгорания по сравнению с «богато-бедной» КС требует применения большего количества агрегатов топливной автоматики и датчиков контроля состояния камеры сгорания, новой, более сложной, логики подачи и распределения топлива по коллекторам для обеспечения

малоэмиссионной работы, контроля температуры газа в первичной зоне КС в заданном диапазоне для обеспечения стабильной работы КС и двигателя с поддержанием низкого уровня эмиссии вредных веществ.

Все указанные факторы приводят не только к разработке новой малоэмиссионной КС, но и внесению существенных изменений в конструкцию всего двигателя. Таким образом, реализация технологии «сухого» сжигания обедненной ТВС требует выполнения цикла НИОКР по разработке новой модификации промышленного ГТД.

Учитывая необходимость обеспечивать требования по эмиссии вредных веществ, а также высокую востребованность ГТУ мощностью 16 МВт со стороны ключевых заказчиков, задача разработки промышленного ГТД ПС-90ГП-2 с малоэмиссионной камерой сгорания является ключевой для развития направления авиапроизводных ГТД, а ее успешное решение позволяет не только сохранить конкурентоспособность продукции АО «ОДК», но и создает потенциал расширения рынков сбыта на зарубежные государства.

Цели и задачи работы:

При разработке новой модификации авиапроизводного ГТД ПС-90ГП-2М с МЭКС, использующей «сухое» сжигание обедненной предварительно перемешанной топливоздушная смеси, требуется комплексный подход к решению ряда противоречащих друг другу задач (рисунок 1), который включает в себя циклическое выполнение проектных расчетных, конструкторских и экспериментальных работ (в составе натурального отсека, газогенераторов, двигателя), направленных на достижение ключевых технических характеристик КС и двигателя:

- обеспечение заданной степени смешения топлива и воздуха (степень перемешивания, эпюра скоростей и концентраций топлива в смеси) перед подачей в объем жаровой трубы для последующего малоэмиссионного сжигания;

- обеспечение ресурсных характеристик «бедной» камеры сгорания в условиях дефицита охлаждающего воздуха;

- обеспечение малоэмиссионного режима работы в широком диапазоне режимов работы газотурбинного двигателя;

- обеспечение отсутствия пульсационного горения и проскока пламени в камере сгорания на всех режимах работы ГТД.

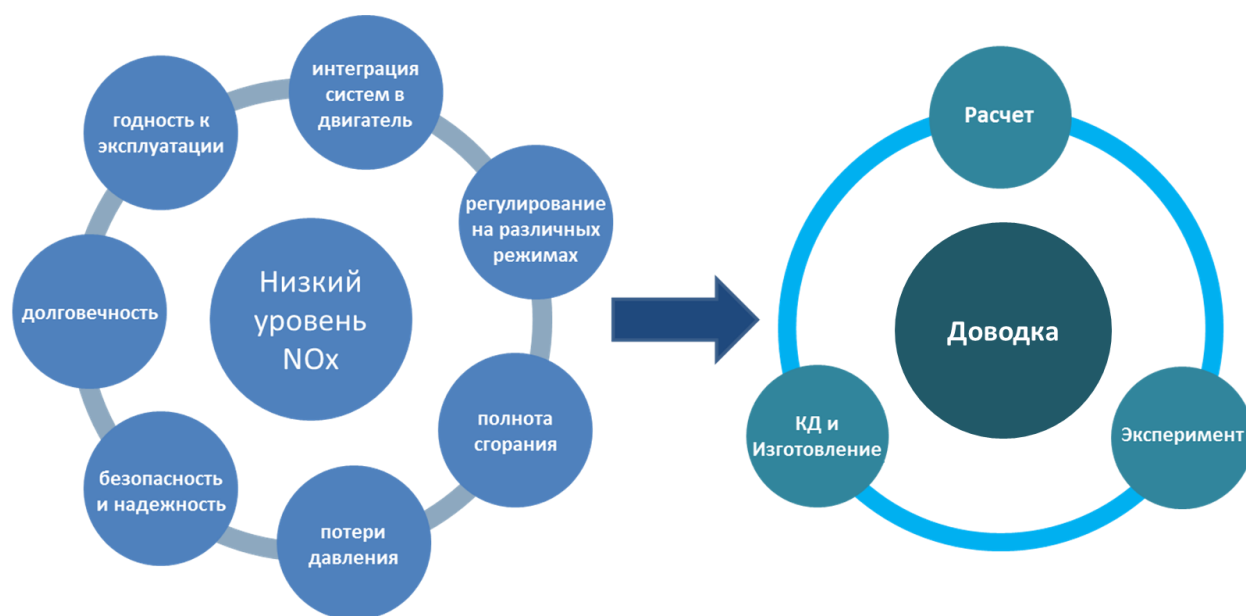


Рисунок 1 – Ограничения, возникающие при обеспечении низкого уровня эмиссии ГТД и циклы доводочных работ

Решение данных задач при создании МЭКС заключается в разработке горелочного модуля фронтального устройства, обеспечивающего подготовку предварительно перемешанной обедненной топливовоздушной смеси, использовании многоколлекторной схемы подвода топлива в камеру сгорания, оптимизации теплового состояния деталей камеры сгорания, регулирования расхода/температуры воздуха, подаваемого в первичную зону КС.

Результат работы

В результате выполнения работ по указанным направлениям была разработана конструкция одномодульной «сухой» малоэмиссионной камеры сгорания (рисунок 2) и модификации двигателя ПС-90ГП-2 – ПС-90ГП-2М для промышленной газотурбинной установки мощностью 16 МВт – ГТУ-16ПМ.

Камера сгорания содержит жаровую трубу, фронтальное устройство с горелочным модулем. Горелочный модуль имеет кольцевой смесительный канал с плавным профилем, на выходе из которого располагается стабилизатор пламени. Вниз по потоку от входа в смесительный канал располагаются направляющие лопатки, которые сообщают необходимую закрутку в радиальном направлении потоку топливовоздушной смеси, поступающей через вход в смесительный канал. Угол установки лопаток с одной стороны достаточен для формирования устойчивой

зоны обратных токов на выходе из горелочного модуля, и, соответственно, необходимой для стабилизации пламени закрутки, с другой стороны дает возможность обеспечить безотрывное течение воздуха и топливоздушной смеси между образующими лопатки и в смесительном канале. Каждая лопатка имеет топливные каналы, которые подают топливо через топливные отверстия в воздушный поток и позволяют получить необходимый профиль концентрации топлива в топливоздушной смеси.

Смесительный канал находится ниже по потоку после лопаток радиального завихрителя и преобразует направление движения топливоздушной жидкости с радиального на осевое при сохранении закрутки потока. Смесительный канал имеет аэродинамически «гладкий» профиль для обеспечения безотрывного течения топливоздушной смеси на всем протяжении. Безотрывное течение смеси позволяет уйти от проблемы стабилизации пламени в канале.

Камера сгорания имеет два топливных коллектора для обеспечения возможности регулирования работы КС в зависимости от режима работы ГТД.

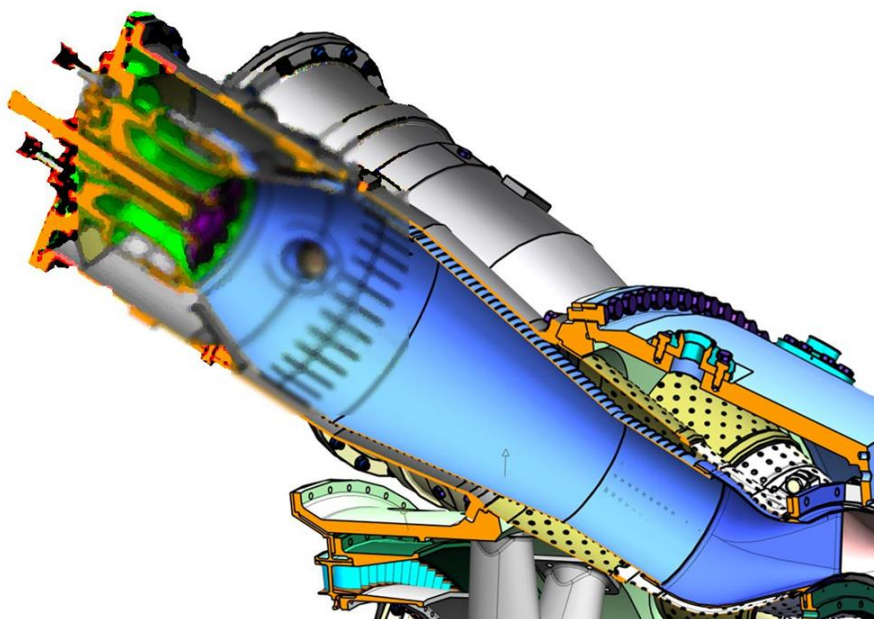


Рисунок 2 - Общий вид МЭКС с одномодульным фронтальным устройством для ГТД ПС-90ГП-2

Процесс разработки выполнялся с широким применением трехмерного численного моделирования, которое позволило выполнить «тонкую» доводку ДСЕ камеры сгорания для обеспечения требуемого теплового состояния «горячей» части, выбрать оптимальную эпюру концентрации топлива в смесительном канале камеры сгорания, обеспечить беспульсационное горение на малоэмиссионных

режимах работы КС, выбрать оптимальные конструктивные параметры системы пламепереброса (рисунок 3) и, таким образом, существенно улучшить пусковые характеристики камеры сгорания.

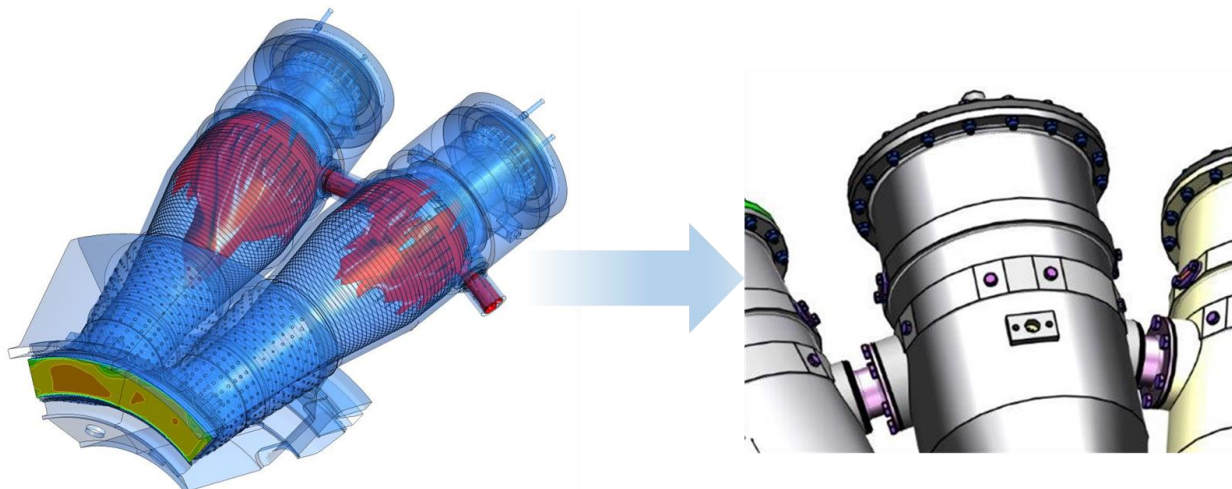


Рисунок 3 – Результат численного моделирования и оптимизации системы пламепереброса между выносными ЖТ малоэмиссионной КС

Реализация технологии «сухого» сжигания обедненной топливовоздушной смеси в камере сгорания также потребовала внесения изменений в конструкцию двигателя и разработки множества новых систем, помимо создания КС:

- разработка новой САУ двигателя (система топливопитания, логика работы системы топливопитания, управление перепусками воздуха);
- разработка системы перепуска воздуха на вход в двигатель для регулирования температуры газа в зоне горения;
- разработка системы контроля пульсаций в КС;
- разработка новой системы трубопроводных коммуникаций;

Достижение слаженной работы всех указанных систем потребовало значительного количества не только численных, но и натурных экспериментов, как в составе отсеков для испытаний КС, стендов по моделированию САУ, так и в составе газогенератора двигателя ПС-90ГП-2 с МЭКС (рисунок 4). Общий объем выполненных работ представлен на рисунке 5.

Реализация проекта по созданию двигателя ПС-90ГП-2 с МЭКС дала толчок к развитию и широкому применению новых технологий изготовления деталей двигателя (в том числе аддитивным способом), развитию подходов к численному моделированию процессов в узлах двигателя, разработке новых методик испытаний узлов ГТД.

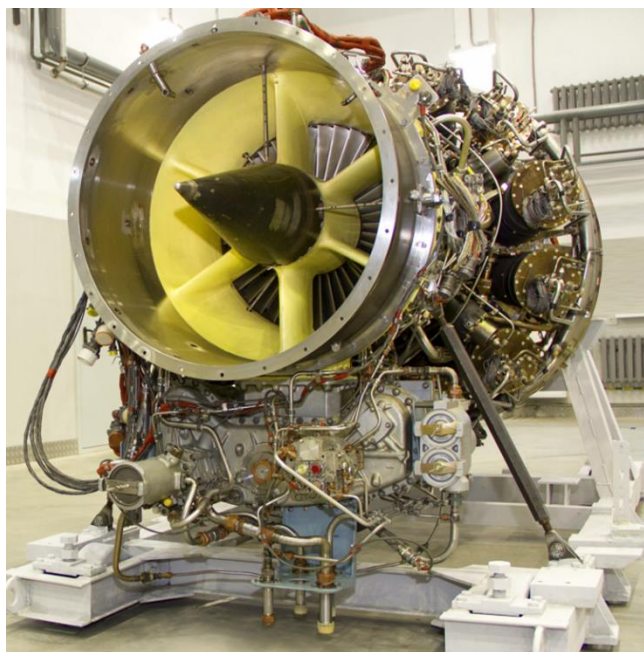


Рисунок 4 – Газогенератор двигателя ПС-90ГП-2 с МЭКС

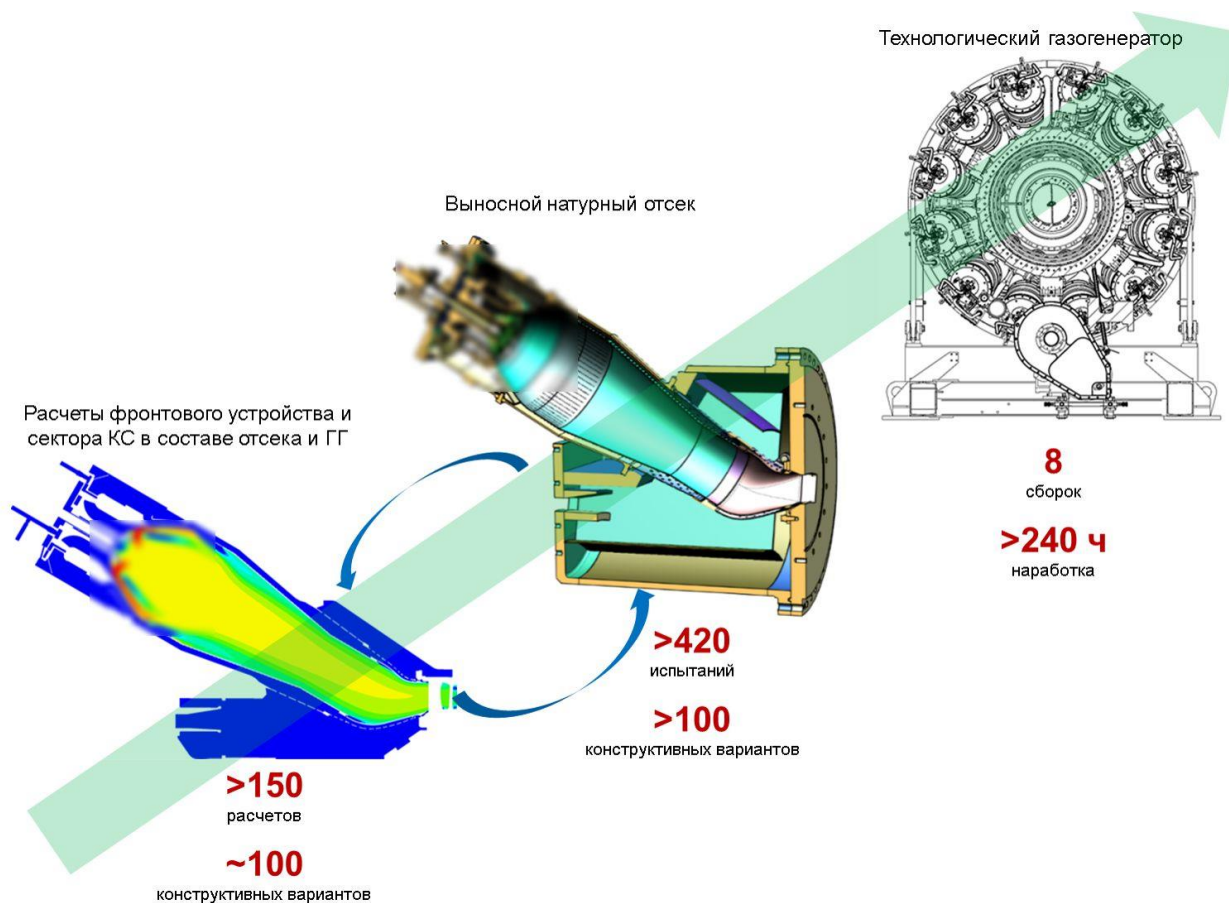


Рисунок 5 – Общий объем расчетных и доводочных работ

По результатам выполненного цикла НИОКР подтверждены все характеристики камеры сгорания и двигателя, выпущена РКД на двигатель ПС-90ГП-2М с малоэмиссионной камерой сгорания, а также на ГТУ мощностью 16 МВт

с МЭКС. На данный момент, согласно утвержденной программе и методике испытаний, выполняется опытная эксплуатация с выходом на приемочные испытания в ноябре 2021 г.

Таким образом:

- впервые разработана модификация авиапроизводного промышленного двигателя для ГТУ мощностью 16 МВт с выносной трубчатой одномодульной малоэмиссионной камерой, обеспечивающая эмиссию оксидов азота $<50 \text{ мг/м}^3$, что позволяет обеспечить полное соответствие требованиям ГОСТ 29328-92 «Установки газотурбинные для привода турбогенераторов» и общемировому уровню нормирования эмиссии оксидов азота, а также обеспечивающая снижение валового среднегодового выброса NO_x на 72%;

- выполнено расчетное обоснование оптимальных эпюр скорости потока и концентрации топлива в смесительном канале горелочного модуля, обеспечивающих отсутствие виброгорения и проскока пламени на различных режимах работы двигателя;

- выполнено экспериментальное подтверждение эффективности мероприятий, заложенных в разработанную конструкцию авиапроизводного промышленного ГТД с одномодульной малоэмиссионной камерой сгорания, позволяющими обеспечить требуемый уровень эмиссии вредных веществ, отсутствие виброгорения, проскока пламени в КС;

- достигнут синергетический эффект от реализации проекта, который привел к развитию новых технологий изготовления, включая развитие аддитивного производства деталей сложной формы из жаропрочных сплавов, развитие методик численного моделирования процессов в камере сгорания, развитие методик постановки, подготовки и проведения экспериментов, как в составе автономных стендов, так и в составе технологических газогенераторов и двигателя;

- авиапроизводный промышленный двигатель ПС-90ГП-2 с МЭКС установлен на КС «Чайковская» (ПАО «Газпром») в составе ГПА, где проходит этап опытной эксплуатации. Текущая наработка составляет более 770 часов.