

ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ  
АО «ОДК-Авиадвигатель»

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор –  
генеральный конструктор  
АО «ОДК-Авиадвигатель»

А.А. Иноземцев

2023 г.



Конкурсная работа

в номинации «Лучший инновационный проект»  
в конкурсе «Авиаконструктор года» по итогам 2022 года  
«Разработка промышленной ГТУ-25ПМ с малоэмиссионной камерой  
сгорания для ГПА и ГТЭС»

Пермь 2023

## **Оглавление:**

1. Термины, определения .....	3
2. Введение.....	4
3. Цель работы.....	5
4. Актуальность работы.....	5
5. Краткое описание работы.....	6
6. Результаты и практическая значимость выполненных работ. ....	12
7. Заключение. ....	13

## 1. Термины, определения.

КС – камера сгорания

МЭКС – малоэмиссионная камера сгорания

ГТД – газотурбинный двигатель

ГПА – газоперекачивающий агрегат

ГТЭС – газотурбинная электростанция

NOx – окислы азота

CO –monoоксид углерода

TBC – топливовоздушная смесь

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

## 2. Введение.

В странах, эксплуатирующих промышленные ГТД регламентирован уровень эмиссии вредных веществ (оксиды азота и монооксид углерода). Так, в России эмиссия NOx ограничена требованиями ГОСТ 28775-90 для привода ГПА (не более 150 мг/м<sup>3</sup>) и ГОСТ 29328-92 для привода турбогенераторов (не более 50 мг/нм<sup>3</sup>). В странах ЕС с 2008 года действуют единые ограничения на эмиссию NOx (EU LCPD) – не более 50 мг/нм<sup>3</sup>. Перечень ограничений на эмиссию приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Пример региональных ограничений на эмиссию вредных веществ.

Регион	Требуемый уровень эмиссии
Россия	150 мг/м <sup>3</sup> (привод ГПА)
	50 мг/нм <sup>3</sup> (привод турбогенераторов)
США	2-42 ppm
Япония	15-70 ppm
Канада	140 г/ГДж <sub>вых. мощности</sub>
Австралия	70 мг/нм <sup>3</sup>
Европейский Союз	50-75 мг/нм <sup>3</sup>

Заданные в различных регионах ограничения на эмиссию вредных веществ вынуждают разработчиков предпринимать усилия по созданию и доводке камер сгорания, обеспечивающих данные ограничения.

При разработке новой модификации авиапроизводного ГТД ПС-90ГП-25ПМ с МЭКС, использующей «сухое» сжигание предварительно подготовленной обеднённой топливовоздушной 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 натурного 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.

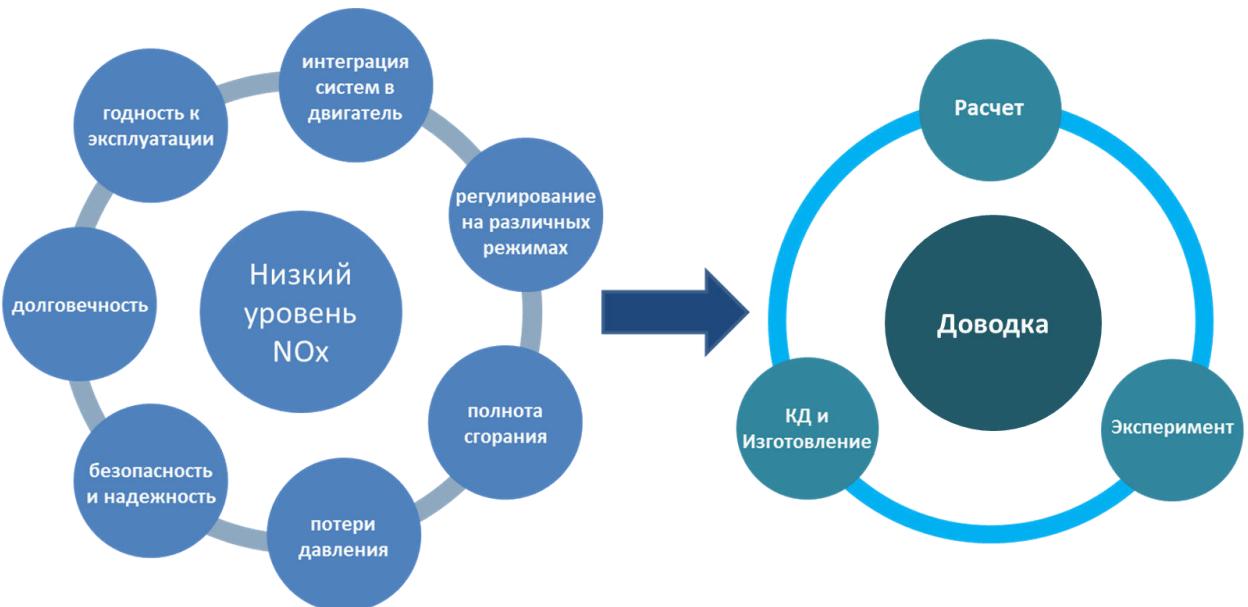


Рисунок 1 – Ограничения, возникающие при обеспечении низкого уровня эмиссии ГТД и циклы доводочных работ

Решение данных задач при создании МЭКС заключается в разработке горелочного модуля фронтового 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.

### 3. Цель работы.

Разработка промышленного газотурбинного двигателя ПС-90ГП-25 с малоэмиссионной камерой сгорания, обеспечивающей уровень эмиссии вредных веществ: оксиды азота NOx – не более 50 мг/нм<sup>3</sup>, оксид углерода CO – не более 100 мг/нм<sup>3</sup>;

### 4. Актуальность работы.

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.

Авиапроизводные промышленные газотурбинные двигатели и, в первую очередь, ГТУ мощностью 25 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 ( $\text{NO}_x$ ) на общемировом уровне (не более 50 мг/нм<sup>3</sup>) 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 и требованиям ГОСТ 29328-92 и 28775-90, создание малоэмиссионных камер сгорания для промышленных ГТД становится крайне актуальной задачей.

Учитывая необходимость обеспечивать требования по эмиссии вредных веществ, а также высокую востребованность в ГТУ мощностью 25 МВт со стороны ключевых заказчиков, задача разработки промышленного ГТД ПС-90ГП-25 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.

## 5. Краткое описание работы.

«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 необходимости разработки 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.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

- модернизация и/или создание современной научно-исследовательской и опытно-конструкторской инфраструктуры по разработке и доводке характеристик МЭКС и ГТД с МЭКС;

- разработка МЭКС для промышленного ГТД ПС-90ГП-25 с уровнем эмиссии вредных веществ: оксиды азота NOx – не более 50 мг/нм<sup>3</sup>, оксид углерода CO – не более 100 мг/нм<sup>3</sup>;

- создание опытных образцов МЭКС для промышленного ГТД ПС-90ГП-25;

- выполнение цикла доводочных испытаний МЭКС в составе технологического газогенератора двигателя ПС-90ГП-25;

- подготовка и выполнение приемочных испытаний двигателя ПС-90ГП-25 с МЭКС;

МЭКС двигателя ПС-90ГП-25ПМ имеет 12 выносных противоточных жаровых труб с индивидуальными газосборниками. Основная идея, заложенная в конструкции камеры сгорания с низким уровнем эмиссии оксидов азота, заключается в организации схемы сжигания предварительно подготовленной обеднённой топливовоздушной смеси. Такая смесь имеет более низкую температуру горения по сравнению со стехиометрическим составом, что способствует снижению эмиссии оксидов азота. Для организации данной схемы основная часть воздуха, поступающего в жаровую трубу, направляется в многомодульное фронтовое устройство, где хорошо перемешивается с основным топливом в полости периферийных и центральных смесителей и затем смесь подаётся в зону горения. Общий вид МЭКС для ГТУ-25ПМ приведён на рисунке 2.

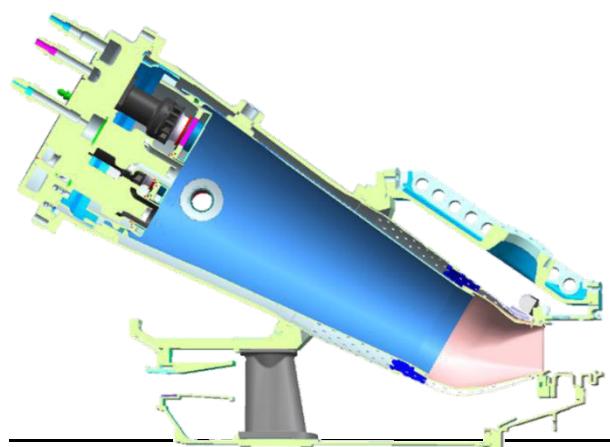


Рисунок 2 - Общий вид МЭКС с многомодульным фронтовым устройством для ГТД ПС-90ГП-25ПМ

Для организации горения в жаровой трубе используется многомодульное фронтовое устройство. В состав фронтового устройства входят: крышка КС, смесители (премиксеры) и крышка жаровой трубы.

Топливные смесители (премиксеры) многомодульной камеры сгорания выполняют подготовку топливовоздушной смеси перед ее подачей в жаровую трубу. В премиксерах используются радиальные завихрители, обеспечивающие смешение, формирование требуемого профиля скоростей и концентраций, а также стабилизацию фронта пламени. Премиксеры имеют сложную геометрию и изготавливаются при помощи аддитивных технологий.

В состав фронтового устройства входит 6 премиксеров - пять периферийных и один центральный. Периферийные премиксеры имеют одинаковую конструкцию воздушного тракта и устанавливаются по кругу на крышку КС вокруг центрального.

Внутренние каналы крышки КС организуют четыре топливных коллектора: два коллектора – гомогенные и два – диффузионные. Четырехколлекторная схема топливопитания многомодульной МЭКС значительно усложняет и конструкцию ГТД, однако, она позволяет гибко управлять полем концентрации в зоне горения, что является критической технологией для создания малоэмиссионной КС, работающей по «бедному» типу.

Для охлаждения жаровой трубы воздух, который направляется во фронтовое устройство, пропускается через кольцевую щель между кожухом обдува и стенкой жаровой трубы. Также для снижения температуры стенки ЖТ на ее внутреннюю поверхность нанесено комплексное теплозащитное покрытие на основе оксида циркония.

Розжиг жаровых труб МЭКС обеспечивается межтрубными пламеперебрасывающими патрубками.

В МЭКС предусмотрен перепуск части воздуха из полости заднего корпуса на вход в двигатель, что позволяет забогатить смесь в зоне горения и, тем самым, расширить возможности регулирования устойчивостью горения при низких температурах окружающей среды.

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 премиксера, обеспечить беспульсационное горение на малоэмиссионных режимах работы КС, выбрать оптимальные конструктивные параметры системы пламеперброса и, таким образом, существенно улучшить пусковые характеристики камеры сгорания.

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.

Для обеспечения работы «сухой» малоэмиссионной камеры сгорания (МЭКС) в составе двигателя ПС-90ГП-25ПМ выполнена следующая доработка существующих систем ГТУ-25П и монтаж новых систем:

- в системе топливопитания, для обеспечения эмиссии используется многомодульная МЭКС с четырехколлекторной схемой топливопитания, но существующая система топливопитания ГТУ-25П с одним дозатором газа и одним стопорным клапаном не обеспечивает требуемое распределение топлива по коллекторам. Для этого в ГТУ-25ПМ применен новый блок топливопитания с большим количеством топливных агрегатов;

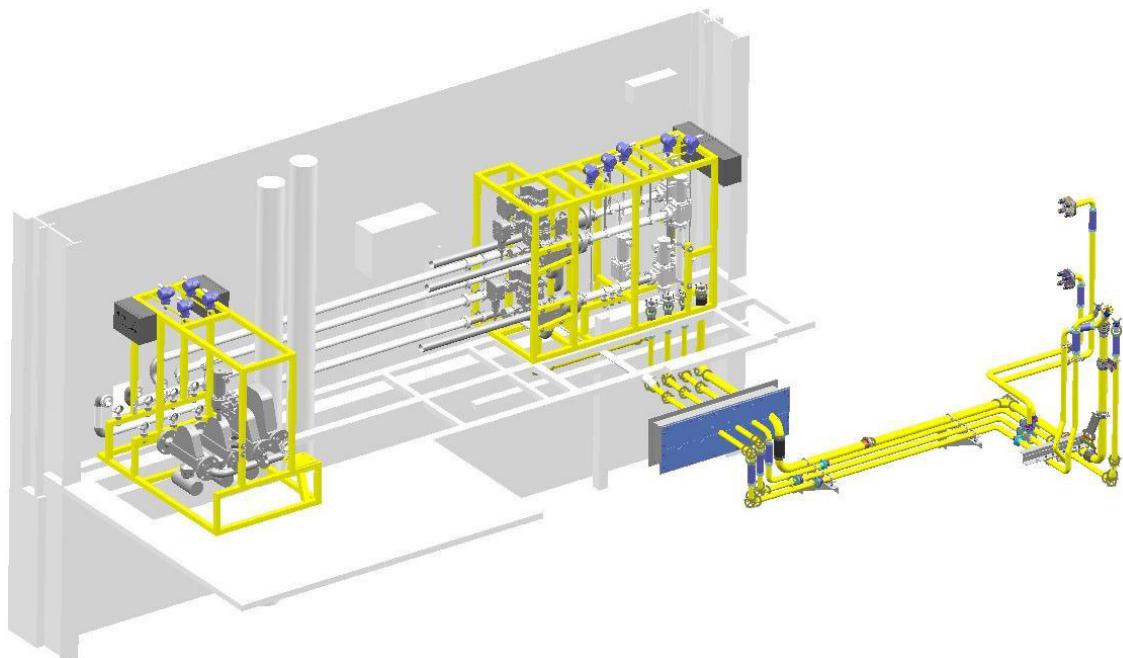


Рисунок 3 – Новая система топливопитания

- для обеспечения перепада на форсунках диффузионных контуров МЭКС необходима их продувка воздухом из-за компрессора высокого давления двигателя ПС-90ГП-25ПМ с охлаждением воздуха до требуемой температуры. Для этого в

конструкцию ГТУ-25ПМ введены дополнительные клапана и аппарат воздушного охлаждения;

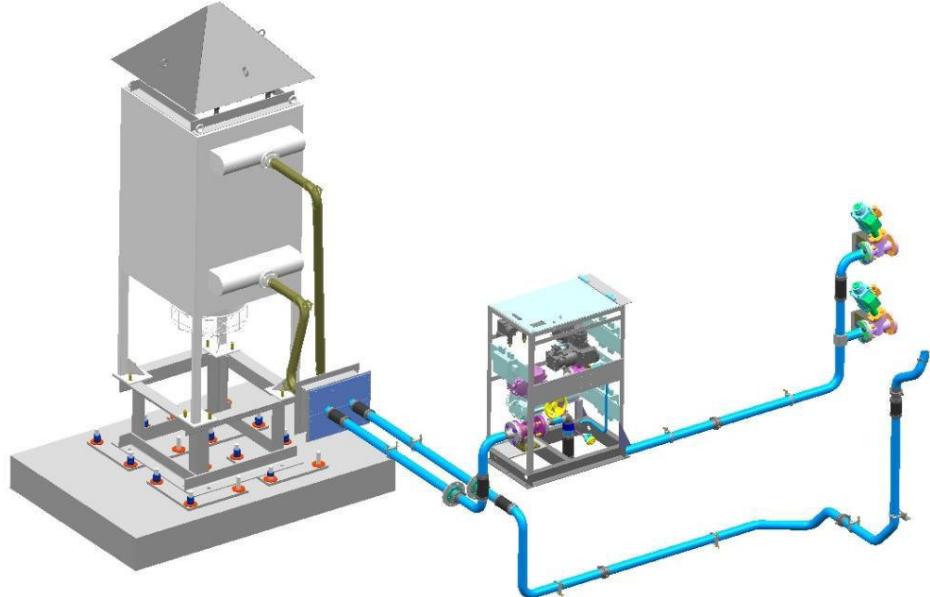


Рисунок 4 – Система продувки диффузионных коллекторов

- для поддержания требуемой температуры в конструкцию ГТУ-25ПМ введена система перепуска воздуха на вход в двигатель из-за компрессора высокого давления двигателя ПС-90ГП-25ПМ. Также данная система нужна для обогащения топливовоздушной смеси. Система перепуска воздуха на вход в двигатель объединена с противообледенительной системой воздуха очистительного устройства ГПА.

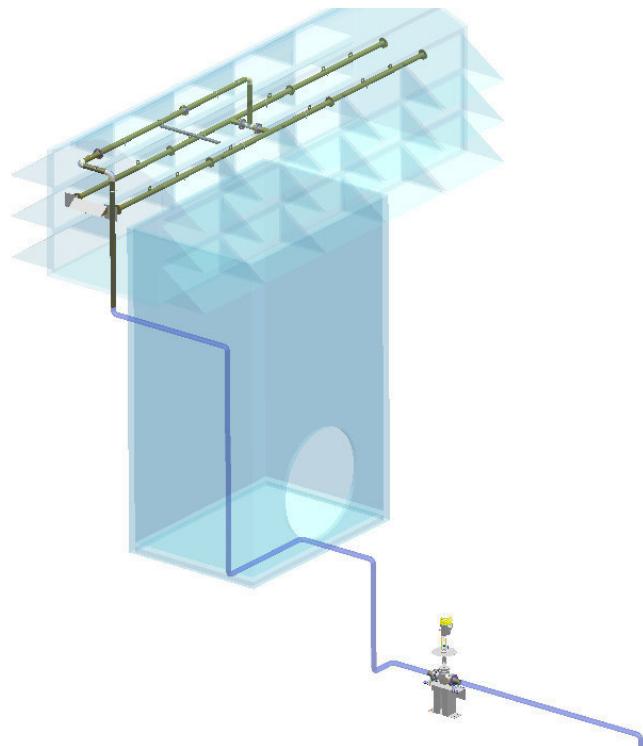


Рисунок 5 – Система перепуска воздуха на вход в двигатель

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-25 с МЭКС (рисунок 6). Общий объем выполненных работ представлен на рисунке 7.

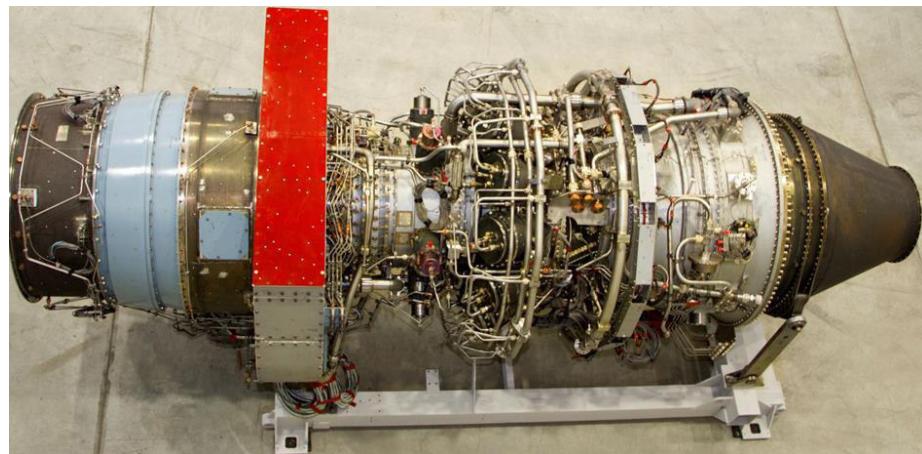


Рисунок 6 – Газогенератор двигателя ПС-90ГП-25П с МЭКС

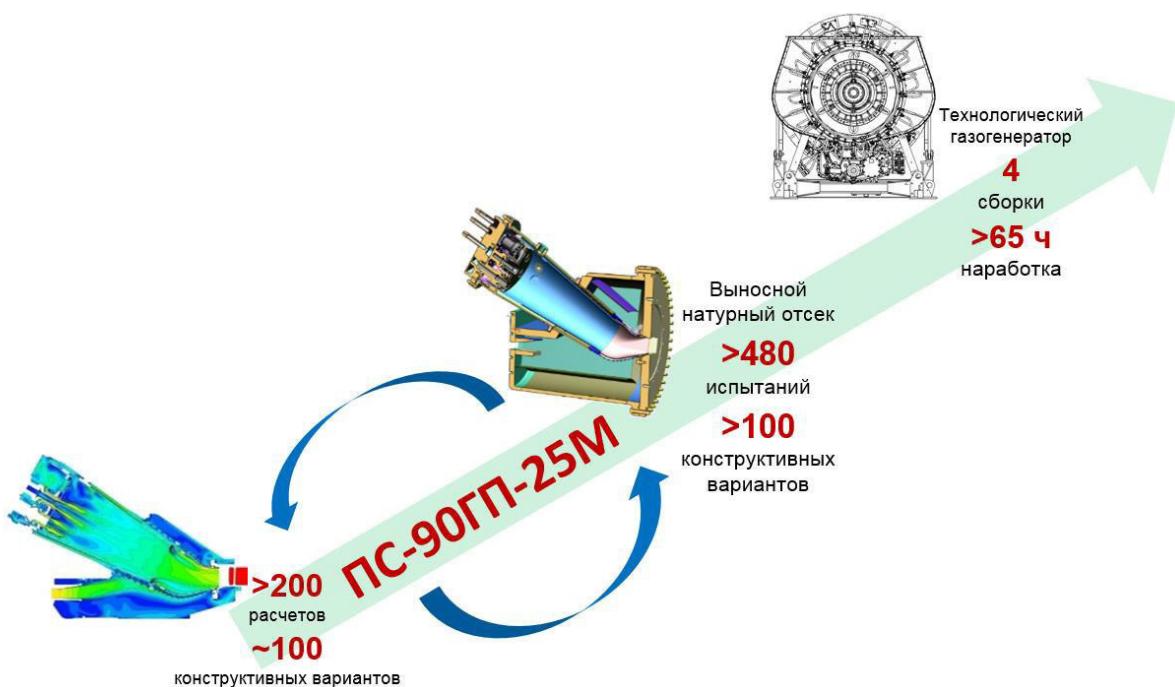


Рисунок 7 – Общий объем расчётных и доводочных работ

Получены все необходимые патенты на двигатель ПС-90ГП-25ПМ с малоэмиссионной камерой сгорания:

<b>№ п/п</b>	<b>Номер патента</b>	<b>Дата приоритета</b>	<b>Название</b>
1	2789950	27.06.2022	Фронтовое устройство камеры сгорания газотурбинного двигателя
2	2782090	29.12.2021	Способ управления температурой газов за турбиной высокого давления газотурбинного двигателя
3	2791069	27.01.2022	Стабилизатор пламени фронтового устройства малоэмиссионной одномодульной камеры сгорания
4	211556	29.12.2021	Устройство контроля лопаток ротора компрессора газотурбинного двигателя
5	2791067	24.06.2022	Горелочный модуль с двустенным распылителем малоэмиссионной многомодульной камеры сгорания
6	2791068	27.06.2022	Пламеперебрасывающий патрубок малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинного двигателя

## 6. Результаты и практическая значимость выполненных работ.

В результате выполнения работ по указанным направлениям были получены следующие результаты:

- разработана конструкция многомодульной «сухой» малоэмиссионной камеры сгорания (рисунок 2), обеспечивающая уровень эмиссии вредных веществ: оксиды азота NOx – не более 50 мг/нм<sup>3</sup>, оксид углерода CO – не более 100 мг/нм<sup>3</sup>. Разработанная конструкция в ходе расчетно-экспериментальных исследований характеристик подтвердила свою работоспособность и соответствие требованиям технического задания, в том числе по обеспечению заданного уровня эмиссии.

- создана модификация двигателя мощностью 25 МВт – ПС-90ГП-25ПМ для промышленной газотурбинной установки ГТУ-25ПМ, которая успешно прошла приемочные испытания на компрессорной станции «Игринская»;

- РКД на двигатель присвоена литера О1;  
 - получены все необходимые патенты на двигатель ПС-90ГП-25ПМ с малоэмиссионной камерой сгорания.

Реализация проекта по созданию двигателя ПС-90ГП-25 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.

Промышленный двигатель ПС-90ГП-25ПМ с многомодульной камерой сгорания – единственный в России, обеспечивающий низкие уровни эмиссии оксидов азота и моноксида углерода в широком диапазоне климатических характеристик.

Конструкция многомодульной камеры сгорания обладает большой потенциал внедрения на промышленные газотурбинные двигатели с близкими параметрами цикла, в частности ПД-14-ГП1 (-ГП2) мощностью 12 (16) МВт.

## 7. Заключение.

Впервые разработана модификация авиапроизводного промышленного двигателя для ГТУ мощностью 25 МВт с выносной трубчатой многомодульной малоэмиссионной камерой, обеспечивающая эмиссию оксидов азота  $<50 \text{ мг}/\text{м}^3$ , 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 NOx на 72%;

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-25 с МЭКС установлен на КС «Игринская» (ПАО «Газпром») в составе ГПА, где успешно прошёл приёмочные испытания. Двигатель готов к серийному производству.