

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОБЪЕКТИВА ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ РЕСУРСНОЙ НАРАБОТКИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

И.Т. Губайдуллин,

Федеральное государственное унитарное предприятие

Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа,

В.А. Шипигушев, Открытое акционерное общество «АВИАДВИГАТЕЛЬ», г. Пермь, Россия

Общая постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами

Применение бесконтактных оптических пирометрических преобразователей (ОПП) в составе авиационных бортовых систем контроля, диагностики газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2, 3, 4, 5, 6] потребовало решения проблемы обеспечения требуемых метрологических характеристик всех звеньев измерительного тракта. На данном этапе применения средств оптической пирометрии (СОП) вопросы обеспечения точности измерения температуры рабочих лопаток турбины в процессе эксплуатационной наработки выдвигаются на первый план.

Одной из самых сложных проблем по-прежнему остается проблема обеспечения надлежащей чистоты наружной поверхности ОПП в процессе длительной эксплуатационной наработки во всем диапазоне работы ГТД по всему спектру применения летательных аппаратов (ЛА).

Условия работы ОПП на различных типах ГТД весьма существенно отличаются [7]. Так работа в составе ГТД маневренных ЛА, используемых в военной авиации, сопровождается большим количеством неустановившихся переходных режимов при относительно однородных климатических условиях мест взлета и посадки.

Работа же в составе ГТД неманевренных ЛА, используемых в военно-транспортной авиации (ВТА), гражданской авиации, сопровождается длительной работой на установившихся крейсерских режимах, но в весьма разнородных климатических условиях мест взлета и посадки.

При работе ГТД происходит непрерывная генерация – образование углеродистых отложений (нагара) в камере сгорания, турбине, форсажной камере [8]. Подвод воздуха от одной из последних ступеней компрессора для защитного обдува объектива ОПП, сопровождается доставкой грязного воздуха, содержащего «букет» химических элементов, соединений, твердых частиц пыли, характерных для атмосферы аэродромов, промышленных предприятий – изготовителей двигателей.

Обзор публикаций и выделение нерешенных задач

Публикации, посвященные решению задач, связанных с проблемой загрязнения объектива ОПП продуктами сгорания, можно разделить на две основные группы. К первой группе следует отнести публикации [9, 10], посвященные превентивным мерам по ослаблению интенсивности, скорости загрязнения объектива ОПП. Ко второй группе следует отнести публикации [11, 4], посвященные системным мерам по контролю загрязнения и введению корректных поправок, уменьшающих методическую погрешность.

Несмотря на обширные и продолжительный опыт применения бесконтактных СОП в ряде стран (Великобритания, Франция, США, ФРГ, СССР, РФ) ряд практических задач по эксплуатации пока еще остаются нерешенными. К таким задачам относятся:

- создание модели процесса загрязнения;
- разработка эффективных и простых методов контроля загрязнения и автоматического введения поправок в выходные сигналы ОПП;

- оценка и прогнозирование допустимых интервалов эксплуатации (межрегламентный интервал) ОПП до очередных плановых работ по очистке объектива ОПП;

- разработка специальных чистящих средств, обеспечивающих быструю, эффективную и безопасную очистку в условиях военных аэродромов, гражданских аэропортов.

Несмотря на то, что в области создания и применения авиационных СОП работают много фирм, компаний, предприятий в ряде промышленно развитых стран, на сегодняшний день отсутствуют практические (пригодные для инженерной практики) модели, описывающие количественные связи между физико-химическими характеристиками загрязнения объектива (интенсивность и химический состав загрязнения, интегральный, спектральный коэффициент пропускания, пространственное распределение отложений) и эксплуатационными параметрами (наработка, количество циклов запуска, частота очистки и др.).

Цель исследований

Целью данного исследования является:

- обзор и анализ известных методов, способов борьбы с загрязнением объектива ОПП;

- анализ, систематизация экспериментальных данных, полученных в процессе эксплуатации авиационных бортовых ОПП ;

- выявление закономерностей и разработка эмпирической модели, описывающей статистическую взаимосвязь между величиной ухода (дрейфа) градуировочной характеристики ОПП из-за загрязнения объектива и длительностью (продолжительностью) наработки;

- разработка рекомендации по назначению обоснованных интервалов проведения регламентных работ по осмотру и очистке наружной поверхности объектива ОПП;

- анализ химического состава и физической картины загрязнения для разработки эффективных и безопасных средств очистки в эксплуатации.

Изложение основного материала с обоснованием полученных научных результатов

Загрязнение наружной поверхности объектива ОПП также неизбежно, как и сажеобразование в камерах сгорания. Различия в процессах загрязнения объектива ОПП на разных типах и экземплярах ГТД проявляются в основном в скорости накопления отложений. Скорость накопления отложений варьируется в широких пределах в зависимости от интенсивности, производительности процессов сажеобразования в камерах сгорания, уровне технического совершенства конструкции посадочного гнезда турбины (ПГТ) объектива ОПП и от эффективности защитного обдува.

На рис. 1 представлены фотографии объективов с чистой поверхностью (с «нулевой» наработкой) и с загрязненной поверхностью (с эксплуатационной наработкой более 500 часов на ГТД ПС-90А).

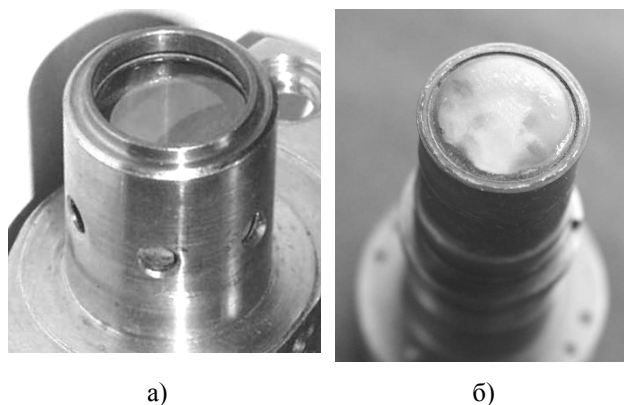


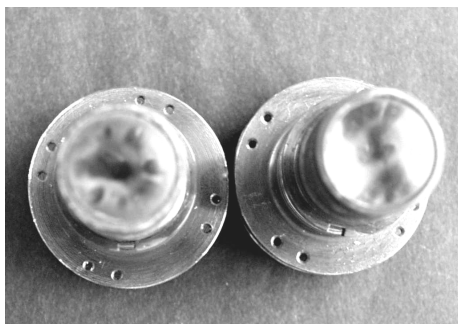
Рис. 1. Объективы ОПП

а) чистый объектив ОПП с дефлектором для обдува;
б) объектив ОПП со снятым дефлектором и отложением грязи на наружной поверхности

Процесс загрязнения объектива ОПП протекает в виде постепенного накопления поверхностных отложений в форме разнообразных пятен с причудливыми границами. Размеры, толщина, оптическая плотность отложений по всей поверхности объектива неравномерна. На рис. 2 представлены фотографии типичных случаев загрязнения.

Проведенные нами исследования показывают, что химический состав загрязнения на наружной поверхности объектива ОПП незначительно отличается от

аналогичных отложений на элементах конструкции турбин.



а)

Рис. 2. Объективы ОПП с типичными загрязнениями оптики

Химический состав отложений содержит масла, конденсированные ароматические углеводороды, эфирные группировки, асфальтены, карбены, карбоиды, золу. Элементный состав золы включает: Fe, Ni, Cr, Pb, Mn и др. Частицы нагара имеют размеры $0,25 \div 0,60$ мкм, причем доля самых крупных частиц достигает 20% по объему и приближается к свойствам графитированной сажи, кокса.

С увеличением наработки оптическая плотность отложений возрастает, а коэффициент светопропускания - τ_0 объектива падает, что приводит к уменьшению выходного сигнала ОПП. Образование пелены по наружной поверхности линзы создает условия для возникновения значительных погрешностей измерения температуры поверхности рабочих лопаток. Если не предпринимать специальных мер по парированию (учету, исключению, уменьшению) влияния этого нежелательного фактора, то величина погрешности может достигнуть $20 \div 25$ К. Такая погрешность приводит к занижению измеряемой температуры лопаток, создает ложные представления о температурном состоянии лопаток по сравнению с фактическим.

Следует отметить, что эта погрешность не является собственной аппаратурной погрешностью прибора-ОПП, а является технологической погрешностью метода измерения. Наружная поверхность объектива ОПП представляет собой в данном случае лишь место для возникновения загрязнения. После проведения регламентных работ по очистке объектива ОПП, гра-

дуировочная характеристика ОПП восстанавливается до норм заданных в технических условиях на ОПП. На рис.3 показана типичная кинетика поведения выходного сигнала (в статике) при проведении регулярных регламентных работ

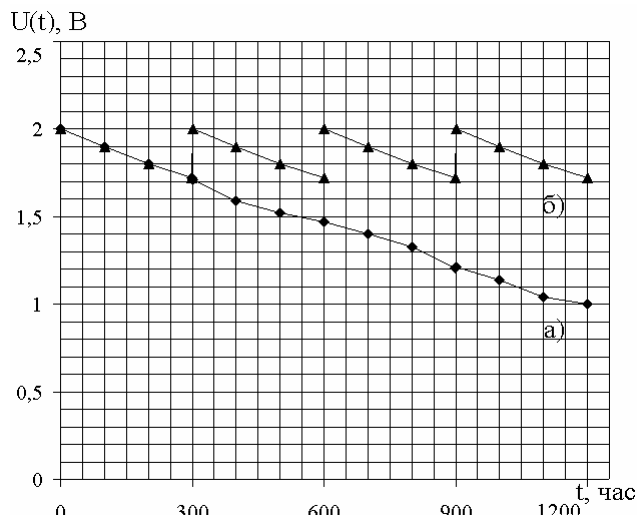


Рис. 3. График зависимости выходного сигнала от степени загрязнения объектива

- а) изменение уровня выходного сигнала без очистки;
- б) изменение уровня выходного сигнала при периодических регламентных очистках (через 300 часов)

На рис. 4 представлена картина изменения методической погрешности, обусловленной загрязнением объектива ОПП.

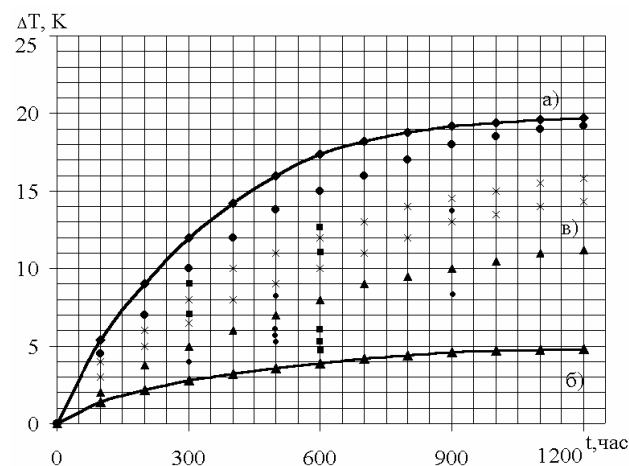


Рис. 4. Тренд погрешности от загрязнения объектива ОПП

- а) и б) – верхняя и нижняя границы предельных значений;
- в) – область рассеяния фактических данных погрешности.

Изменение погрешности имеет характер временного тренда. Массив данных получен на выборке более,

чем нескольких десятков ГТД (ПС-90А, НК-32, Д30-Ф6) на выборке из 150 экз. различных ОПП (ОПП-32, ОПП-32-2 8Г2.823.007ТУ, ОПП-94, ОПП-94К, ОПП-994К-1.25 8Г2.823.015ТУ, ОПП-82 8Г2.823.014 ТУ) с участием специалистов, обслуживающих ГТД в эксплуатации.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Погрешность от загрязнения объектива ОПП существенно зависит от:

- организации эффективного обдува объектива воздухом, отбираемым из-за последних ступеней компрессора;
- длительностью (продолжительностью) эксплуатации без осмотра и очистки объектива;
- количеством запусков газогенератора ГТД.

При оптимальных сочетаниях параметров конструкции объектива ОПП, ПГТ погрешность от загрязнения может быть сведена до $1\div 5^\circ\text{K}$ за 300 часов наработки.

При неудачных сочетаниях параметров конструкции объектива ОПП, посадочного гнезда (малый расход обдувающего воздуха и т.д.) и эксплуатационных факторов (запыленность воздуха поступающего от компрессора, неудачные запуски, частая консервация – расконсервация ГТД) погрешность может достигать величин до $6\div 20^\circ\text{K}$ за 300 часов наработки, что является неприемлемым.

Для создания адекватных математических моделей отражающих взаимосвязи между погрешностью от загрязнения и количеством циклов запуска, количеством переходных режимов работы ГТД маневренных ЛА необходимо расширить статистическую базу по фактической наработке.

Перспективным направлением для радикального уменьшения этой погрешности и снижения затрат на обслуживание является усложнение конструкции ОПП, привлечение дополнительных структурных и информационных ресурсов для оценки фактического значения спектрального коэффициента пропускания объектива ОПП и введении своевременных поправок.

Несмотря на более чем тридцатилетний опыт применения СОП для контроля температуры поверхности

рабочих лопаток турбины, задача уменьшения влияния загрязнения объектива ОПП на точность измерения до сих пор остается актуальной.

Литература

1. Barber R.A. Radiation pyrometer designed for in-flight measurement of turbine blade temperatures // SAE-Paper.- 1969.- № 690432.
2. Rohy D.A., Duffy T.E., Compton W.A. Radiation pyrometer for gas turbine blades // SAE-Paper.- 1972.- № 720159.
3. Vershure R.W. Engine demonstration testing a cooled laminated axial turbine // AIAA Paper.- 1979, № 1229.
4. Walters S. New instrumentation for advanced turbine research // Mechanical Engineering.- 1983.- Vol. 105.- № 2.- P. 43-51.
5. Suarez E., Przirembel H.R. Pyrometry for turbine blade development // AIAA Paper 88-3036.
6. Fisher E.A., Lewis T.T. Experimental pyrometer systems for gas turbine engine // AIAA Paper.- 1992.- № 3482.- P. 1-6.
- Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Селиванов О.Д. Интегрированное управление силовой установкой многорежимного самолета / Под ред. О.С. Гуревича.- М.: Машиностроение, 1993.- 304 с.
7. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив // Ф.Г. Бакиров, В.М. Захаров, И.З. Полещук, З.Г. Шайхутдинов.- М.: Машиностроение, 1989.- 128 с.
8. Evaluation lens purge systems for optical sensors on turbine engines / T. Hayden, D.C. Myhre, D.Y.H. Pui, T.H. Kuehn, C.J. Tsai // AIAA Paper.- 1988.- P. 3032.
9. Kerr C.J., Ivey P.C. A review of purge air designs for aeroengine – base optical // Trans. ASME. J. Turbomachinery.- 2002.- Vol.- 124.- № 2.- P. 227-234.
10. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры.- М.: Энергоатомиздат, 1988.- 248 с.

Поступила в редакцию 20.06.03

Рецензент: канд. техн. наук, доцент А.И. Скрипка, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.