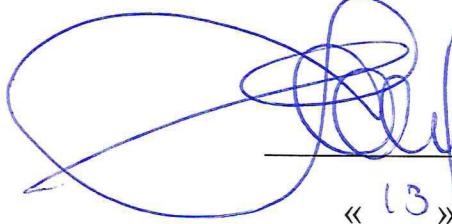


ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение»

УТВЕРЖДАЮ


Управляющий директор
E.A. Семивеличенко
«13» окт 2023 г.

Конкурсная работа

в номинации «За создание новой технологии»

в конкурсе «Авиастроитель года» по итогам 2022 года

«Управление противообледенительной системой ГТД по изменению
перепада давления воздуха на защитной сетке на входе в двигатель»

Уфа 2023

Содержание

1. Термины и определения	3
2. Введение	4
3. Цель работы	4
4. Актуальность работы.....	4
5. Краткое описание работы	5
6. Результаты и практическая значимость выполненных работ	6
7. Заключение	18

1. Термины и определения

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

ГПА – газоперекачивающий агрегат;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ГТУ – газотурбинная установка;

ГТЭ – газотурбинная энергетическая установка;

ЗС – защитная сетка;

КПД – коэффициент полезного действия;

КПИ – комплекс производственных испытаний;

КС – компрессорная станция;

ПОС – противообледенительная система;

РНД – ротор низкого давления

2. Введение

Эксплуатация ГТД (ГПА, ГТЭ) в холодное время года осуществляется с включенной противообледенительной системой (ПОС) по достижении температуры атмосферного воздуха ниже 5 °С, при этом даже в условиях не способствующих обледенению, что приводит к снижению КПД ГТД. Данное исследование призвано повысить эффективность двигателя снижением времени работы ПОС. Практическая реализация осуществляется путем изменения инновационного управления ПОС, с использованием перепада давления на ЗС на входе в двигатель в качестве управляющего фактора.

3. Цель работы

В данной работе представлено исследование и практическое применение инновационного управления ПОС ГПА, используя перепад давления на ЗС на входе в двигатель в качестве управляющего фактора.

4. Актуальность работы

4.1 Эксплуатация ГПА в холодное время года осуществляется с включенной противообледенительной системой (ПОС) по достижении температуры атмосферного воздуха ниже 5 °С. Однако ГПА продолжает работать с ПОС даже в условиях не способствующих обледенению (до 70 % в год). Данное явление приводит к снижению КПД ГПА, т.к. эффективный КПД снижается на 0,4 % в процессе работы ПОС из-за вывода из рабочего процесса ГТД на подогрев воздуха до 2 % расхода воздуха сжатого до 12 – 17 кгс/см². Также данная проблема существовала и при эксплуатации ГТЭ. В этом случае перерасход топливного газа, который достигал до 7 млн. м³ в год по опыту эксплуатации станций ГТЭ-10/95, приводило к снижению прибыли до 40 млн. рублей в год. В качестве параметра, определяющего степень обледенения, предлагается использовать перепад на защитной сетке входного устройства ГТД. Данный параметр характеризует изменение аэродинамического сопротивления сетки при обледенении или загрязнении, и формируется как разница давлений воздуха перед и за сеткой, которая измеряется датчиками типа «Метран». Этот параметр, впрямую связанный с приведенной плотностью потока воздуха на входе $q(\lambda_{вх})$, позволяет получить

однозначную зависимость $\Delta P_{3C} = f(n_{НД\ пр})$ во всем эксплуатационном диапазоне режимов привода.

5. Краткое описание работы

5.1 В процессе данной работы была поставлена цель по снижению времени работы ПОС ГТД используя инновационный алгоритм, в котором в качестве критерия используется перепад на защитной сетке. Для этого было необходимо:

- определить возможности использования алгоритма управления ПОС, а также точности используемого критерия обледенения;
- определить зависимости перепада давления на защитной сетке от частоты вращения ротора низкого давления (РНД) во всем эксплуатационном диапазоне режимов ГТД, т.к. данная зависимость и будет использоваться в качестве базисной;
- определить величин перепада на защитной сетке, которые соответствуют условиям обледенения;
- провести апробации алгоритма управления ПОС по перепаду на защитной сетке в эксплуатационных условиях;
- выполнить оценку снижения времени работы с ПОС и без.
- выполнить оценку эффективности системы.
- внедрить алгоритм управления ПОС в эксплуатацию.

6. Результаты и практическая значимость выполненных работ

6.1 На начальном этапе была поставлена цель определить наличие функциональной зависимости перепада на защитной сетке на входе в двигатель от частоты вращения РНД во всем эксплуатационном диапазоне работы ГТД. Система перепада на защитной сетке на входе в ГТД уже использовалась, но в качестве критерия загрязнения проточной части. После проведенных испытаний на ГТЭ-10/95 функциональная зависимость была получена. Она представлена на рисунке 1.

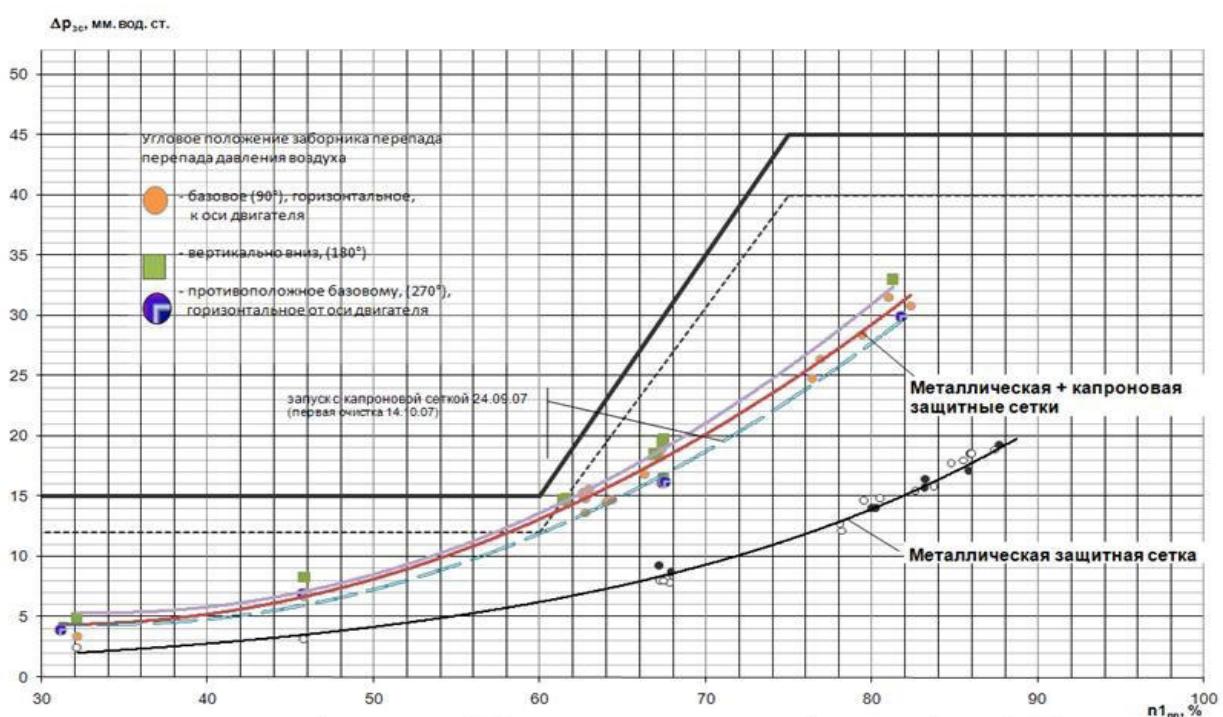


Рисунок 1 – Зависимость $\Delta P_{зс} = f(n_{\text{НДп}})$ при различных положениях заборника давления и комбинаций сеток

6.2 На рисунке 1 представлена зависимость перепада на защитной сетке от частоты вращения РНД. Были получены перепады для различных комбинаций защитных сеток, в зависимости от материала, коэффициента живого сечения (параметра, характеризующего пропускную способность сетки). Также были получены величины перепадов в зависимости от ориентации заборника датчика типа «Метран». Выяснилось, что с тремя положениями заборника давления под защитной сеткой разброс показаний $\Delta P_{зс}$ для всех положений заборника не превысил ± 2 мм вод.ст. В итоге, данная зависимость была принята в качестве

исходной для последующей эксплуатации установок. На рисунке 2 представлена схема замера перепада давления на защитной сетке на входе в ГТД.

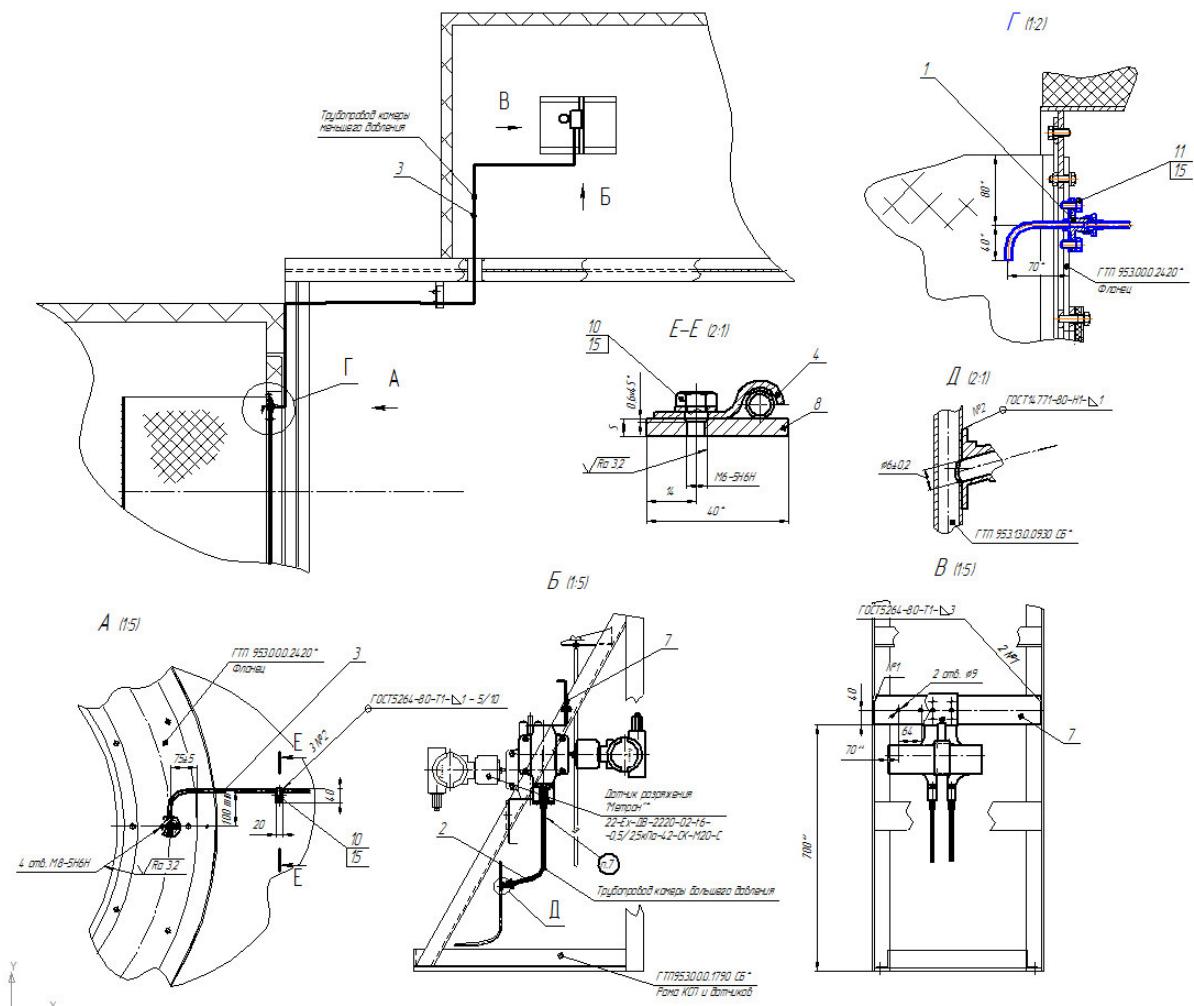


Рисунок 2 – Схема замера перепада давления на защитной сетке на входе в ГТД

На следующем этапе были определены граничные значения перепада на защитной сетке в летнее время, в качестве критерия загрязнения защитной сетки, а для зимнего времени также были определены граничные значения при достижении которых, включалась ПОС. В качестве опытных, были использованы две станции ГТЭ, и данный алгоритм был апробирован в условиях обледенения, метели и снега. Данные метеоусловия считаются оптимальными для образования льда, т.к. имеет место наличие высокой влажности выше 75 % и диапазон атмосферных температур от -5 до 0 °C.

На рисунке 3 представлен график изменения перепада давления на защитной сетке на одной из станций.

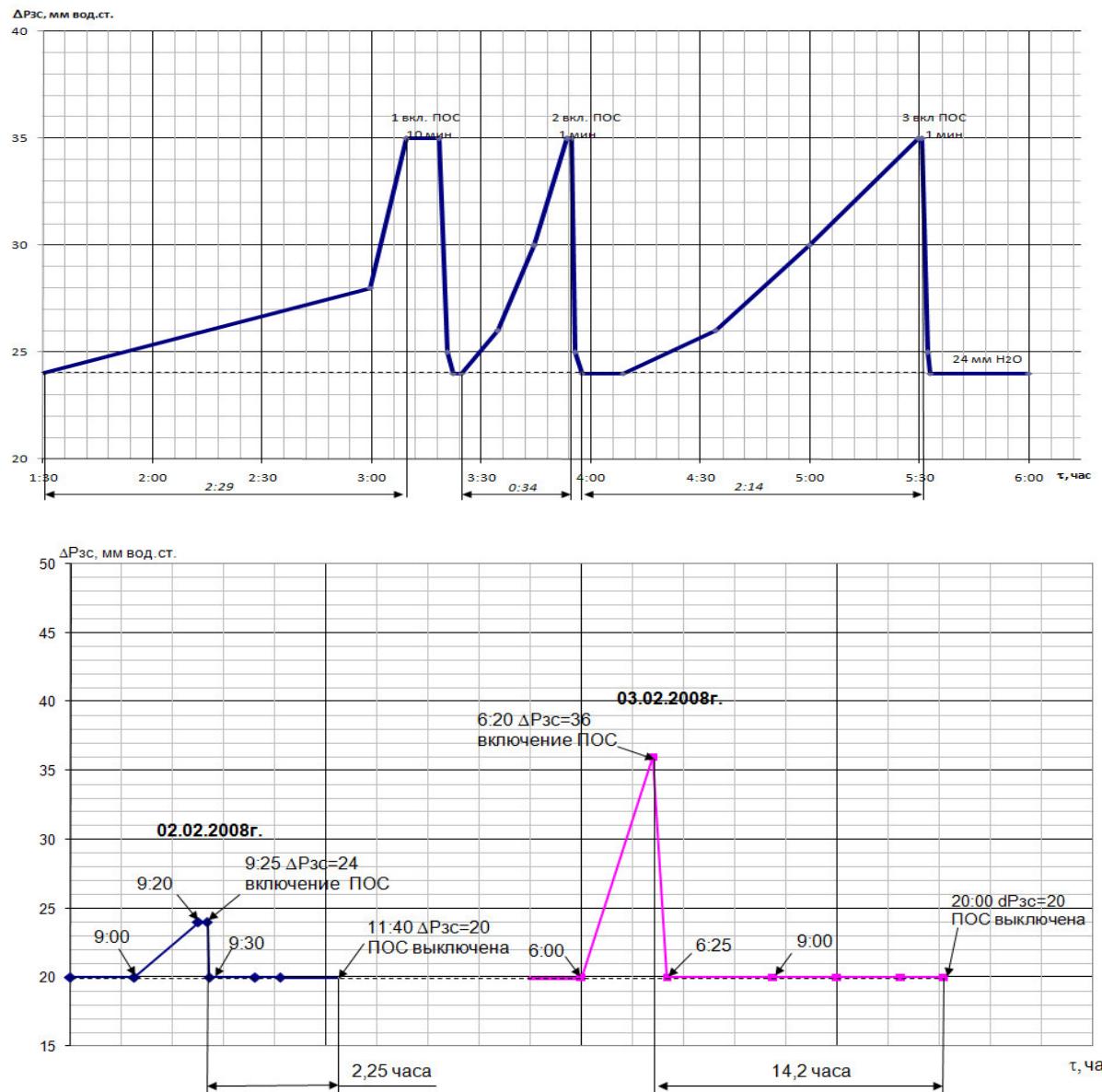


Рисунок 3 - Изменение перепада на защитной сетке в период интенсивного снегопада при включениях ПОС на двух ГТЭ

6.3 На рисунке 3 видны характерные пики роста перепада на защитной сетке в период интенсивного обледенения, и резкое уменьшение их в момент кратковременного включения ПОС. При этом сигнализатор обледенения СО-1В, находившийся в автоматическом режиме работы на обеих ГТУ, сигнал обледенения не сформировал. Опыт эксплуатации ГТЭ с описанным алгоритмом управления ПОС подтвердил эффективность управления системой по перепаду давления на защитной сетке и данный алгоритм был введен в АСУ ТП. Реализация этой системы управления позволила резко сократить долю времени работы ПОС на ГТЭ-10/95, сведя ее до 0,5 % от времени эксплуатации в период отопительного сезона.

6.4 Базируясь на опыте эксплуатации ГТЭ с подтвержденной эффективностью управления ПОС по перепаду на защитной сетке, а также подобия рабочих процессов ПОС и близость расходных характеристик $G_{в\sum пр} = 65$ кг/с у АЛ-31СТ и $G_{в\sum пр} = 55$ кг/с у ГТП-10/953 была выпущена согласованная с ООО «Газпром трансгаз Уфа» программа 29ПМ-05, которая имела цель – проведение исследовательских испытаний системы измерения перепада давления воздуха на ЗС лемнискаты входного устройства АЛ-31СТ в составе ГПА-16Р «Уфа» КС «Полянская».

6.5 Была выпущена документация на систему измерения перепада давления на защитной сетке, выбрано расположение приемников давления и выполнены исследовательские испытания и оценено влияние положение приемника статического давления на уровень перепада давления на защитной сетке и пульсаций давления. На рисунке 4 приведена схема размещения приемников и магистралей на ГПА.

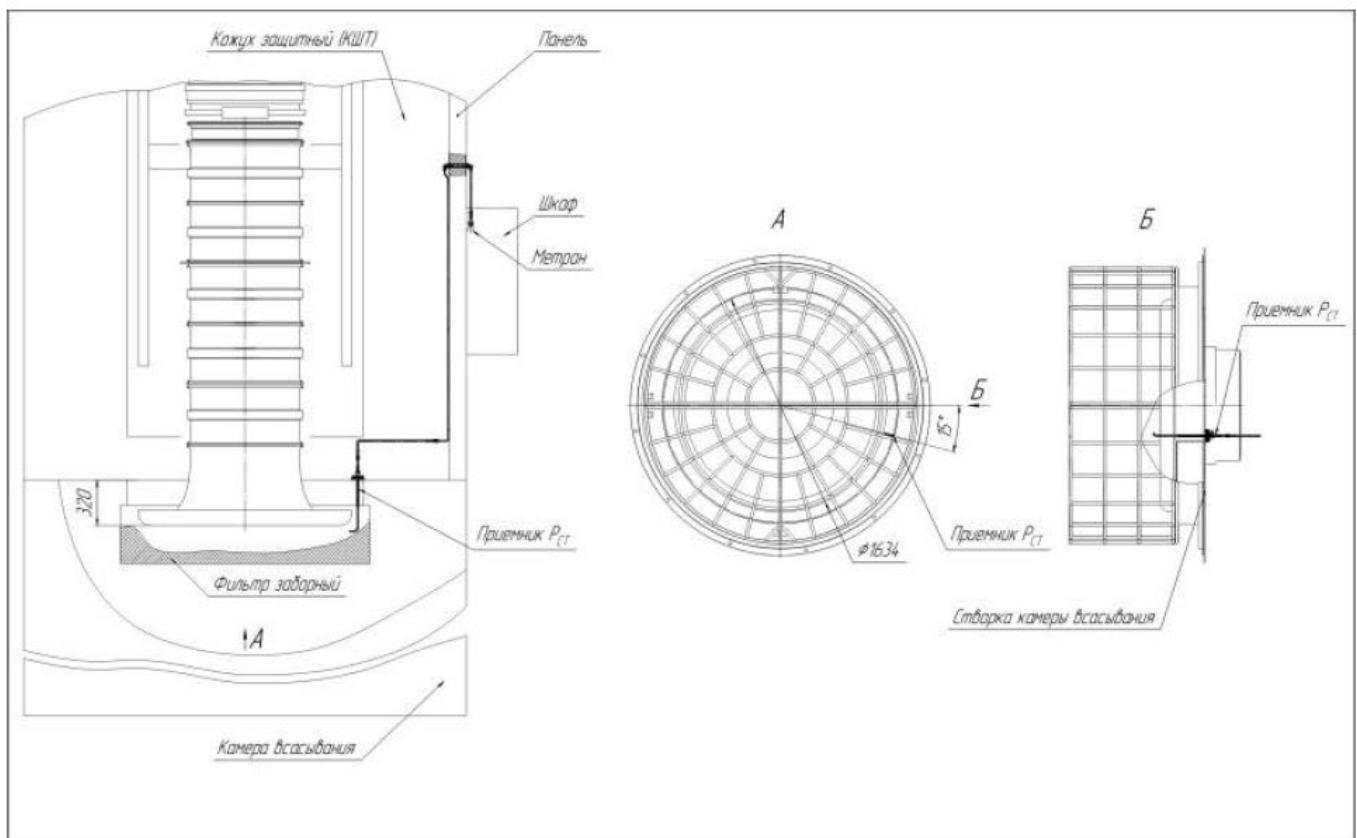


Рисунок 4 – Схема расположения приемника и магистрали измерения давления

На рисунках 5 – 6 изображены система замера перепада на защитной сетке, размещение трубопроводов и защитная сетка.

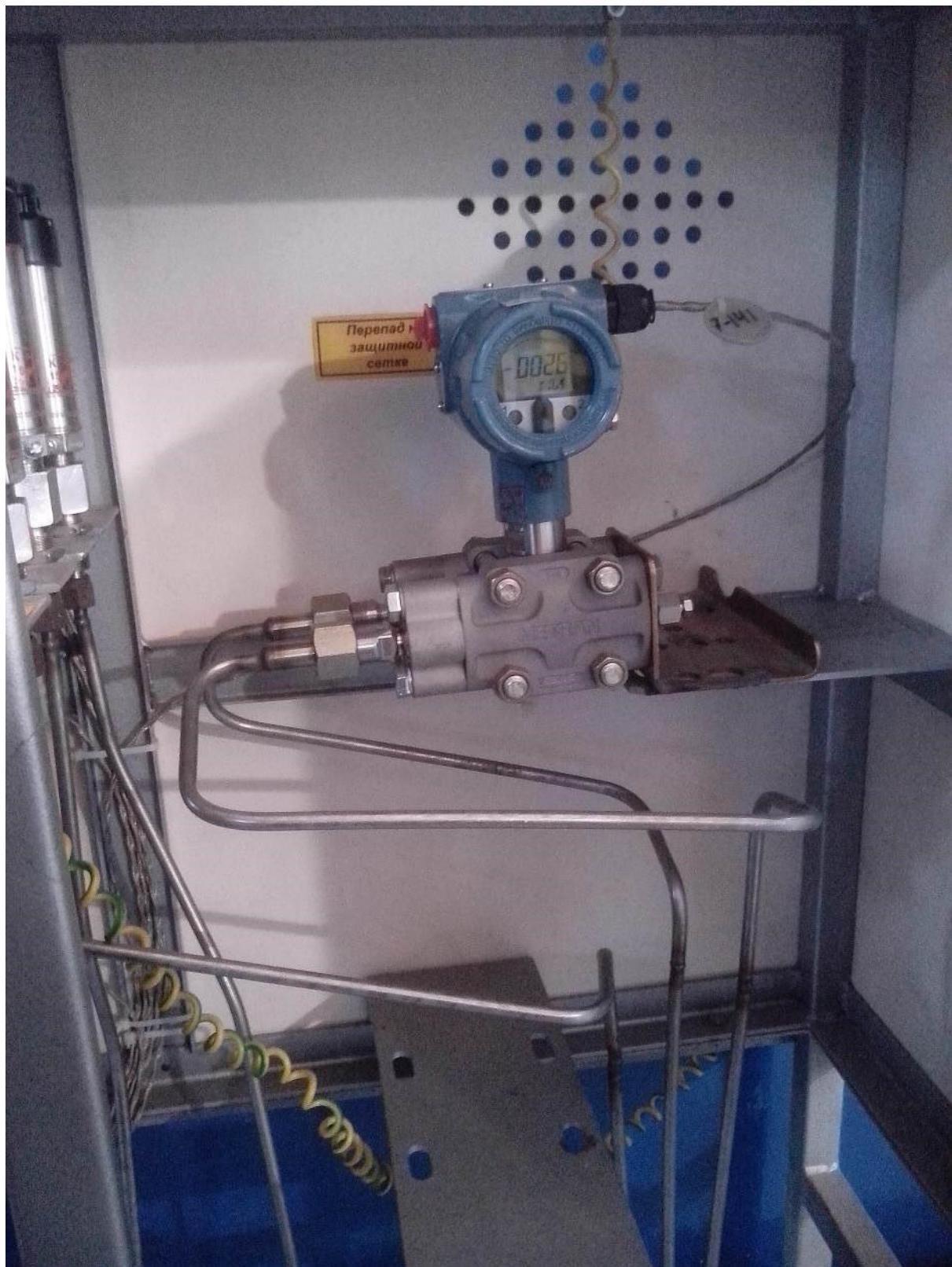


Рисунок 5 – Система замера перепада на защитной сетке



Рисунок 6 – Расположение трубопроводов замера перепада, защитный кожух

На рисунке 7 приведен протокол измерения параметров во время испытаний ГПА на ст. Полянская.

Таблица 1 – Протокол измерения параметров

Приложение 1

Параметр	ЗАПУСК № 1. Начало работы 12ч 08мин – завершение работы 13ч 01мин					
N1,об/мин	7490	8020	8400	8830	Подвари анты	Вариант 1: приёмник Р* на высоте оси ЗС с правой стороны и направлением на ось ЗС
т,час. мин t*вх, °C	12:08 - 12,5	12:15 - 11,5	12:19 - 11,0	12:24 - 10,5		
ΔРэс ср	23	26	28	31	1 – 1	Приёмник Рст – выдвижной
ΔРэс пульс	21-26	22-30	24-32	24-36		Tн* - минус 14°C
ΔРэс ср	23	26	30	36	1 – 2	Приёмник Рст – штатный
ΔРэс пульс	20-26	24-32	26-34	31-40		Tн* - минус 14°C
N1,об/мин	7570	8115	8520	8820		
т,час. мин t*вх, °C	12:39 - 9,7	12:35 - 9,7	12:32 - 9,8	12:28 - 10,2		
N1,об/мин	7570	8150	8550	8850	Вариант 2: приёмник Р* отключен от датчика «Метран». ΔРэс измеряется от атмосферного давления	
т,час. мин	12:42	12:45	12:49	12:51		
ΔРэс ср	100	110	130	137	2 - 2	Приёмник Рст – штатный
ΔРэс пульс	96-102	110-118	125-135	132-142		Tн* - минус 13°C
ΔРэс ср	97	108	125	134	2 - 1	Приёмник Рст – выдвижной
ΔРэс пульс	95-101	107-114	121-127	130-138		Tн* - минус 13°C
N1,об/мин	7550	8100	8500	8820		
т,час. мин	13:01	12:58	12:56	12:54		
ЗАПУСК № 2. Начало работы 14ч 44мин – завершение работы 15ч 05мин						
N1,об/мин	7540	8060	8440	8870	Вариант 3: приёмн. Р* в прав. верхнем углу на H=1,8м, с наклоном вверх под 45° к ЗС	
т,час. мин	14:44	14:47	14:49	14:53		
t*вх, °C	- 9,6	- 9,2	- 9,2	- 8,5		
ΔРэс ср	19	20	24	27	3 - 1	Приёмник Рст – выдвижной
ΔРэс пульс	17 - 21	20 - 24	21 - 26	26 - 32		Tн* - минус 9°C
ΔРэс ср	23	25	30	35	3 - 2	Приёмник Рст – штатный
ΔРэс пульс	18 - 27	19 - 31	24 - 36	22 - 42		Tн* - минус 10°C
N1,об/мин	7580	8010	8530	8850		
т,час. мин	15:05	15:03	15:01	14:58		
t*вх, °C	- 7,2	- 7,0	- 7,2	- 7,6		
«МГ»: N1 =3360 об/мин, т=15ч 09мин, Твх*= - 7°C, ΔРэс ср =2мм.H ₂ O. ΔРэс пульс = ±1мм.H ₂ O.						

Камера всасывания

Схема расположения стойки
с приёмником полного давления Р*
варианта 3 (вид сверху)

Рисунок 7 – Протокол измерения параметров

На рисунке 8, 9 приведены тренды перепада на защитной сетке и пульсаций давления на различных режимах и различных положениях приемников.

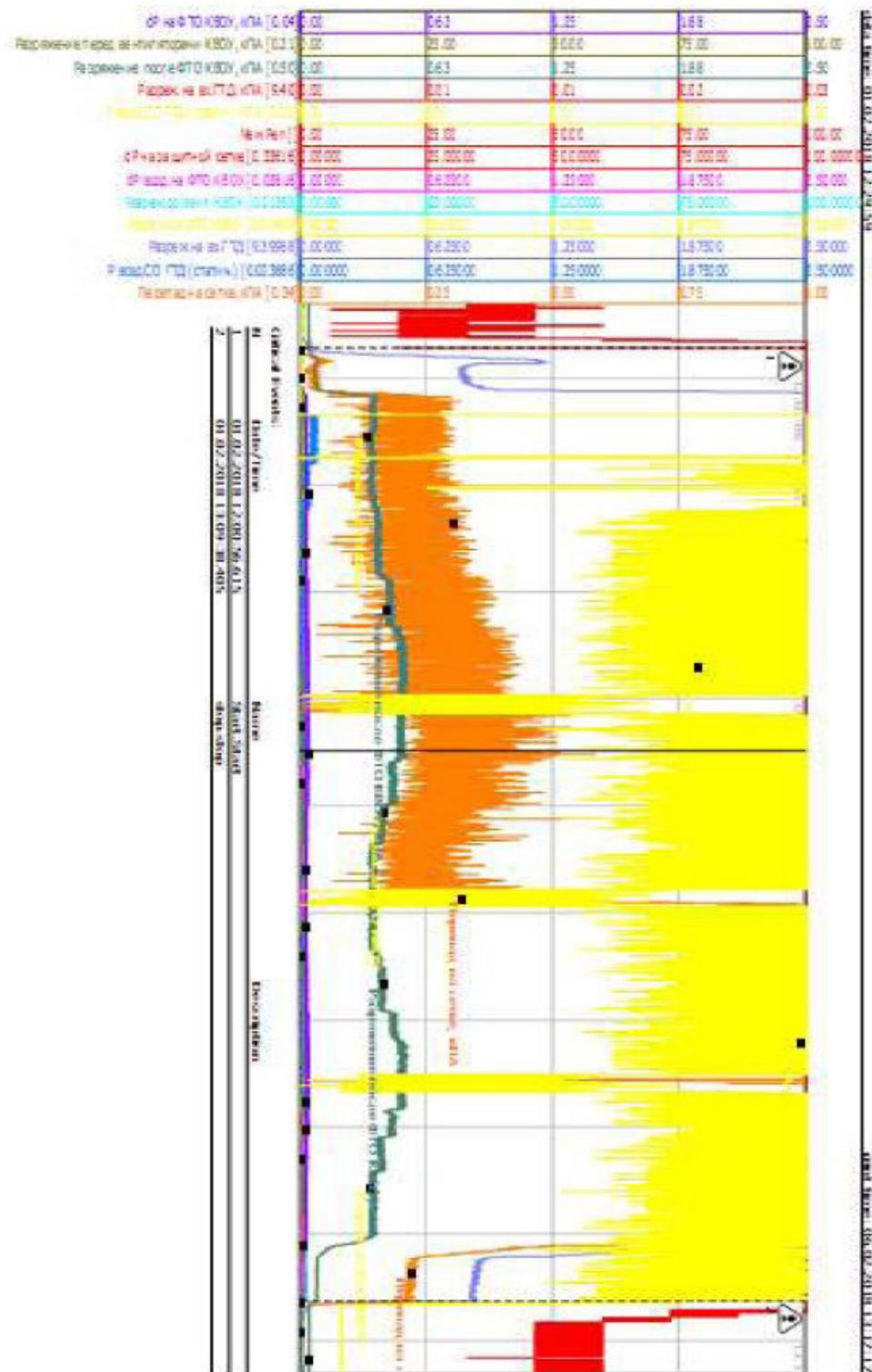


Рисунок 8 – Тренд перепада давления на защитной сетке и пульсаций на четырех режимах работы

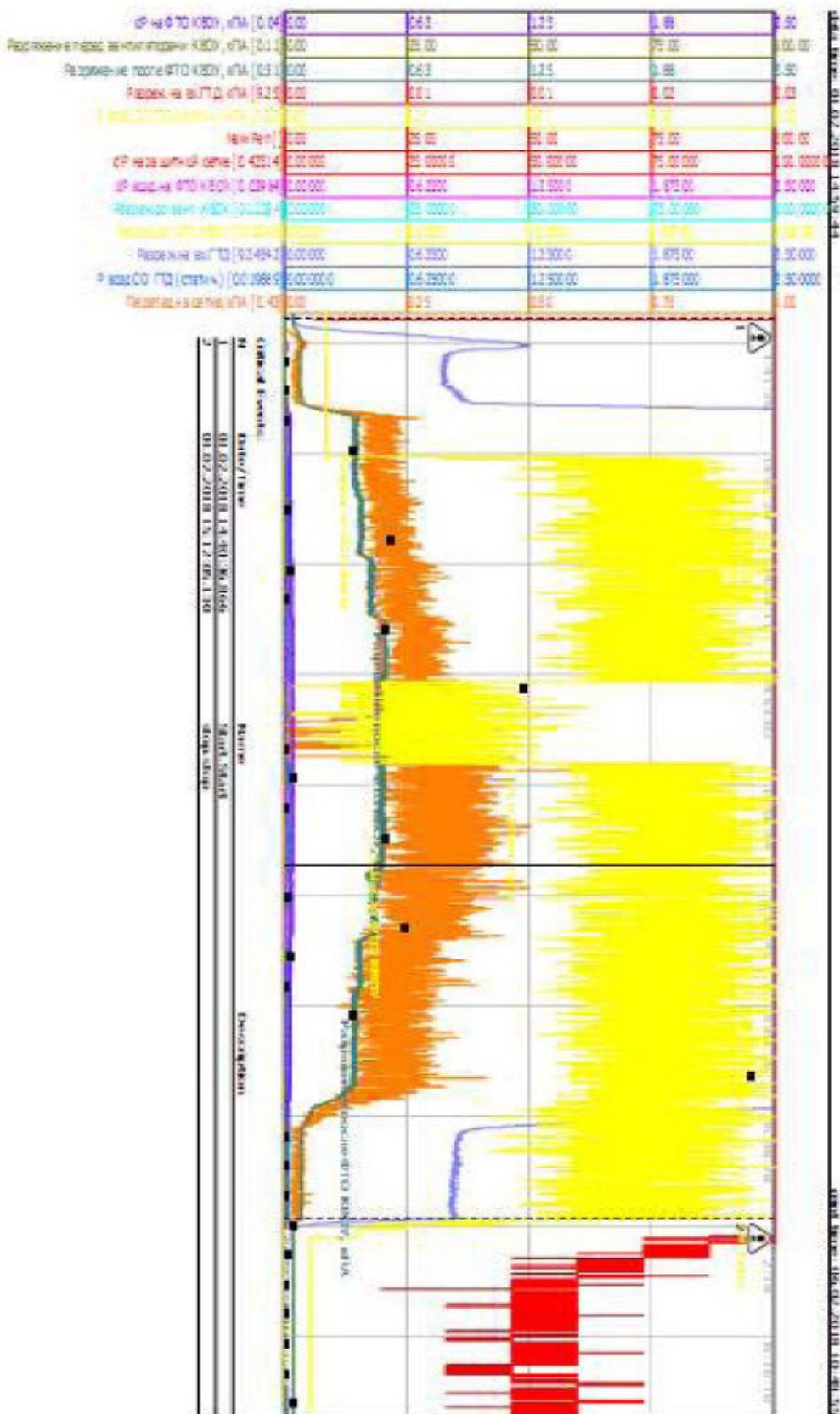


Рисунок 9 – Тренд перепада давления на защитной сетке и пульсаций на четырех режимах работы и различными положениями приемников давления

6.6 Были получены оптимальные сочетания мест установки приемников полного и статического давления. Оптимальное сочетание мест установки позволило значительно уменьшить частоту пульсаций давления, тем самым получить зависимость перепада на защитной сетке на входе в двигатель от частоты вращения РНД. Величина пульсаций не превышала 2 мм вод. ст. По итогам успешных испытаний на ГПА ст. Полянская принято решение провести испытания на АЛ-31СТ на стенде КПИ м-н Шакша г. Уфа. На данный момент выпущена документация на изготовление и монтаж системы. Готовится документация на проведение испытаний.

6.7 После проведения анализа было установлено, что время работы ПОС по данному алгоритму было снижено более чем на 98 % как и суммарного расхода топлива (рисунок 8, 9).

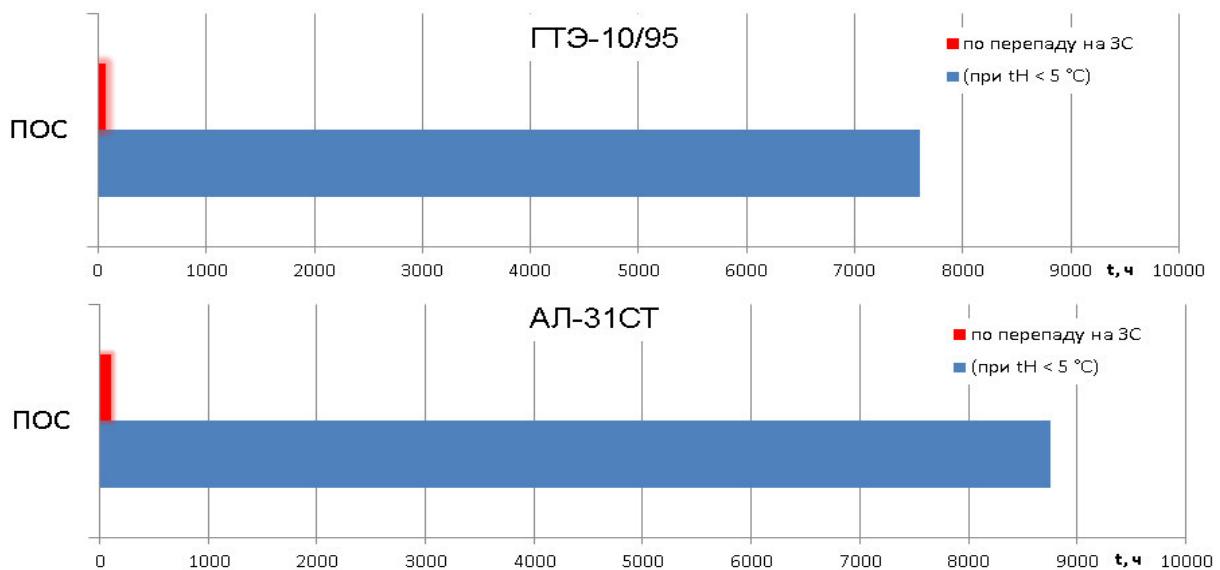


Рисунок 8 – Время работы ГПА и ГТЭ с ПОС при использовании различных алгоритмов

Режимы работы ПОС	Классический (ПОС вкл. При $t_H < 5^{\circ}\text{C}$)	По перепаду на ЗС
$t, \text{ч}$	4680	25
$\Sigma G_t, \text{т}$	16 082	86

Рисунок 9 – Сравнение затраченного топливного газа на работу ПОС при классическом алгоритме и перепаде на защитной сетке

6.8 После всех выполненных исследовательских и эксплуатационных работ были получены два патента № 2705023, 2702324 как способы эксплуатации ГТД с защитной сеткой на входе и противообледенительной системой (рисунок 10, 11).



Рисунок 10 – Патент № 2702324 на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

на изобретение

№ 2705023

Способ эксплуатации газотурбинного двигателя

Патентообладатель: *Публичное акционерное общество "ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение" (RU)*

Авторы: *Рахматуллин Валерий Ренатович (RU),
Гребенюк Геннадий Петрович (RU)*

Заявка № 2018125378

Приоритет изобретения 10 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 01 ноября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 10 июля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иевлев

Рисунок 11 – Патент № 2705023 на изобретение

7. Заключение

7.1 Управление ПОС с помощью изменения перепада на защитной сетке реализован на ГТЭ и подтвердил свою эффективность в эксплуатации, что позволило снизить время работы ПОС более чем на 90 %;

7.2 Увеличение эффективного КПД ГТД на 0,4 %;

7.3 Подтверждена испытаниями функциональная зависимость перепада на защитной сетке от частоты вращения РНД для ГПА, что позволяет также использовать перепад давления на защитной сетке в качестве критерия обледенения;

7.4 Готовятся испытания, аналогичные испытаниям на ст. Полянской, на стенде КПИ м-н Шакша г. Уфа на АЛ-31СТ с целью апробирования схемы измерения перепада на защитной сетке. Выпущена документация на изготовление и монтаж системы. Готовиться документация на проведение испытаний;

7.5 Получены два патента № 2705023 и 2702324 на способ эксплуатации ГТД с защитной сеткой и ПОС.

Сведения о соискателе

Гребенюк Геннадий Петрович	Кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор отдела «Перспективные разработки» ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» Тел. (347)239-21-54
Рахматуллин Валерий Ренатович	Начальник сектора отдела «Перспективные разработки» ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» Тел. (347)239-21-54