

ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ
АО «ОДК-Авиадвигатель»

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор -
генеральный конструктор
АО «ОДК-Авиадвигатель»



А.А. Иноземцев

2024 г.

Конкурсная работа

в номинации «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения»

в конкурсе «Авиастроитель года» по итогам 2023 года

«Универсальный роботизированный комплекс для стендовых испытаний»

Авторский коллектив:

Пермяков А.И., Леухин М.В., Кожин Ю.В., Квасов А.С., Викулов Д.В.,
Душин Д.В., Ширинкин В.А., Гудовщиков Д.С., Плескань А.Ю.,
Мальцев М.В., Ваганов В.В., Самохвалов Н.Ю., Мелузова И.Б.
(АО ОДК-Авиадвигатель, г. Пермь)

Пермь 2024

Содержание

Термины, определения.....	3
Введение.....	4
Цель работы	5
Актуальность работы	6
Краткое описание работы	9
Результаты и практическая значимость выполненных работ	16
Заключение	26

Термины, определения

ГТД	- газотурбинный двигатель
РУ	- реверсивное устройство
ВЗ	- воздухозаборник
ПОС	- противообледенительная система
КПД	- коэффициент полезного действия
СУ	- система управления
ПО	- программное обеспечение
РТК	- робототехнический комплекс
ПР	- промышленный робот
УП	- управляющая программа робота

Введение

Разработка современных ГТД, отвечающих всем требованиям надежности и безопасности полетов, предполагает проведение многочисленных испытаний как отдельных узлов двигателя, так и двигателя в целом. Данные работы проводятся с использованием специализированной стендовой испытательной базы для обеспечения высокой точности и достоверности измерений, а также обеспечения условий максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации ГТД.

При этом стендовое оборудование характеризуется, в основном, наличием систем, спроектированных исключительно под конкретный вид и типоразмер исследуемого объекта, что, в свою очередь, существенно увеличивает материалоемкость испытательного производства и требует дополнительных площадей для испытательной базы.

Кроме того, учитывая значительный объем опытных и доводочных работ при разработке и испытании перспективных ГТД, стендовые системы должны обеспечивать возможность быстрой переналадки производства и иметь адаптивность к изменяющейся геометрии и размерности ГТД и его узлов. Однако, существующие стационарные системы являются узконаправленными и, тем самым, ограничены в своей применимости и требуют больших временных затрат при переналадке производства.

Таким образом, существующие системы на базе стационарных стендовых испытательных станций не позволяют оперативно решать задачи испытательного производства, что требует разработки новых решений в этой связи.

Цель работы

Разработать автоматизированную мобильную и гибкую систему для испытательного производства ГТД, которая позволяет минимизировать временные затраты на подготовку и проведение испытаний, повысить точность и достоверность результатов исследований, а также обеспечит возможность работы с различными измерительными инструментами в широком рабочем диапазоне решаемых задач испытательного производства.

Актуальность работы

АО «ОДК-Авиадвигатель», используя широкую производственную и испытательную базу, разрабатывает и создает современные авиационные и наземные двигательные установки. В этой связи развитие существующих и создание новых технологий испытательного производства стоит особенно остро.

При проведении инженерных и сертификационных испытаний по измерению эмиссии газообразных вредных веществ, уровня дымления и эмиссии нелетучих твердых частиц за соплом ГТД в качестве инструмента для отбора проб газа традиционно применяются стационарные системы, представляющие собой конструктивно связанные многочисленные пробоотборники (Рисунок 1), устанавливаемые за соплом ГТД. Однако, учитывая габариты двигателя и конструктивное исполнение инструмента для отбора проб, невозможно обеспечить стабильно высокую точность позиционирования инструмента относительно объекта исследования. Кроме того, такие системы не обладают достаточной гибкостью в плане использования на различных испытательных стендах (открытый/закрытый стенд для испытаний полноразмерного ГТД; закрытый стенд для испытаний газогенератора и другие), а также для ГТД с различным типом размерности сопла. Здесь также можно отметить, что перемещение стационарной системы отбора проб в другие позиции требует останова ГТД в ходе испытания. Совокупность данных ограничивающих факторов не позволяет полностью автоматизировать процесс измерения и регистрации параметров эмиссии газообразных веществ и уровня дымления ГТД на различных режимах работы ГТД с обеспечением всех требований к качеству отбираемой пробы выхлопного газа.



Рисунок 1 – Стационарные системы для проведения исследований
потока ГТД

Смежной задачей является проведение исследований за соплом и РУ ГТД для определения полей давления и температуры в рамках выполнения инженерных испытаний и верификации расчетных моделей потока. Выполнение подобных испытаний также предполагает конструирование и размещение за объектом исследования стационарных конструкций с многочисленными пробоприемниками (гребенками), что не обеспечивает

высокую точность позиционирования приемников и увеличивает материалоемкость испытательной базы.

Обособленно стоит задача испытаний современных ПОС. Для оценки эффективности работы ПОС, в данном случае, необходимо не только изготовить материальную часть, но также требуется обеспечить климатические условия, подобные летным. Однако создание специализированных климатических стендов, с учетом габаритов объектов исследования, последующее проведение соответствующих испытаний на таких стендах, а также транспортирование и монтаж ГТД и его узлов требует значительных капитальных и временных затрат.

Создание высокотемпературных турбин с уменьшенным расходом воздуха и высоким КПД также невозможно без создания инновационных методов проектирования турбин и экспериментального исследования данных методов в составе автономных установок. Так, с целью оценки и подтверждения эффективности мероприятий по оптимизации вторичных течений необходимо обеспечить исследование потока в широком диапазоне точек в различных сечениях внутри и на выходе из решетки лопаток турбины с заданной точностью и повторяемостью, что, с учетом существующей испытательной базы, не представляется возможным.

Решение данных задач требует создания нового универсального и мобильного оборудования, которое позволило бы исключить описанные выше недостатки существующих решений и позволило бы решить стоящие перед испытательным производством задачи.

Краткое описание работы

В рамках достижения поставленных целей на АО «ОДК-Авиадвигатель» успешно внедрена и эксплуатируется система отбора проб выхлопных газов с одноточечным пробоотборником, интегрированным на промышленном роботе. Для реализации данной концепции был выполнен ряд работ:

1. Внедрен роботизированный комплекс (Рисунки 2-3), который управляется удаленно через систему управления (СУ) (Рисунок 4).

2. Приобретено ПО и разработана система для виртуальной разработки управляющих программ для промышленного робота (Рисунок 5);

3. Разработана и внедрена система слежения и корректировки положения промышленного робота в режиме реального времени (информация о наличии аналогов подобной системы в РФ и за рубежом не выявлена) для обеспечения доставки измерительного инструмента (пробоотборника) в заданную позицию с точностью ± 5 мм (Рисунки 6 - 7, патент РФ 2641182 (патентообладатель – АО «ОДК-Авиадвигатель»));

4. Разработана и внедрена информационно-измерительная система для автоматизированного приема и регистрации параметров измерения эмиссии газообразных веществ и уровня дымления ГТД на базе РТК (Рисунок 8);

5. Внедрены и успешно эксплуатируются автоматизированная газоаналитическая система измерения газообразных вредных веществ NGA2000 (NO_x , CO , CO_2 , O_2 , C_xH_y) и система определения уровня дымления на базе автоматизированного дымомера AVL415SE (SN);

6. Разработана и внедрена измерительная штанга (имеющая двух контурную систему обогрева линии отбора проб газа) с пробоотборником (Рисунки 9-11, патент РФ 190349 (патентообладатель – АО «ОДК-Авиадвигатель»));

7. Разработана и внедрена система автоматизированного контроля и управления температурой пробы, которая обеспечивает поддержание температуры пробы от точки замера до системы регистрации в заданных

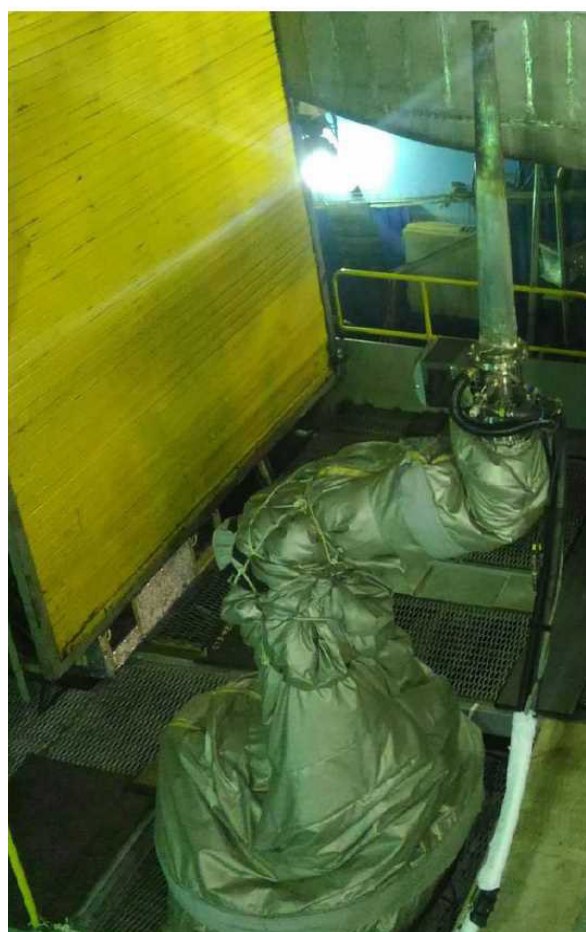
пределах изменения температур согласно требований стандартов гражданской авиации (Рисунок 12);

8. Подобрано и приобретено современное мобильное оборудование для замера эмиссии газообразных вредных веществ, уровня дымления и эмиссии нелетучих твердых частиц за соплом ГТД (Рисунок 13).

9. Разработана и внедрена система видеонаблюдения для визуального контроля процесса перемещения промышленного робота и положения измерительной штанги.



а)



б)

Рисунок 2 – ПР с измерительной штангой без чехла (а) и в чехле (б)



а)



б)

Рисунок 3 – Измерения за соплом двигателя ПС-90А (а) и ПД-14 (б)

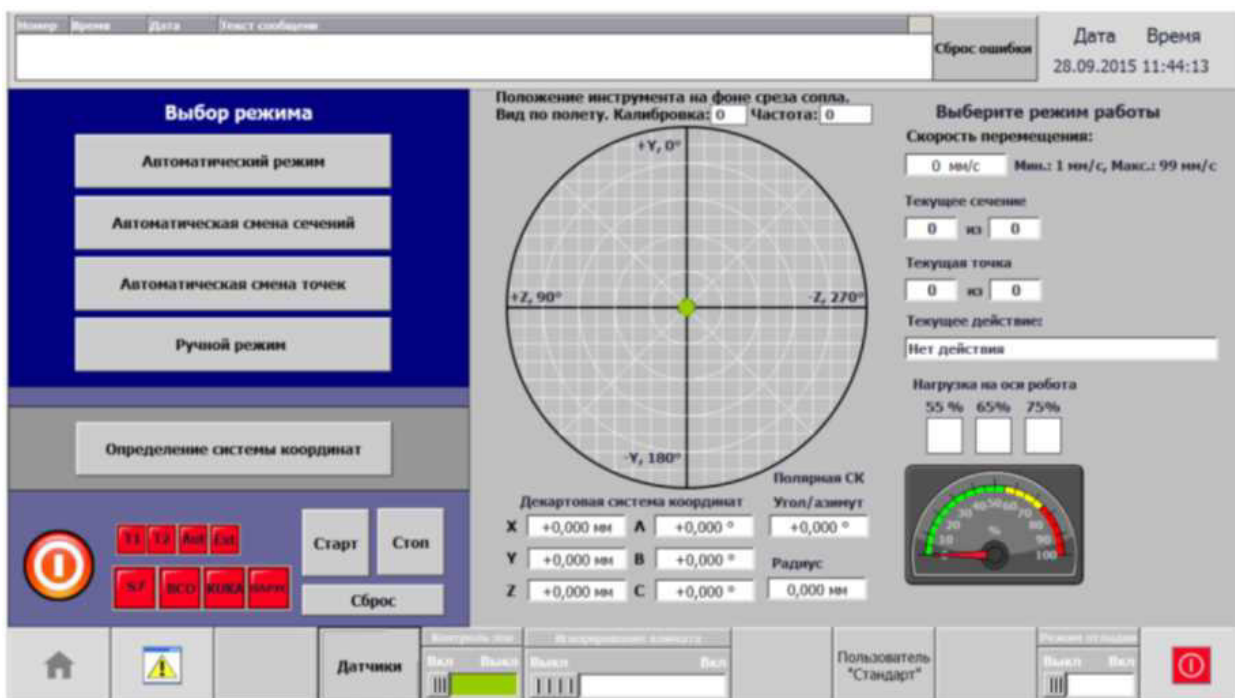


Рисунок 4 – Окно системы управления роботизированным комплексом

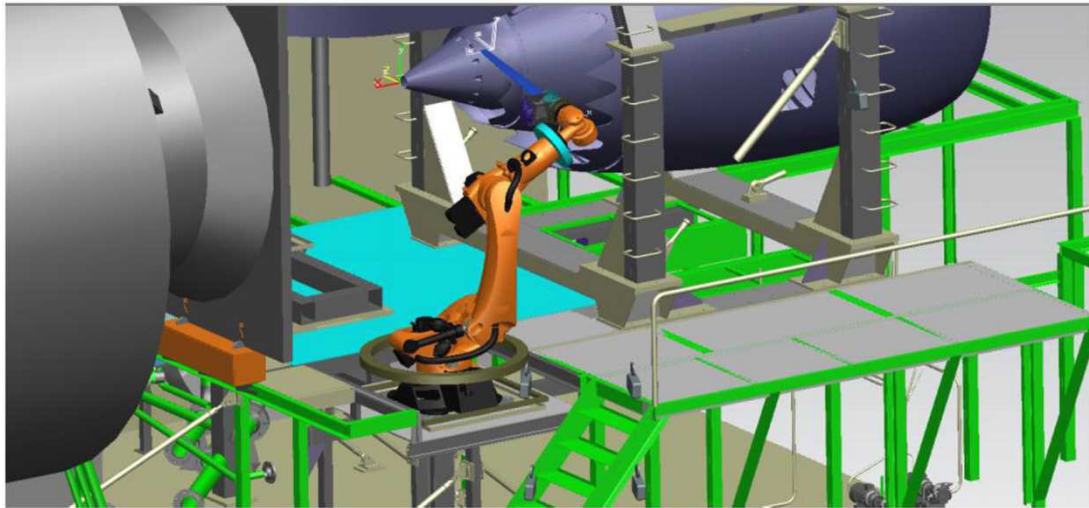


Рисунок 5 – Моделирование движения ПР в ПО для разработки УП

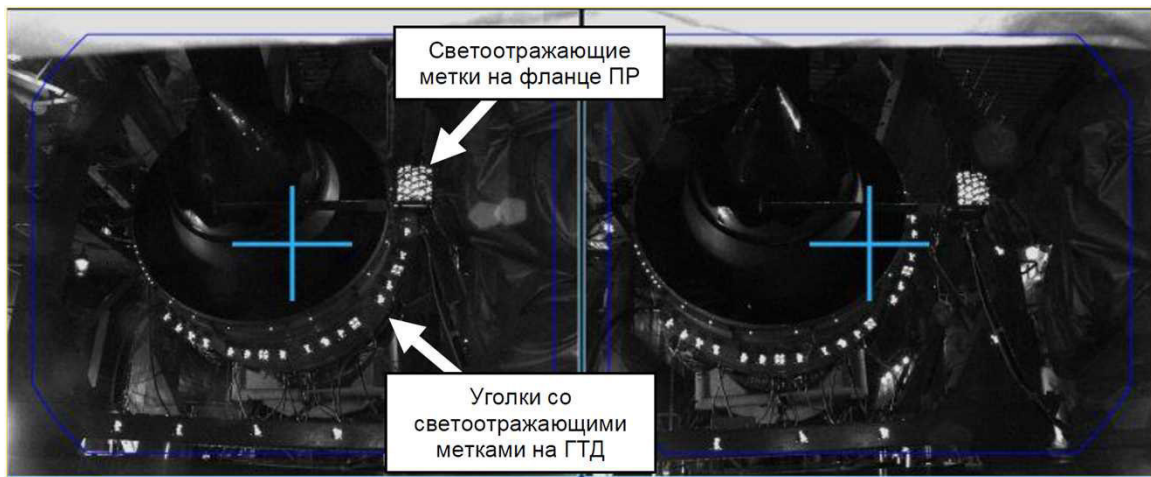


Рисунок 6 – Вид из камер системы слежения, установленных в обогреваемом коробе на испытательном стенде, на светоотражающие метки размещенные на ГТД и элементах ПР

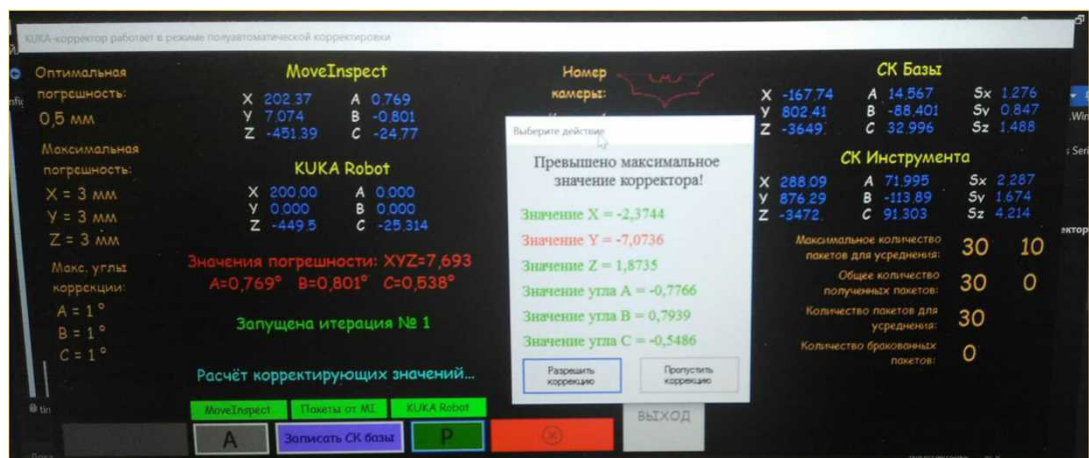


Рисунок 7 – Рабочая область ПО для слежения и корректировки пространственного положения ПР

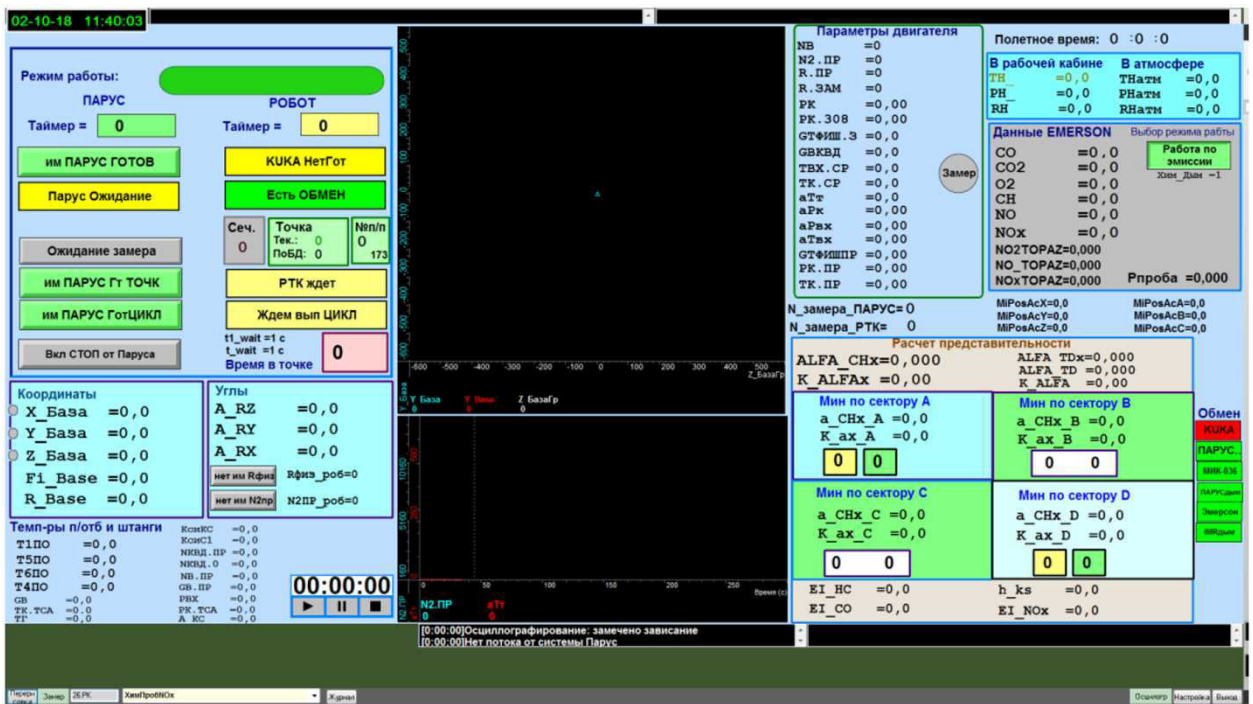


Рисунок 8 – Рабочая область информационно-измерительной системы для выполнения измерений эмиссии газообразных веществ и уровня дымления

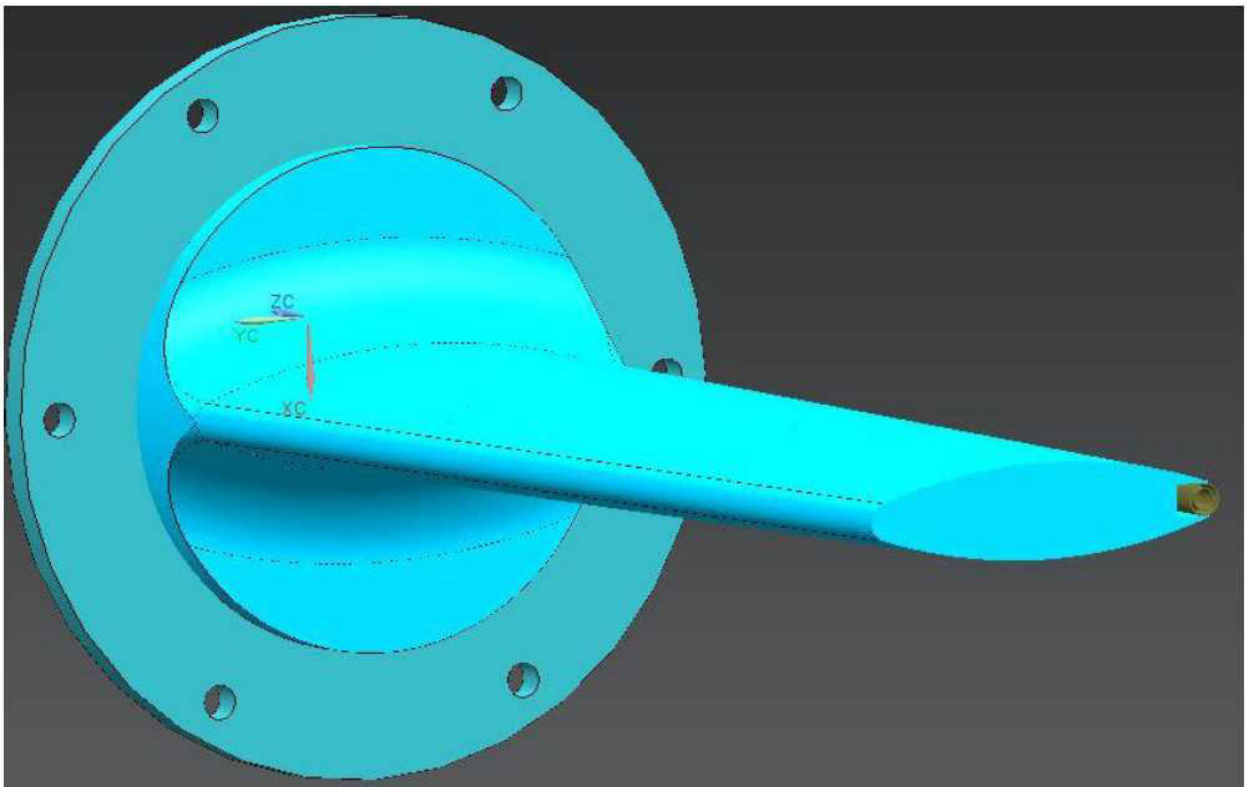


Рисунок 9 – Профиль тела штанги обтекаемой формы

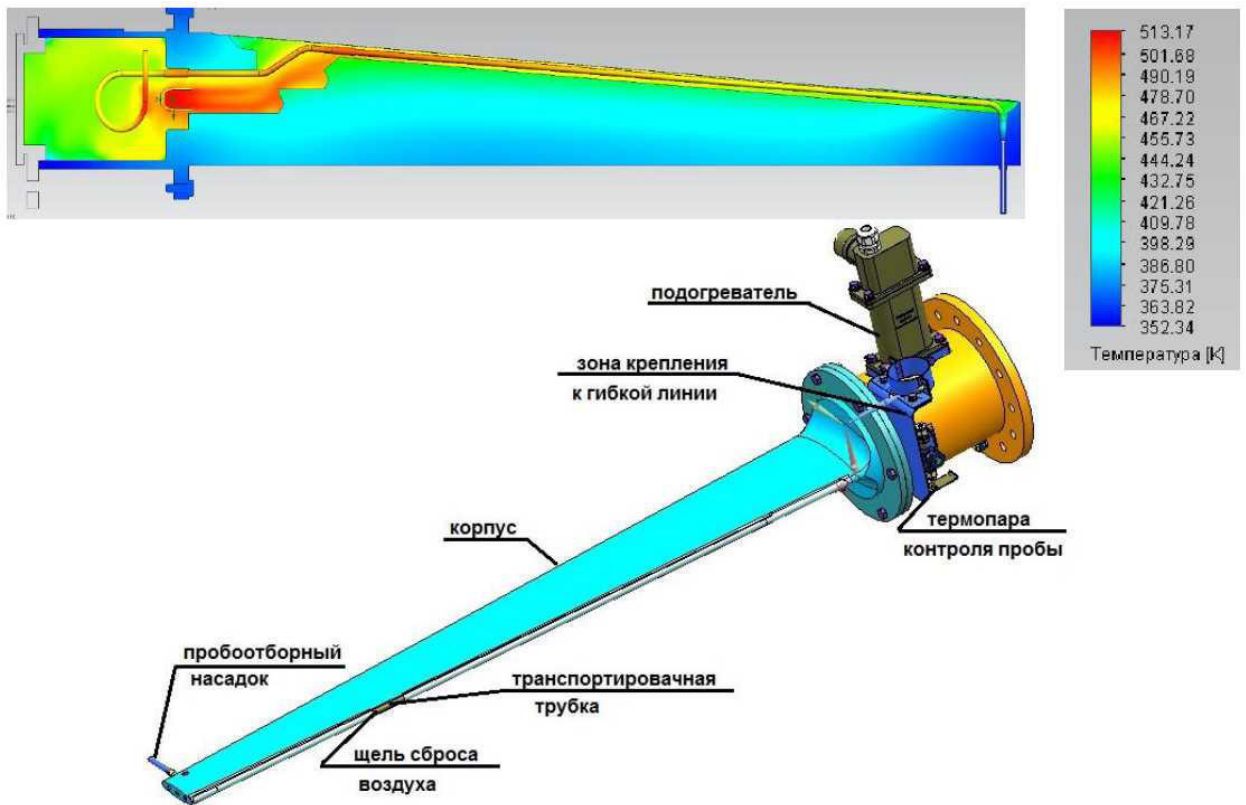


Рисунок 10 – Тепловой расчет системы обогрева пробы и общий вид измерительной штанги

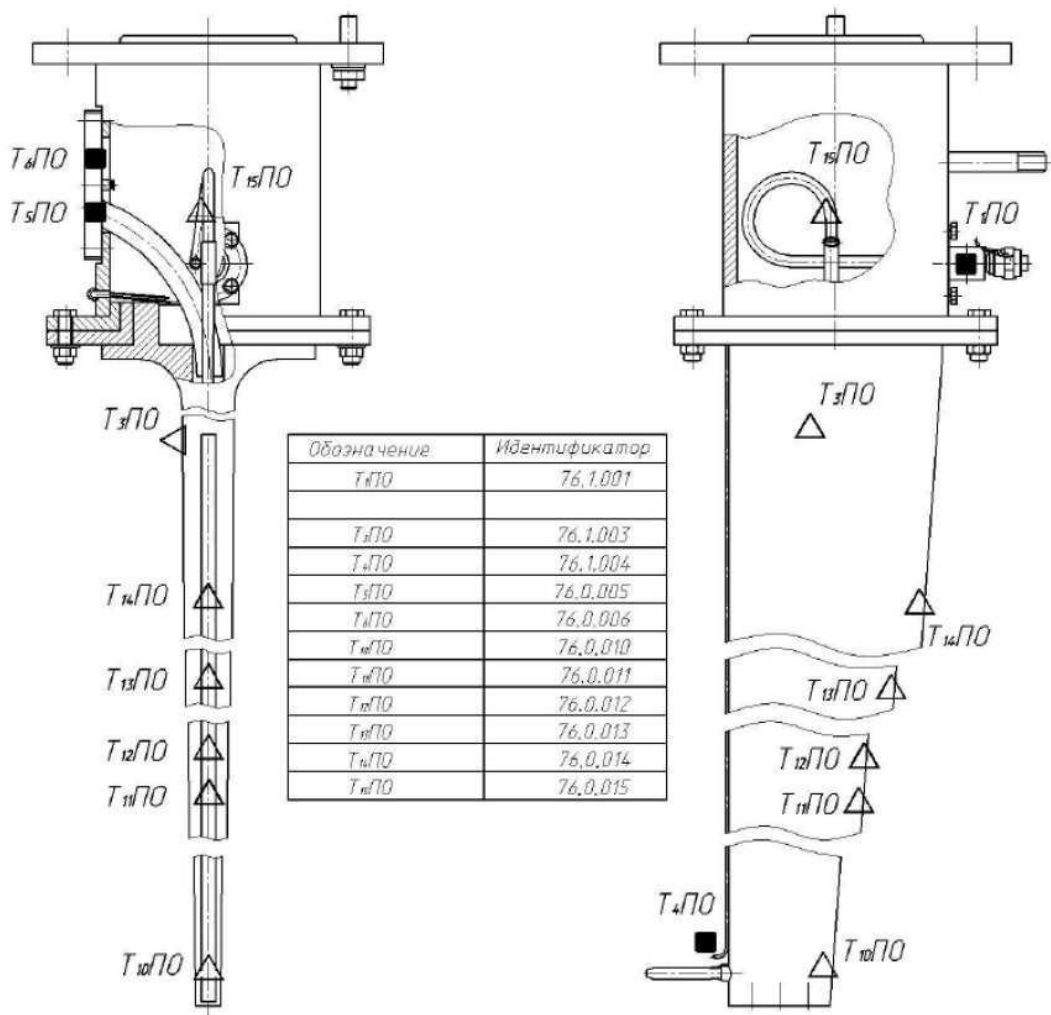


Рисунок 11 – Схема препарирования измерительной штанги для контроля и управления температурой пробы

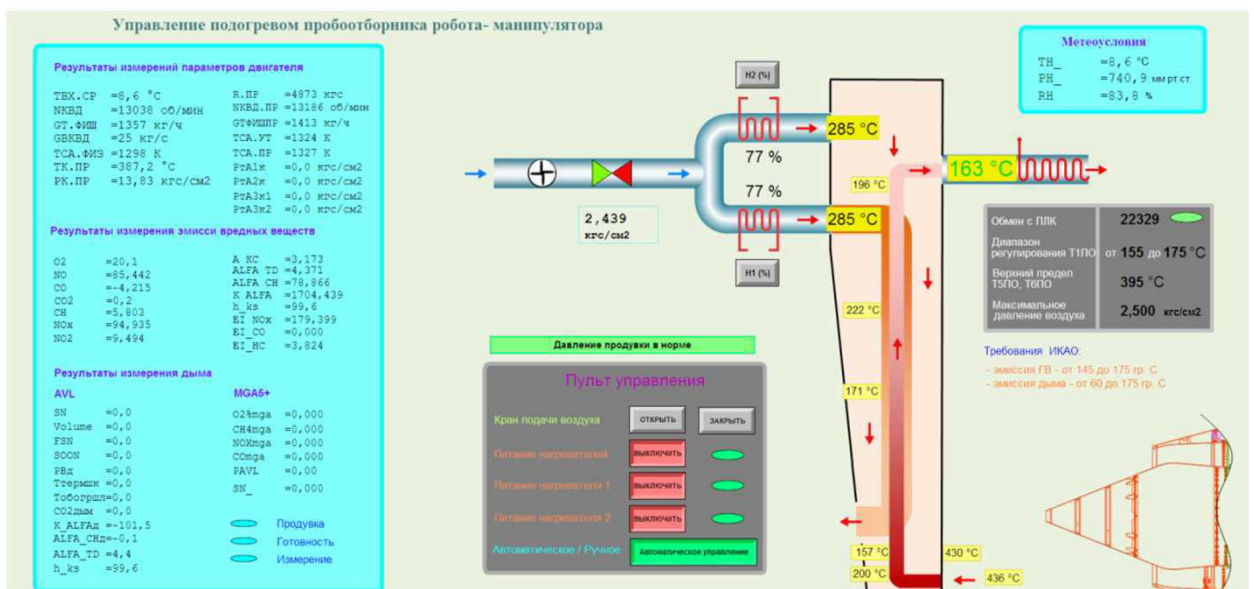


Рисунок 12 – Система автоматизированного контроля и управления температурой пробы в измерительной штанге



Рисунок 13 – Оборудование для замера эмиссии газообразных вредных веществ, уровня дымления и эмиссии нелетучих твердых частиц

Разработанная система на базе промышленного робота позволила осуществлять инженерные и сертификационные испытания перспективных авиационных двигателей в части исследования эмиссии газообразных вредных веществ. Данная система является мобильной и, в настоящее время, применяется на открытых и закрытых испытательных станциях АО «ОДК-Авиадвигатель» и имеет большой потенциал к расширению области ее применения в рамках испытательного производства.

В этой связи, используя базовые элементы комплекса (ПР, СУ, система слежения и корректировки и пр.), данная система была также адаптирована для проведения исследований газодинамических параметров за соплом, РУ и ВЗ ГТД путем смены измерительного инструмента на фланце робота (Рисунок 14). В соответствии с разработанной для данных испытаний УП измерительный инструмент, установленный на фланце робота способен перемещаться по срезу сопла, вдоль решетки РУ или по срезу ВЗ для выполнения замеров давления и температуры в широком пространственном диапазоне (Рисунок 15). Это позволило провести инженерные исследования поля потока и пространственного распределения в нем давлений и температур,

что, в свою очередь, позволило уточнить и верифицировать расчетные модели. В этой связи было также запатентовано решение для ускорения проведения таких исследований – Способ определения газодинамических параметров потока двигателя патент RU 2738296 (патентообладатель – АО «ОДК-Авиадвигатель»), которое позволит сократить время измерений в несколько раз, в зависимости от объема необходимых исследований.

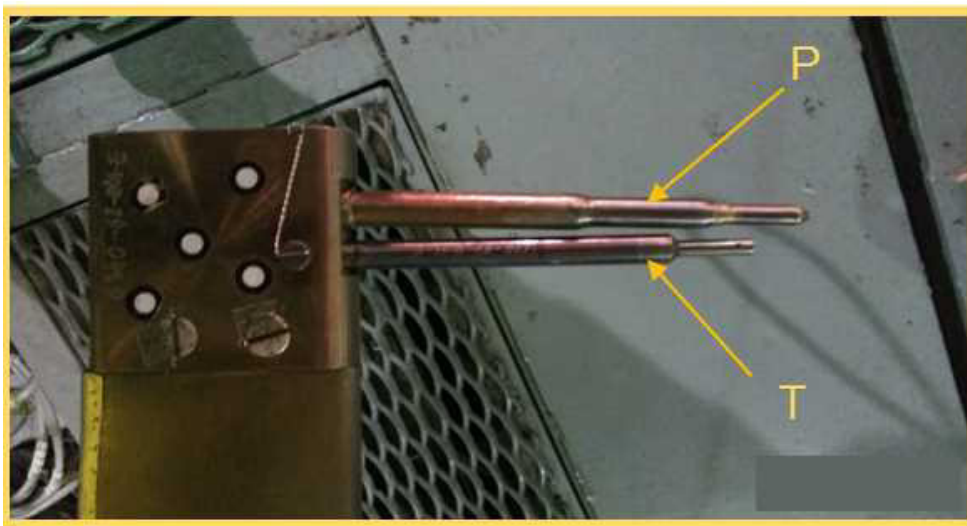


Рисунок 14 – Измерительный элемент системы измерения скоса потока, установленный на фланце ПР



Рисунок 15 – Измерение полей давления и температуры за соплом, РУ и ВЗ ГТД

Современные технологии позволили расширить область применения разработанного комплекса, за счет создания миниатюрной системы измерения удалось внедрить данное оборудование для исследования потока в межлопаточных каналах секторов лопаток в составе установки для аэродинамического исследования лопаток турбин (Рисунок 16).



Рисунок 16 – Аэродинамическое исследование лопаток турбин с использованием разработанного РТК

В рамках данных исследований использование адаптируемого РТК позволило обеспечить возможность позиционирования измерительной штанги с 5-ти точечным приемником давления в качестве измерительного инструмента в широком диапазоне точек в различных сечениях внутри и на выходе из решетки лопаток турбины с заданной точностью и повторяемостью в режиме реального времени в темпе испытаний. Это, в свою очередь, позволило выполнять измерения полей параметров потока (скорость, давление, угол скоса потока) за решеткой лопаток для последующей оценки потерь давления и кинетической энергии различных вариантов решеток. Результаты данных работ используются для разработки рекомендаций и подходов к оптимизации вторичных течений в межлопаточных каналах турбин.

В рамках разработки перспективных электрических ПОС для двигателей большой тяги имеется необходимость в проведении натурных испытаний. При решении поставленной задачи были рассмотрены и проанализированы различные способы создания льда на элементах двигателей и самолетов, среди которых различные климатические камеры и аэродинамические трубы с контролируемыми атмосферными параметрами, а также стационарные конструкции. Исходя из анализа вариантов, учитывая высокую стоимость проведения испытаний в таких специализированных испытательных стендах и транспортировочные расходы по размещению в них ГТД для проведения инженерных испытаний была выполнена доработка разработанного ранее РТК для обеспечения возможности его использования для решения данных работ.

В этой связи была разработана конструкция штанги для распыления воды, имеющая в себе магистрали подвода/отвода воздуха и воды, который обеспечивает величину среднемедианного диаметра капель 36 мкм (Рисунок 17), а также для обеспечения управления данной системой была выполнена доработка измерительно-информационной системы. Для обеспечения возможности измерения и оценки профиля намороженного льда была внедрена система оцифровки, позволяющая получить 2D профиль с погрешностью 0,2 мм с использованием лазерного полосового сканера.

В результате анализа работы данного комплекса были выявлены следующие преимущества системы на базе промышленного робота:

- данная система обладает большой гибкостью использования с различными ГТД, даёт возможность быстрой адаптации системы для создания условий образования льда на объекте с отличными конструкцией и типоразмером;
- система имеет низкую себестоимость в сравнении со специальными климатическими камерами;
- позволяет выполнять точечное обледенение необходимых элементов, без внесения изменения в конструкции исследуемой установки;

- позволяет изменять режимы создания слоя в реальном времени, в темпе проведения испытаний;
- позволяет получить подробный 2D профиль намороженного слоя льда;
- обеспечивает малое время подготовки, наладки для обводнения и последующего обледенения.



Рисунок 17 – Штанга для распыления воды

а) Схема штанги:

1-полосовой лазерный сканер для измерения профиля намороженного слоя льда; 2-форсуночный модуль; 3-подвод сжатого воздуха; 4-подвод и отвод воды; 5-тело штанги; 6- монтажный фланец.

б) Внешний вид изготовленной штанги

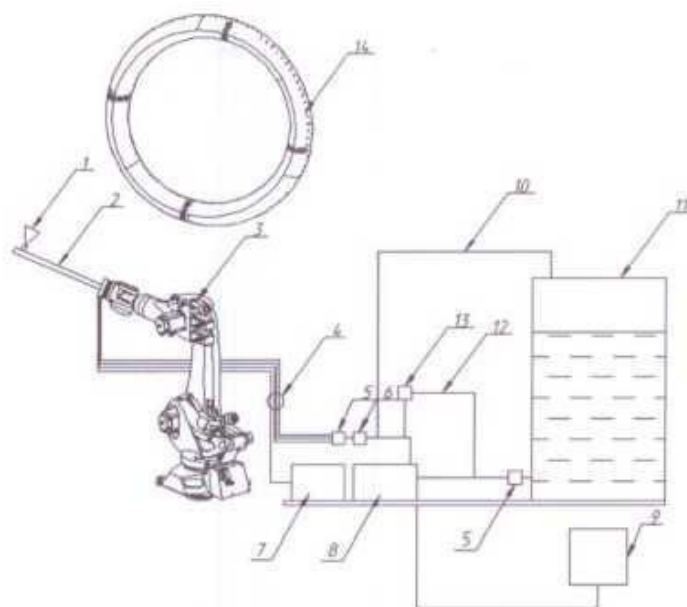


Рисунок 18 – Схема роботизированной системы:

1-распыляющая форсунка; 2-штанга промышленного робота; 3- промышленный робот; 4-магистраль подвода и отвода воды и воздуха; 5- запорное устройство (кран); 6-запорно-регулирующее устройство; 7- компрессор; 8-насос; 9-система управления; 10-обратная магистраль; 11-бак с дистиллированной водой, оснащенный подогревом; 12-линия сброса; 13- предохранительный клапан; 14 – элемент обледенения.

Разработанная роботизированная система создания льда на элементах ГТД не имеет аналогов в Российской Федерации. В рамках правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности был разработан и оформлен патент на изобретение RU 2766927 (патентообладатель – АО «ОДК»).

Данная система введена в промышленную эксплуатацию и успешно решает задачу по созданию слоя льда необходимой толщины в ключевых точках для проведения испытаний систем ГТД. Создание данного роботизированного комплекса позволило обойтись без дорогостоящих исследований в специализированных испытательных стендах. Разработанная система позволяет выполнять обледенение элементов ГТД в условиях открытого воздуха в условиях отрицательных температур. Благодаря своей универсальности данная система имеет перспективы применения при испытаниях новых газотурбинных двигателей.

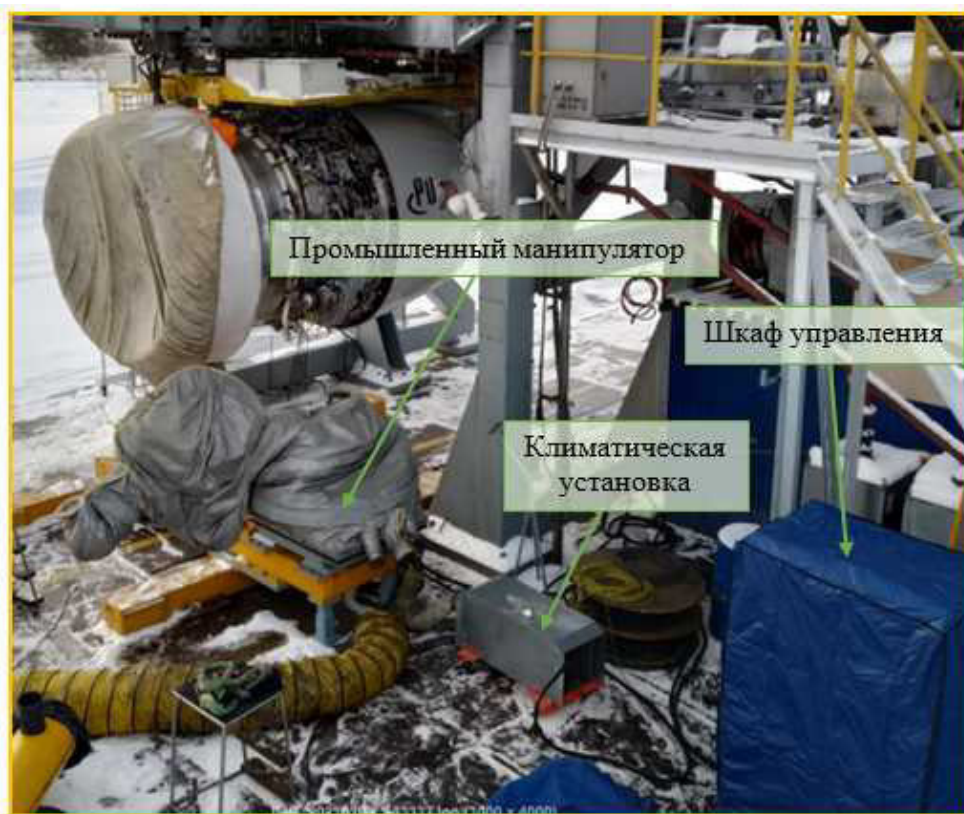


Рисунок 19 – Общий вид роботизированной системы на открытом испытательном стенде



Рисунок 20 – Пример слоя льда на губе ВЗ

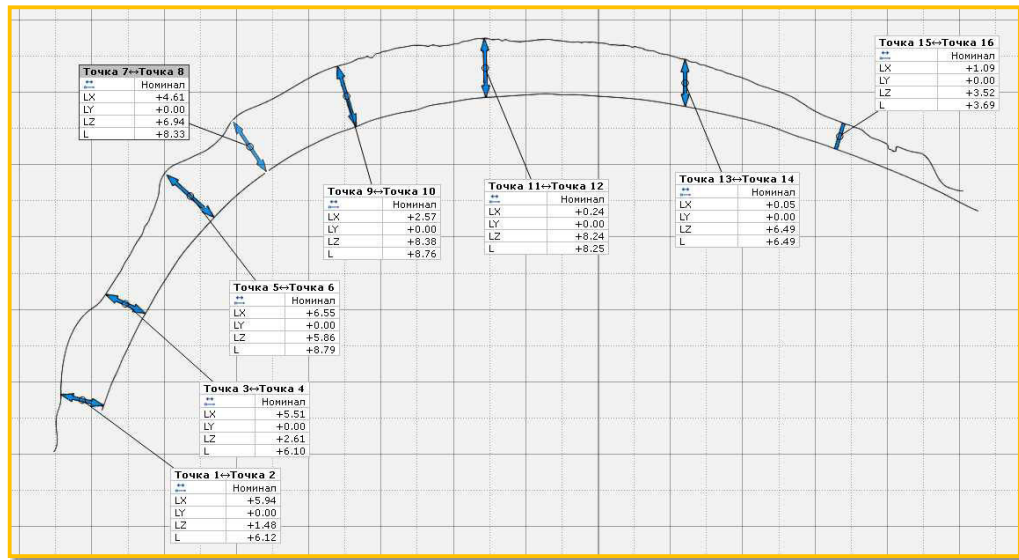


Рисунок 21 – Пример результатов оцифровки намороженного льда (форма и толщина)

Результаты и практическая значимость выполненных работ

Благодаря использованию универсального роботизированного комплекса на АО «ОДК-Авиадвигатель» удалось достичь ряда новых преимуществ, а именно:

1. Автоматизация процессов испытательного производства;
2. Гибкость (позволяет устанавливать различные штанги с различными измерительными элементами: одноточечный пробоотборник со сменными насадками диаметром от 3 до 6 мм, 5-ти или 7-ми точечный приемник давления, приемник температуры и другое; устанавливать штанги с форсункой распыла воды – для намораживания льда в требуемых зонах и другое);
3. Мобильность (обеспечивает возможность перемещения и монтажа на различных испытательных стендах (открытый стенд, закрытый стенд, установки испытания узлов двигателя и др.);
4. Универсальность (возможность применения комплекса для проведения испытаний других видов двигателей и механизмов) ;
5. Позиционирование различных штанг на объектах исследования различной геометрии и размерности (полноразмерный ГТД, газогенератор ГТД, сектор лопаток и другое) по заданной траектории в широком диапазоне точек на различном удалении;
6. Позиционирование в заданных точках с требуемой точностью и повторяемостью в режиме реального времени;
7. Сокращение времени проведения испытаний и повышение их качества, что повышает конкурентоспособность выпускаемой продукции;
8. Возможность эксплуатации при температурах от -30 до +40°C.

В результате созданный универсальный роботизированный комплекс, в совокупности с другим оборудованием, к примеру, различные штанги (с пробоотборником, с приемником давления, с приемником температуры, с форсункой распыла воды и др.), измерительной аппаратурой

(газоаналитическая, измеритель давления, измеритель температуры), стендовыми программно-аппаратными средствами позволил АО «ОДК-Авиадвигатель»:

1. Провести инженерные и сертификационные измерения эмиссии газообразных вредных веществ и дыма на различных ГТД на различных испытательных стендах, впервые в РФ применив одноточечный пробоотборник, установленный на ПР, для измерения эмиссии газообразных вредных веществ в различных точках за соплом ГТД;

2. Получить подробную эпюру распределения концентраций вредных веществ в выхлопе ПД-14 для демонстрации того, что обеспечивается получение репрезентативной пробы для каждой из установленных величин тяги;

3. Выполнить имитацию обледенения губы ВЗ в рамках инженерных работ по созданию, тестированию и доводке перспективных ПОС;

4. Провести инженерные измерения газодинамических параметров газового потока за соплом ГТД;

5. Провести инженерные измерения поля параметров потока за решеткой сопловых лопаток на стационарной установке аэродинамического исследования – для оптимизации аэродинамического профиля лопаток;

В перспективе работы по расширению области применения и функциональному наполнению разработанного роботизированного комплекса будут продолжаться.

Заключение

Разработка универсального роботизированного комплекса для стендовых испытаний является важным шагом в развитии современных технологий измерения параметров газового потока ГТД. Предложенная система измерения, основанная на гибком и многофункциональном РТК обеспечивает высокую точность и надежность измерений, что является критически важным для эффективной работы газотурбинных двигателей. Комплекс обладает широким спектром возможностей и может быть использован для проведения различных испытаний, что делает его универсальным и гибким инструментом для исследования и анализа работы ГТД.

Благодаря использованию роботизированной системы, пользователь системы получает возможность удаленного управления и контроля за процессом измерений, что повышает безопасность и удобство работы.

Таким образом, универсальный роботизированный комплекс для стендовых испытаний является инновационным решением, способным значительно улучшить процесс проведения испытаний.



Рисунок 22 – Универсальный роботизированный комплекс

Основные публикации по теме работы

Патенты:

1. Патент РФ 2641182 Способ доставки измерительного элемента в заданную позицию при замерах параметров газового потока газотурбинного двигателя / Пермяков А.И., Мандрыгин С.Э., Викулов Д.В., Гладышев М.В., Муринов Г.Н. – 2016152412; Заявл. 28.12.2016; Оpubл. 16.01.2018, бюл. 2. Патентообладатель – АО «ОДК-Авиадвигатель».

2. Патент РФ 190349 Устройство для измерения параметров газового потока / Кожин Ю.В., Григоренко О.П., Квасов А.С., Огнев Ю.В. – 2019114661; Заявл. 15.05.2019; Оpubл. 28.06.2019, бюл. 19. Патентообладатель – АО «ОДК-Авиадвигатель».

3. Патент РФ 2738296 Способ определения газодинамических параметров потока двигателя / Пермяков А.И., Леухин М.В., Бекурин Д.Б. Патентообладатель – АО «ОДК-Авиадвигатель».

4. Патент РФ 2766927 Способ имитации обледенения на объекте исследования / Пермяков А.И., Мальцев М.В., Леухин М.В., Шабунин А.А., Гуляев М.Н. – 2020119823; Заявл. 16.06.2020; Оpubл. 11.12.2020, бюл. 35. Патентообладатель – АО «ОДК».

5. Свидетельство программа для ЭВМ №2020662821 «Программа для корректировки положения промышленного робота в режиме реального времени для обеспечения заданной точности позиционирования» / Гуляев М.Н., Леухин М.В., Пермяков А.И., Шабунин А.А., Викулов Д.В. – 202066190 15.10.2020; Оpubл. 19.10.2020, бюл. 10. Правообладатель - АО «ОДК-Авиадвигатель».