

УДК 536.5.087.92

И.Т. ГУБАЙДУЛЛИН, Т.П. АНДРЕЕВА, А.С. СКЛАДЧИКОВ

ОАО Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Россия

ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Представлены основные результаты работ по созданию многоканальной оптической пирометрической системы для контроля рабочих лопаток турбины высокого давления. Оптическая пирометрическая система ОПС-2010 установлена на газогенераторе двигателя ПД-14 и обеспечивает одновременное, непрерывное термометрирование всех рабочих лопаток 1 и 2 ступени турбины высокого давления в процессе стендовых испытаний. Интеграция оптической пирометрической системы ОПС-2010 со стендовой автоматизированной системой испытаний снижает затраты на препарирование турбины и на обработку результатов измерений. Обмен цифровыми данными по локальной вычислительной сети посредством технологии OPC-сервера обеспечивает однозначную временную «привязку» пирометрических данных к основным режимным параметрам газогенератора. Для эксплуатации газотурбинных двигателей по техническому состоянию предлагается применение нового технического средства - интеллектуального пирометрического модуля, интегрированного с бортовыми системами управления, контроля и диагностики по информационным каналам.

Ключевые слова: преобразователь, пирометрический, оптический, турбина, рабочие лопатки, термометрирование, диагностика, наработка.

Введение

Зарубежный и отечественный опыт показывает, что более половины мирового парка газотурбинных двигателей (ГТД), газотурбинных установок (ГТУ), выводятся из эксплуатации из-за дефектов горячей части. Учитывая значительный «удельный вес» стоимости турбины в общей стоимости газогенератора (ГГ), с целью обеспечения сроков службы, ресурсов, производители и эксплуатанты вынуждены проводить плановые регламентные работы для поддержания приемлемого технического состояния авиационной техники. Очередные плановые или внеочередные регламентные работы обуславливают периодический временный вывод ГТД, ГТУ из эксплуатации. Вынужденный технологический простой дорогостоящего технического объекта (пассажирский, транспортный самолет, энергетическая установка, и др.) приводит значительным экономическим издержкам и ухудшает коммерческую эффективность эксплуатации ГТД, ГТУ [1].

Одним из наиболее нагруженных компонентов горячей части ГГ являются лопатки рабочего колеса первой ступени турбины высокого давления (ТВД). Объективная и своевременная оценка температуры рабочих лопаток (РЛ) ТВД является одной из приоритетных задач контроля и диагностики. Единственным и безальтернативным средством получения достоверной измерительной информации о текущей

мгновенной температуре РЛ являются бесконтактные средства оптической пирометрии (СОП). Именно уникальные возможности СОП обуславливают неиссякаемый интерес специалистов двигателестроительных фирм в России и за рубежом [2,3,4].

На решения задачи создания эффективных, малозатратных в эксплуатации СОП направлены усилия зарубежных и отечественных исследователей, специалистов ряда фирм, научно-исследовательских институтов, исследовательских центров [5,6,7].

Зарубежными разработчиками и производителями авиационных СОП в разные годы являлись фирмы США, Великобритании, Франции: International Harvester Company, Kollsman Instrument Corporation, Land Pyrometers Ltd., Land Turbine Sensors Inc., Land Infrared Ltd., Smiths Industries Ltd., Negretty and Zambra (Aviation) Ltd., Vanzetti Infrared and Computer Systems Inc., Rosemount Aerospace Inc., Rolls-Royce Ltd., General Electric Company, Pratt Whitney Aircraft, United Technologies Corporation, NASA Levis Research Centre.

В последние годы на рынке производителей СОП для авиационных и стационарных двигателей активно продвигается продукция фирм: Auxitrol S.A. (Франция), BF Goodrich Aerospace, Land Instruments International (транснациональная корпорация Великобритания, США, Италия, Франция), Rotadate Ltd. (Великобритания) [8].

В отечественной промышленности разработкой авиационных СОП занимались ВНЦ ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва [9], ряд моторостроительных предприятий, ОАО УНПП «Молния» (ФГУП УНПП «Молния») г. Уфа [10 - 13].

1. Основные характеристики многоканальной оптической пирометрической системы

С целью сокращения затрат на препарирование РЛ ТВД, облегчения расшифровки и интерпретации результатов термометрирования разработана и применяется новая современная оптическая пирометрическая аппаратура, представляющая собой многоканальную автоматизированную компьютеризованную систему измерения.

ОПС обеспечивает измерение температуры в

диапазоне 700-1150 °С и не требует дополнительного препарирования термопарами РЛ ТВД.

Выдача сигналов в стендовую автоматизированную систему управления и сбора данных более высокого уровня (АСУ ТП «Парус-9М») осуществляется через ОПС-сервер АСУ с частотой обновления данных 100Гц.

Схема установки экспериментального образца ОПС на ГТ представлена на рис. 1 и включает в себя: термостойкие вибропрочные оптические зонды, визирующие рабочие лопатки 1 и 2 ступеней ТВД, оптические пирометрические преобразователи, мультиплексный интерфейсный блок, компьютер промышленного применения со специализированным программным обеспечением (СПО) для обработки цифровых сигналов и передачи потребителям верхнего уровня через сетевой интерфейс Ethernet и бортовой интерфейс ARINC 429.

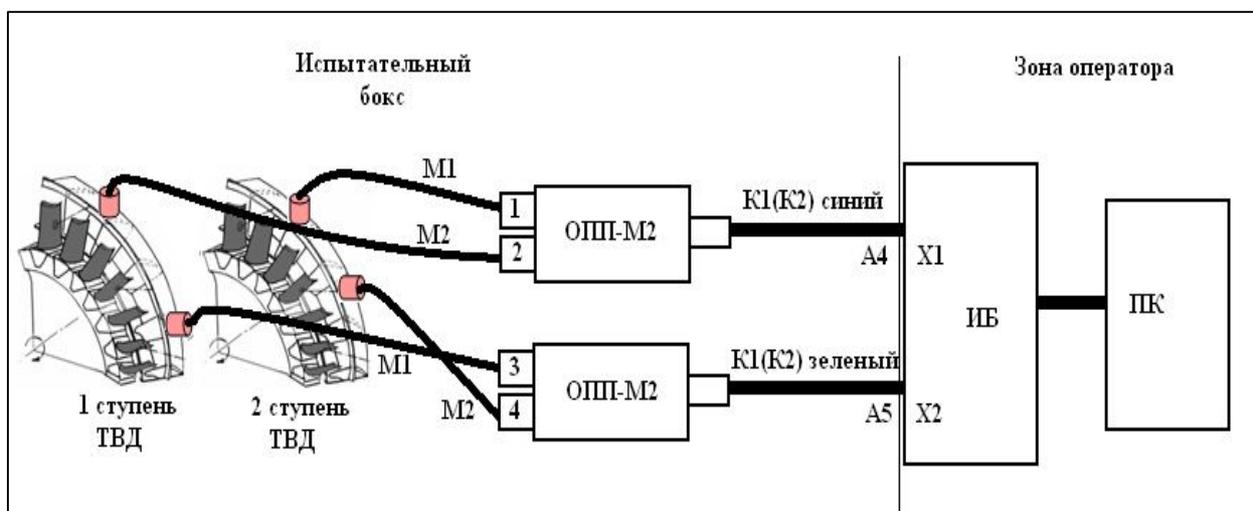


Рис. 1. Схема установки многоканальной оптико-электронной пирометрической системы на стенд для испытаний газогенератора:

М1, М2 – гибкие волоконные световоды оптических зондов;

ОПП-М2 – оптический пирометрический преобразователь;

К1 (К2), К1 (К2) – кабели соединительные для аналоговых сигналов;

ИБ – интерфейсный блок для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму;

ПК – портативный компьютер со специализированным программным обеспечением

Система осуществляет:

– прием и аналого-цифровое преобразование, последующую обработку широкополосных зашумленных сигналов в реальном масштабе времени;

– передачу в реальном масштабе времени электрических сигналов штатным потребителям по стандартному сетевому интерфейсу Ethernet;

– визуализацию, документирование (архивирование) принятых электрических сигналов в виде файлов, накопление и хранение данных на энергонезависимой памяти вычислителя.

– Обработка сигналов позволяет формировать помехоустойчивые оценки соответствующие:

– средней температуре поверхности всех РЛ;
– средней пиковой температуре всех РЛ (средней

– по входным или выходным кромкам в зависимости от направления визирующего объектива);

– пиковой температуре одной заданной РЛ;

– частоте вращения ротора.

Система ОПС-2010 установлена на газогенераторе 100ГГ-01(020) двигателя ПД-14 и обеспечивает непрерывный мониторинг температурного режима РЛ 1 и 2 ступени ТВД в процессе стендовых испытаний.

2. Результаты испытаний системы ОПС на газогенераторе двигателя ПД-14

Вычисляемые температуры лопаток и показания термопар фиксируются системой сбора данных верхнего уровня АСУ ТП «ПАРУС –9М» и представляются в сводной периодической распечатке регистрируемых параметров, включая основные режимные параметры ГТ.

На рис. 2 представлен скриншот основного окна графического интерфейса пользователя, отобра-

жающего сигналы, получаемые от двух оптических зондов на режиме, близком к режиму «малого газа».

В верхней части окна отображен текущий («мгновенный») частотный спектр широкополосного сигнала пирометрического преобразователя, сформированный с помощью вычислительной процедуры – быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В средней и нижней части окна отображаются эпюры температуры всех РЛ в виде замкнутых круговых и разомкнутых линейных осциллограмм.

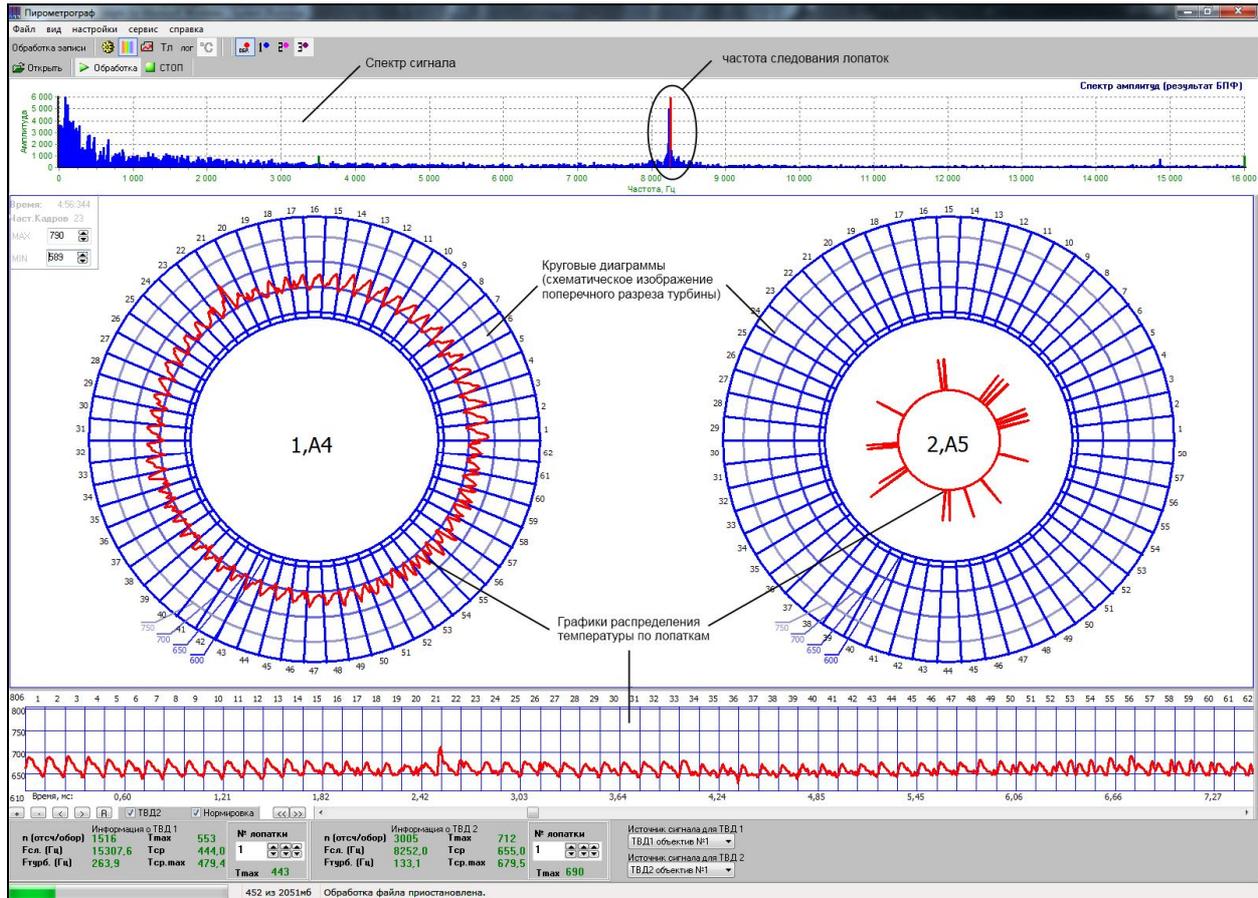


Рис. 2. Скриншот экрана компьютера с основным окном графического интерфейса пользователя на режиме «малый газ»

3. Перспективы применения оптических пирометрических систем для диагностики двигателя

Стратегия развития авиационных ГТД предусматривает обеспечении системной безопасности силовой установки летательного аппарата (ЛА) и эксплуатацию ГТД по фактическому техническому состоянию. Реализация стратегии предполагают «интеллектуализацию» всех подсистем ГТД и информационную интеграцию с бортовой системой управления, контроля и диагностики двигателя типа FADEC.

Основной методологической проблемой диагностирования состояния лопаток по данным прямого измерения остается адекватная интерпретация результатов измерения и прогнозирование будущих состояний ТВД.

Для диагностики температурного состояния РЛ ТВД предлагается применять интеллектуальный пирометрический модуль (ИПМ), который интегрируется по каналам информационного обмена (КИО) с бортовыми системами управления, контроля и диагностики.

Наиболее целесообразным представляется реализация ИПМ на основе использования данных

прямого измерения пирометрическим каналом и расчетных данных поля температур полученной от встроенной быстросчетной математической модели теплонапряженного состояния лопаток турбины. Такой модуль может быть выполнен в виде унифицированной конструкции (модуля) для различных типов двигателей [14, 15]. В состав ИПМ, представленной на рис. 3 входят:

- многоканальный оптико-электронный преобразователь температуры поверхности рабочих лопаток турбины;
- электронный блок с модулями преобразователей сигналов и вычислителя (встроенного процессора) со специальным прикладным обеспечением.

Следует особо отметить, что прямое измерение посредством оптического пирометрического преобразователя позволяет определить фактическое температурное состояние любой лопатки [7,16].

Это позволяет:

- устанавливать ограничения на предельно допустимые температуры как металла РЛ, так температуры термозащитного покрытия (ТЗП) РЛ, задать технически и экономический обоснованный запас по температуре газа перед турбиной и контролировать изменение текущего запаса по отношению к параметрам Redline;

- учитывать термоциклическую повреждаемость рабочих лопаток (в том числе ТЗП), обусловленную динамикой пространственных градиентов температурных полей РЛ;

- учитывать деформации (вытяжки) РЛ, влияющие на величину радиального зазора ТВД;

- оптимизировать расход охлаждающего воздуха, отбираемого на охлаждение ТВД на крейсерском режиме, с учетом изменения критериальных параметров газового потока (изменение числа Re);

- осуществлять комплементарное комплексирование информации от ОПС с информацией от иных штатных бортовых измерителей (термопар, датчиков частоты вращения, температуры газа, давлений), режимных параметров двигателя для взаимосвязанного (перекрестного) контроля работоспособности отдельных подсистем.

По данным прямым измерений и вычисляемым данным осуществляется:

- идентификация и коррекция коэффициента передачи измерительного тракта;

- контроль теплонапряженного состояния каждой РЛ;

- расчет расхода и остатка ресурса РЛ, ТВД с учетом режимов работы ГГ, включая учет малоцикловой усталости материала РЛ [17, 18].

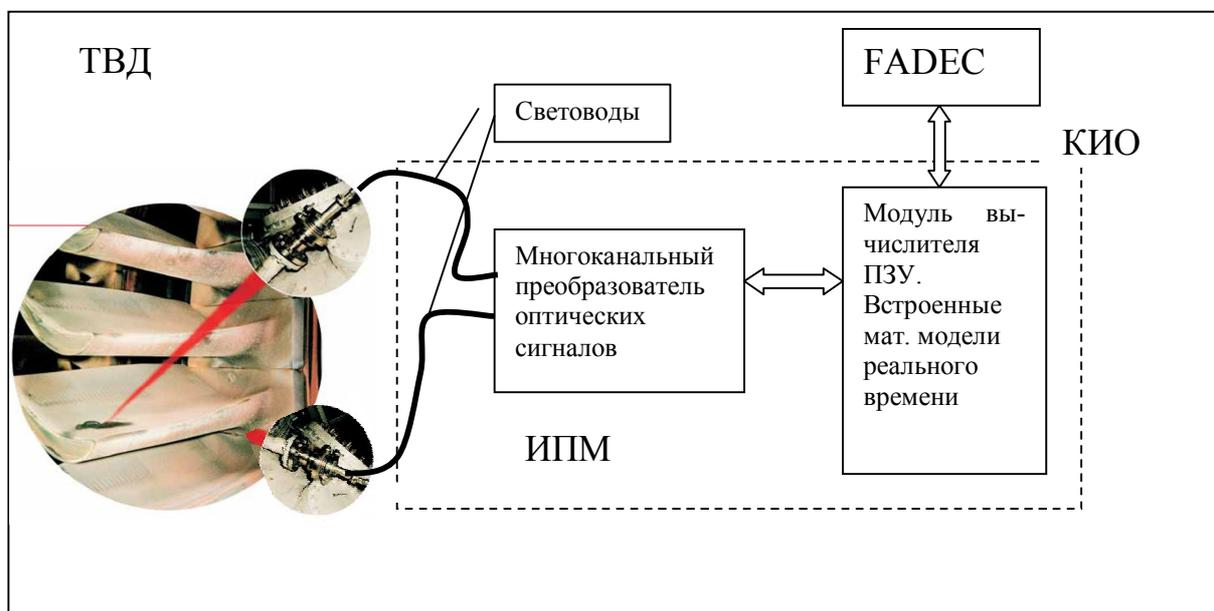


Рис. 3. Структура интеллектуального пирометрического модуля

Параметры выходного сигнала ОПП содержат информацию, часть которой приходится на очень малые составляющие (слабые почти шумовые компоненты) и могут присутствовать в латентном виде. Тем не менее, подобные слабые компоненты являются специфичными индикаторами для выявления неисправностей на ранних стадиях (дефектов РЛ,

неустойчивой работы камеры сгорания, компрессора) и заслуживают тщательного анализ и детектирования [15].

Основным недостатком авиационных СОП, сдерживающим их широкое применение, является временной дрейф (постепенный медленный уход) коэффициента передачи измерительного канала из –

за загрязнения наружной поверхности линзы объектива, износа оптических компонентов [19]. Это негативное свойство, присущее предыдущему поколению оптико-электронной аппаратуры, на современном этапе может быть скомпенсированы комплексом мероприятий, включающим конструкторско-технологические, алгоритмические решения, направленные на интеллектуализацию аппаратуры. Одним из перспективных вариантов решения является сочетание аппаратурных средств, встроенных математически моделей реального времени и периодическая коррекция выявленных дрейфов.

Интеграции авиационных СОП в состав штатных бортовых систем контроля, диагностики ГТД позволяет привлечь дополнительные информационные ресурсы для парирования дрейфа коэффициента передачи ОПС.

На рис. 4 представлен фрагмент реализации выходного сигнала ОПС на интервале времени равном одному обороту ротора турбины с указанием абсолютных значений температур.

Из данных на рис. 4. следует, что абсолютные значения температур изменяются от 733°C (отметка «X») до 797°C (отметка «Г»). Разность абсолютных значений температур (64 °C) показывает текущую величину мгновенного градиента температурного поля на данном режиме работы ГТ по траектории сканирования пятна визирования объектива.

Изменения этой разности во времени можно использовать для оценки термоциклической нагрузки на РЛ, для выявления изменений в радиальном направлении эпюры температурного поля на выходе из камеры сгорания.

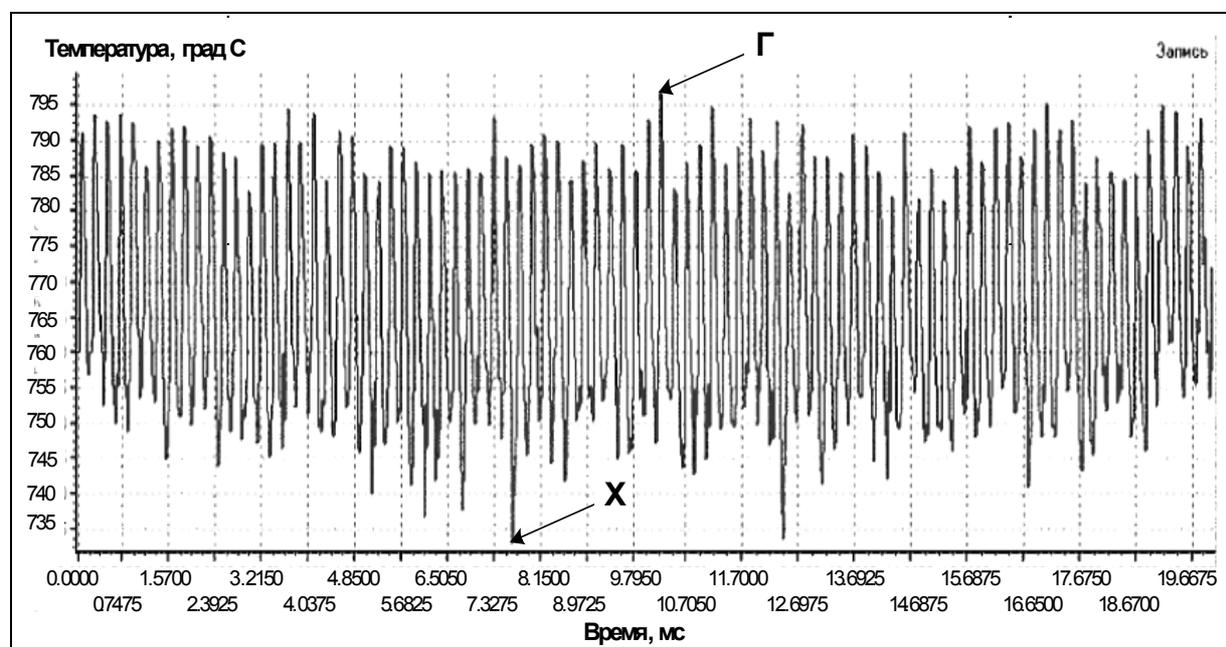


Рис. 4. Фрагмент реализации выходного сигнала на интервале времени равном одному обороту ротора турбины

Заключение

1. Оптико-пирометрическая система ОПС-2010 обеспечивает непрерывный мониторинг температуры рабочих лопаток первой и второй ступеней турбины высокого давления в процессе стендовых испытаний. Технические характеристики разработанной системы позволяют применять ее на различных ГТД, ГТУ для решения аналогичных задач.

2. Для реализации стратегии эксплуатации авиационных ГТД по техническому состоянию необходима разработка методик и алгоритмов адекватного учета наработки наиболее напряженных компонентов – РЛ ТВД.

3. Для преодоления барьеров, стоящих на пути применения СОП в качестве штатных бортовых устройств, требуется значительная наработка в составе различных типов ГТД, ГТУ и осознание специалистами уникальных возможностей оптико-электронных пирометрических систем.

Литература

1. Иноземцев, А.А. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник [Текст] / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 5. – 187 с.

2. Использование пирометра для контроля температурного состояния рабочих лопаток турбины двигателя НК-8 [Текст] / А.Н. Ведин, А.А. Ковалев, А.А. Корноухов, Г.С. Перевозкин, В.В. Тетерин // *Авиационная промышленность*. – 1978. – № 2. – С. 33.
3. Расчетное и экспериментальное исследование температурного состояния рабочей лопатки турбины [Текст] / К.М. Исаков, А.А. Пантелеев, В.А. Трушин и др. // *Изв. вузов. Авиационная техника*. – 1976. – № 1. – С. 141–146.
4. Перспективы развития систем регулирования температурного режима ГТД [Текст] / И.Т. Губайдуллин, В.В. Дунаев, М.Т. Валеев // *Авиационная промышленность*. – 1978. – № 1. – С. 28–29.
5. *New instrumentation for advanced turbine research* [Text] / S. Walters // *Mechanical Engineering*. – 1983. – 105, № 2. – P. 43–51.
6. *Lenagh, T. Turbine Blade Pyrometer Retrofit Design* [Text] / T. Lenagh, D. Myhre, J. Scholz // *AIAA paper 2000–3135*. – 11 p.
7. Августиневич, В.Г. Результаты исследований пирометрического канала управления температуры лопаток ГТД [Текст] / В.Г. Августиневич, А.Н. Саженок // *Сборник трудов ЦИАМ N1260*. – М., 1989. – С. 593–599.
8. Измерение температуры быстроходных вращающихся турбинных лопаток с использованием пирометра [Текст] / Т. Танигучи, К. Санбонсуги, Й. Озаки, А. Норимото // *ASME paper GT2006-90247*. – 10 p.
9. Многоканальный оптический пирометр и его апробация при стендовых испытаниях газогенераторов [Текст] / В.В. Бородако, П.А. Бухитаб, Б.И. Минеев, В.Б. Романов, В.Б. Сахаров // *Мир измерений*. – 2012. – № 4. – С. 54–57.
10. Саженок, А.Н. Опыт внедрения и доводки оптико-электронной аппаратуры для измерения температуры лопаток турбины ГТД [Текст] / А.Н. Саженок, В.А. Шипигушев, И.Т. Губайдуллин // *Сборник трудов ЦИАМ*. – N 1260. – М., 1989. – С. 647–652.
11. Изучение помпажа ГТД с помощью оптического пирометра [Текст] / В.Н. Еремин, М.Т. Валеев, И.Т. Губайдуллин, В.В. Дунаев, О.К. Полев // *Авиационная промышленность*. – 1982. – № 3. – С. 19–20.
12. Опыт применения пирометрических систем для контроля температуры рабочих лопаток турбины ГТД [Текст] / Т.П. Андреева, И.Т. Губайдуллин // *III МНТК Авиадвигатели 21 века*. – ЦИАМ, 2010. – С. 773–776.
13. Губайдуллин, И.Т. Состояние разработки, серийного производства и результаты применения оптико-электронных систем контроля температуры рабочих лопаток турбины авиационных ГТД [Текст] / И.Т. Губайдуллин, Т.П. Андреева, В.А. Шипигушев // *Материалы докладов МНТК Проблемы и перспективы развития двигателестроения*. – Самара, 2009. – С. 189–191.
14. Интеллектуальная аппаратура со встроенной математической моделью реального времени для решения задач контроля и диагностики [Текст] / Е.В. Распопов, Г.Г. Куликов, В.А. Трушин, В.С. Фатиков, Т.П. Андреева, И.Т. Губайдуллин // *III МНТК Авиадвигатели 21 века*. – ЦИАМ, 2010. – С. 1589–1593.
15. Информационная технология интеграции интеллектуального пирометрического модуля в систему управления, контроля и диагностики (FADEC) ГТД [Текст] // Е.В. Распопов, Г.Г. Куликов, В.А. Трушин, В.С. Фатиков, Т.П. Андреева, И.Т. Губайдуллин // *Вестник УГАТУ*. – 2010. – Т. 14, № 3 (38). – С. 101–110.
16. Методика проведения испытаний средств оптической пирометрии ГТД с применение обработки данных на ЭВМ [Текст] / В.В. Дунаев, А.Г. Шатохин, Е.В. Рачкова, М.Ш. Валиуллина, И.Т. Губайдуллин, М.Т. Валеев // *Сборник трудов ЦИАМ*. – № 1154. – М., 1985. – С. 195–212.
17. *Smiths Indastripuz Thinking Engine Health? – Think Smiths Industries* [Text] // *Interavia*. – 1980. – № 8. – P. 429.
18. Пат. 6786635 В2, США. МПК 7, G01n 17/00 Turbine Blade (Bucket) Health Monitoring And Prognosis Using Neural Network Based Diagnostic Techniques In Conjunction With Pyrometer Signals./ Sukhwan Choi; заявитель и патентообладатель General Electric Company; заявлено 06.11.2002; опубли. 07.09.2004.
19. Метрологические аспекты загрязнения объектива оптического пирометрического преобразователя в процессе ресурсной наработки в эксплуатации [Текст] / И.Т. Губайдуллин, В.А. Шипигушев // *Материалы НТК «ДДТ – 2003»*. – Пенза, 2003. – С. 54–57.

Поступила в редакцию 2.06.2012

Рецензент: доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой Р.З. Бахтизин, Башкирский государственный университет, Уфа, Россия.

**ОПТИЧНА ПІРОМЕТРИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ
ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЛОПАТОК ТУРБІНИ ГАЗОГЕНЕРАТОРА
ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА І ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**

I.T. Губайдуллин, Т.П. Андреева, А.С. Складчиков

Представлені основні результати робіт із створення багатоканальної оптичної пірометричної системи для контролю робочих лопаток турбіни високого тиску. Оптична пірометрична система ОПС-2010 встановлена на газогенераторі двигуна ПД-14 і забезпечує одночасне, безперервне термометрування всіх робочих лопаток 1 і 2 ступені турбіни високого тиску в процесі стендових випробувань. Інтеграція оптичної пірометричної системи ОПС-2010 із стендовою автоматизованою системою випробувань знижує витрати на підготовку турбіни і на обробку результатів вимірювань. Обмін цифровими даними по локальній обчислювальній мережі за допомогою технології OPC-сервера забезпечує однозначну тимчасову «прив'язку» пірометричних даних до основних режимних параметрів газогенератора. Для експлуатації газотурбінних двигунів по технічному стану пропонується застосування нового технічного засобу -- інтелектуального пірометричного модуля, інтегрованого з бортовими системами управління, контролю і діагностики по інформаційних каналах.

Ключові слова: перетворювач, пірометричний, оптичний, турбіна, робочі лопатки, термометрування, діагностика, напрацювання.

**THE OPTICAL PYROMETRIC SYSTEM FOR MEASURING THE SURFACE TEMPERATURE
OF THE TURBINE BLADES OF GAS TURBINE ENGINE GAS GENERATOR
AND DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION**

I.T. Gubaidullin, T.P. Andreeva, A.S. Skladchikov

Here are presented some results of the creation of optical pyrometric system OPS-2010 to control the most heat-stressed parts of the gas turbine engine (GTE) - rotor blades (RL), high-pressure turbine. OPS provides a measurement of temperature in the range 700-1150 °C. OPS-2010 System is installed on gas generator 10GG-01 (020) PD-14 engine and provides continuous monitoring of temperature turbine blades of 1 and 2 level high-pressure turbine in the test bench. Data provided by OPS-2010 system is very similar to the thermocouples measurement, and the calculated values at the stable turbine working mode. To implement the strategy for the operation and maintenance of the system to ensure safety of aircraft GTE proposed the use of intellectual pyrometric module that is integrated with the management of the system FADEC and to information channels diagnostic system, allowing to carry out monitoring of turbine blades and the calculation of residual life of each rotor blade.

Key words: converter, pyrometer, optical, board, intellectual pyrometric module, signal processing, diagnostics.

Губайдуллин Ирек Тимерьянович – ведущий инженер-конструктор, ОАО УНПП «Молния», Уфа, Россия, e-mail: molniya@molniya-ufa.ru.

Андреева Татьяна Петровна – канд. техн. наук, начальник сектора, ОАО УНПП «Молния», Уфа, Россия, e-mail: t-andr@yandex.ru.

Складчиков Андрей Сергеевич – инженер - конструктор, ОАО УНПП «Молния», Уфа, Россия, e-mail: molniya@molniya-ufa.ru.