

Пашов Б.М.¹, Ганзбург М.Ф.¹, Питерцев Е.Е.¹, Поскачей А.А.¹, Яновский Л.С.²

¹ОАО «АВЭКС». РФ, г. Москва

²ФГУП «Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова». РФ, г. Москва

ПИРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛОПАТОК КАК ВАЖНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГТД

Одна из ключевых составляющих стратегии CALS — «непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции» — заключается в оптимизации процессов обслуживания, ремонта, снабжения запасными частями и модернизации. Поскольку затраты на сохранение (обслуживание) сложного наукоемкого изделия в работоспособном состоянии часто равны или превышают затраты на его приобретение, принципиальное сокращение стоимости этого этапа жизненного цикла может быть обеспечено исследованиями и разработками в области создания полноценной системы его информационной поддержки.

Система контроля (определения) остаточного ресурса двигателя в полете

В последнее время проявляется повышенный интерес к созданию систем определения остаточного ресурса двигателя. Особый интерес представляет определение ресурса лопатки газотурбинного двигателя (ГТД). Увеличение температуры газовой среды на входе в турбину на 1% приводит к увеличению тяги на 1,5–2%. Этим объясняется стремление к повышению температуры газовой среды в двигателе. Свойства топливно-воздушной среды позволяют достичь температуры газовой среды около 2500 К. Основным ограничением повышения температуры в газотурбинном двигателе является резкое ухудшение механических свойств материалов конструкций ГТД.

Перегрев лопатки определяет время длительной прочности, которая в значительной степени характеризует ресурс двигателя.

На рис. 1 приведен график, показывающий зависимость относительного ресурса двигателя от температуры лопаток.

В настоящее время на ГТД с целью увеличения температуры газа применяется принудительное охлаждение лопаток, поэтому их температура определяется как температурой газа, так и эффективностью охлаждения.

На рис. 2, 3 показано влияние относительного расхода охлаждающего воздуха и его температуры на температуру лопаток в обла-

сти максимальных температур при температуре газа 1500 К.

Из рис. 1–3 следует, что перегрев лопатки на 50–100 °С ведет к значительному сокращению ресурса двигателя. Столь сильная зависимость температуры лопатки от условий и большое ее значение для двигателя требует отдельного контроля и ограничения температуры лопаток.

Причиной повышения температуры лопаток может быть:

- нарушение целостности лопатки и каналов ее охлаждения,
- неправильная установка лопатки на оси двигателя.

Использование измерительной системы «Форсаж», разработанной ФГУП «ММП «Салют», позволяет осуществлять отбраковку лопаток после их

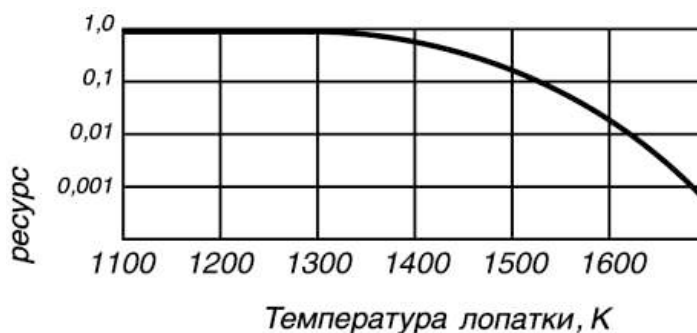


Рис. 1. Зависимость относительного ресурса от температуры лопаток

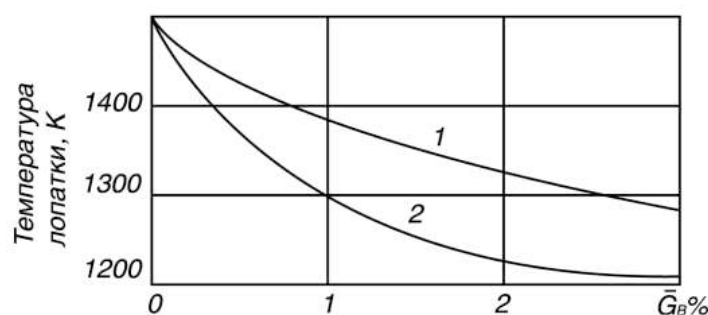


Рис. 2. Влияние изменения относительного расхода воздуха на температуру лопатки: 1 — лопатка с тремя каналами и петлевой схемой течения охладителя; 2 — литая лопатка с дефлектором и поперечным течением охладителя, с внутренним оребрением входной кромки

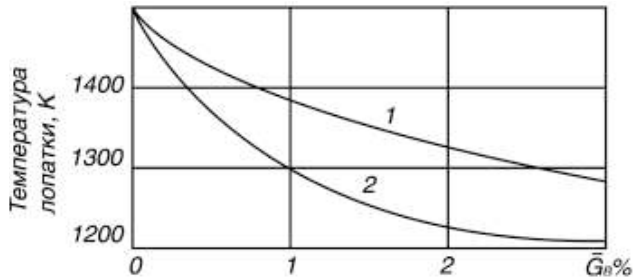


Рис. 3. Влияние изменения температуры охлаждающего воздуха на температуру лопатки ($T_T = 1500\text{K}$):

1 — лопатка с тремя каналами и петлевой схемой течения охладителя; 2 — литая лопатка с дефлектором и поперечным течением охладителя, с внутренним оребрением входной кромки

изготовления. Использование 8-канальной одно-спектральной оптоэлектронной системы, разработанной ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова, позволяет исключить неправильную установку лопаток в турбину и обеспечивает контроль температурного состояния лопаток в процессе стендовых испытаний.

Следовательно, необходимо контролировать охлаждение лопатки только в полете летательного аппарата. Нарушение охлаждения может быть при появлении мелких частиц в охлаждающем воздухе: при взлете — пыль, песок, в полете — частицы сгоревших спутников Земли и др.

Применение оптоэлектронных систем измерения температуры лопаток в системах регулирования

Анализ сигнала с оптоэлектронной системы измерения температуры лопаток показывает, что при применении специальных алгоритмов обработки сигналов системы может быть определен ряд других параметров двигателя.

1. Определение температуры продуктов сгорания.

Как известно, в пламени всегда имеются мелкие механические включения продуктов сгорания. Из-за малых размеров эти включения имеют температуру пламени. Пирометр в двигателе визирован на лопатки. Если механические включения находятся вне поля зрения пирометра, измеряется только температура лопаток (которая ниже температуры пламени). В момент попадания включений в поле зрения пирометра последний фиксирует их температуру, а, следовательно, и температуру пламени.

2. Определение скорости вращения ротора ГТД.

Из-за существующего градиента температур по лопатке выходной сигнал пирометра содержит переменную составляющую с частотой, определяемой числом лопаток m и числом оборотов ротора n :

$$n = \frac{1}{60m} \cdot f(\text{об/мин}).$$

3. Определение начала помпажа.

Как известно, начало помпажа характеризуется изменением целого ряда параметров, в том числе падением скорости вращения ротора, ростом температуры газа по тракту двигателя, а, следовательно, и средней температуры лопаток.

Число оборотов и температура лопаток по тракту могут быть измерены пирометром. Если рабочее изменение режима двигателя характеризуется односторонним изменением температуры газа и скорости ротора, то при помпаже увеличение температуры сопровождается снижением скорости вращения и, наоборот, уменьшение температуры происходит одновременно с повышением скорости вращения. Поэтому резкое увеличение отношения T_T/n , где T_T — температура газа, позволяет зафиксировать начало помпажа.

4. Определение ресурса двигателя.

Ресурс двигателя определяется по скорости вращения ротора, и температуре лопаток, числу циклов, при которых скорость и температура превышают установленное значение, и по скорости изменения температуры.

5. Определение эффективности работы систем охлаждения.

Эффективность работы системы охлаждения определяется по отношению переменной составляющей сигнала, определяемой градиентом температур по лопатке, к средней температуре лопаток.

6. Определение наличия перегрева одной из лопаток.

Наличие перегрева одной из лопаток (из-за засорения канала охлаждения, появления трещин, нарушения герметичности и т.д.) определяется по отношению максимальной температуры на лопатке к средней температуре.

7. Контроль двигателя на обрыв лопаток.

Обрыв лопаток определяется по появлению в сигнале пирометра дополнительного сигнала частотой $f_1 = 60n$ (n — число оборотов ротора в единицу времени).

8. Контроль эффективности работы камеры сгорания.

Эффективность работы камеры сгорания контролируется по частоте следования остроконечных импульсов в сигнале, которая зависит от количества сажистых частиц в продуктах сгорания.

В ОАО «АВЭКС» разработана аппаратура одно-канальной оптоэлектронной системы измерения температуры (ОЭСИТ), состоящая из оптического пирометрического преобразователя (ОПП), разработанного приборостроительным предприятием (г. Уфа), и электронного блока.

ОПП содержит телескоп (линза и апертурная диафрагма) и фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), соединенные между собой гибким волоконным световодом. Телескоп, располагаемый на объекте, предназначен для пространственного вы-



деления контролируемого участка поверхности объекта и для защиты фотоэлектрического преобразователя (приемника излучения и предварительного усилителя) от воздействия агрессивной среды, высоких окружающих температур, давлений, динамических нагрузок и вибраций.

Апертурная диафрагма выделяет контролируемый участок лопатки и предотвращает попадание фонового излучения от нагретых тел, окружающих объект. Поток излучения с лопатки фокусируется на входной торец световода и далее передается в ФЭП к приемнику излучения.

Разделение ОПП на две части, соединенные световодом, позволяет размещать ФЭП в более благоприятной зоне, где уровень температур и вибраций меньше, чем в месте крепежа телескопа.

Односпектральная ОЭСИТ может использоваться для измерения температуры рабочих лопаток ГТД, однако при этом необходимо, чтобы на поверхность лопатки, на которую визирован телескоп, не попадало излучение из камеры сгорания.

В ОАО «АВЭКС» ведется работа по расширению возможностей применения односпектральной ОЭСИТ.

Так, для измерения температуры объекта используется излучение в двух или трех областях спектра. Для этого торец свето-вода, расположенный в ФЭП, разделяется на две или три части с самостоятельными тремя приемниками и предварительными усилителями с различными фильтрами перед каждым приемником излучения. Обработка электрических сигналов, пропорциональных потокам излучения в двух или трех участках спектра по специальным алгоритмам, позволяет минимизировать, а в ряде случаев и полностью исключить погрешность как из-за влияния вариации излучательной способности объекта, так и из-за вариации стороннего излучения (например, вариации излучения из камеры сгорания при измерении температуры вогнутой поверхности лопатки). Реализация алгоритмов может быть выполнена с помощью электронных вычислительных устройств.

Литература

1. *Третьяков О.Н.* CALS-технологии при определении ресурса ГТД по техническому состоянию/ CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support) – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиационной промышленности / Научн. ред. А.Г. Братухин. М.: Изд-во МАИ, 2002. 676 с.

2. *Поскачей А.А., Парфенов Г.А., Мирской Б.И., Матусевич О.Л., Туманов В.Н.* Фотоэлектрическая система определения температурного режима ГТД. / Новые приборы. Метрологическое обеспечение испытаний ГТД. М.: ЦИАМ. № 28. 1985. С. 17–25.

3. *Марфин Ю.Н., Гаренишин В.М., Ханнанов М.М., Пятаева Г.С., Валеев М.Т., Губайдуллин И.Т., Дунаев В.В.* Оптические пирометрические преобразователи для бесконтактного измерения температуры лопаток ГТД. // Авиационная промышленность. № 12. 1983. С. 21–24.

4. *Поскачей А.А.* Пирометрическое устройство для измерения температуры лопаток / Патент РФ № 2032886. 1992.

5. *Сахаров В.Б., Романов В.Б.* Система многоканального пирометра для измерения температуры рабочих лопаток ГТД. /Тезисы доклада на II международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». М.: ЦИАМ, 6–9 декабря 2005.

6. *Сахаров В.Б., Романов В.Б.* Устройство для измерения распределения температуры рабочих лопаток турбомшины /Патент РФ № 2280241 от 20.07.2006.

7. *Игнатьев Б.С., Поскачей А.А., Леготкина Т.С.* Пирометр двойного спектрального отношения. / А.С. № 1487626. 1986.

8. *Ильченко Г.А., Коц Л.Б., Полоскин Ю.В., Поскачей А.А., Чубаров Е.П.* Оптикоэлектронные измерители температурных полей и возможность их применения при изготовлении и ремонте изделий авиационной техники. М.: НИИД. 1990. 88 с.