

ПИРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ИСПЫТЫВАЕМЫХ НА РАЗГОННЫХ СТЕНДАХ

Э.В. Асланян, Б.А. Балувев (ФГУП «ЦИАМ им П.И.Баранова»)

Представлена волоконная пирометрическая система измерения параметров деталей газотурбинного двигателя при стендовых прочностных испытаниях в условиях сильных электромагнитных помех от индукционных нагревателей испытуемых деталей. Система используется при стендовых исследованиях узлов турбокомпрессора авиационных двигателей в ЦИАМ им. П.И. Баранова. Приведены характерные результаты измерений, рассмотрены некоторые методические вопросы, связанные с излучательной способностью поверхностей измеряемых деталей.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель; стендовые испытания вращающихся деталей; измерение температур волоконным пирометром.

При создании авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) важным этапом разработки является обеспечение надежности составляющих узлов двигателя, в том числе лопаточных ступеней турбокомпрессора, которые состоят из диска и установленных на нем лопаток. Прочностные характеристики дисков этих ступеней подтверждаются экспериментальными испытаниями на специальных «разгонных» стендах, где по заданным алгоритмам вращающиеся диски подвергаются совместным воздействием предельных температур и силовых напряжений от центробежных сил.

Исследуемый диск устанавливается на соответствующих опорах в бронекамере с защищенными стенками, поскольку в некоторых случаях программой испытаний предусматривается доведение диска до разрушения. Вращается диск с помощью электродвигателя, и для снижения его энергопотребления и потерь от аэродинамических сил трения во время испытаний во внутренней полости бронекамеры поддерживается технический вакуум. Необходимый нагрев диска производится мощными индукционными нагревателями на повышенных частотах (2,5...3 кГц), являющимися источником существенных электромагнитных помех.

Для автоматизации процесса нагрева по заданной программе испытаний была поставлена задача: создание пирометрической системы измерения температуры поверхности диска, которая бы входила в систему автоматического управления генераторами индукторов нагрева.

Специфика поставленной задачи заключается в применении индукционного нагрева с мощными электромагнитными полями в зоне диска, температуру которого надо измерять. Связи с этим возникает необходимость выноса фотоэлектрического преобразователя пирометра за пределы бронекамеры и передачи измеряемого излучения от диска с помощью волоконного световода. Требования к малогабаритности и термостойкости датчика обуславливают предпочтительность безобъективного (апертурного) входного узла датчика. Такая структурная реализация пирометра позволяет использовать его для диагностирования температурного состояния и в иных труднодоступных полостях испытываемых объектов.

Известны волоконные пирометры общепромышленного типа на требуемый диапазон температур, например, фирмы DIAS Infrared Systems (Германия), со спектральным диапазоном принимаемого излучения 2...2,6 мкм. Эти пирометры выполнены с входным линзовым объективом относительно большого размера и требуют принудительного охлаждения, что затруднительно в условиях вакуумной бронекамеры. В работе [1] описан волоконный пирометр для контроля температуры вращающейся детали при ее механической обработке. В нем используется кварцевое волокно, применяемое в информационных линиях связи, по эксплуатационным возможностям подходящее для требуемых условий. Однако нижняя граница измеряемых температур составляет 250 °С.

Излучение, характеризующее температуру поверхности диска, оптическим волокном передается на фотоэлектрический преобразователь, который может быть вынесен достаточно далеко. Выходное напряжение преобразователя достигает десятка вольт и может легко регистрироваться стандартными информационно — измерительными системами.

Проблемы при создании таких волоконных пирометров — малая энергия излучения исследуемых тел при температурах излучения от 150 °С. Согласно закону Вина — Голицына, максимум энергии излучения при таких значениях температур лежит в области 6,85 мкм. На этот диапазон длин волн известны оптические волокна только на основе халькогенидных стекол, которые обладают большой хрупкостью, низкой температурной стойкостью и высокой стоимостью. Пирометры на основе таких волокон описаны в [2].

Основные технические требования к пирометрической измерительной системе

Измеряемые температуры на диске, °С... 150...800
 Точность измерений, °С.....5
 Частота вращения диска, Гц.....<400
 Датчик системы, устанавливаемый в бронекамере...
малогабаритный и вибростойкий (до 20 g)
 Расстояние от датчика до диска, мм.....
постоянное 5...10
 Освещение в бронекамере.....отсутствует
 Окружающая среда в бронекамере.....воздух
 с парами масла при остаточном давлении
 0,07...0,1 бар

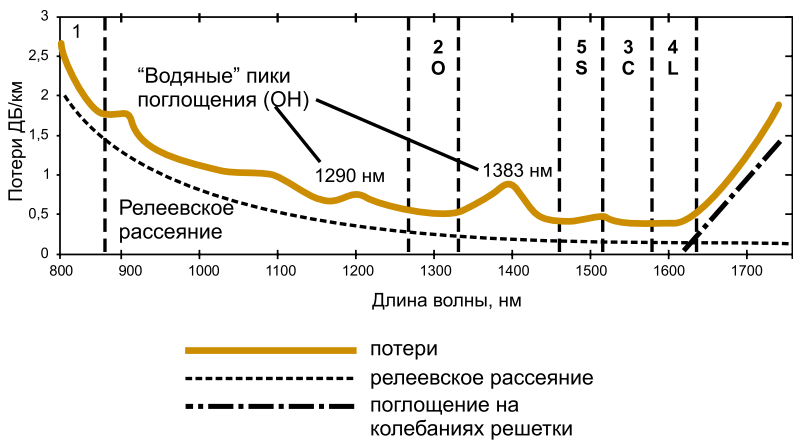


Рис. 1. Типичная спектральная характеристика удельных потерь кварцевых моноволокон

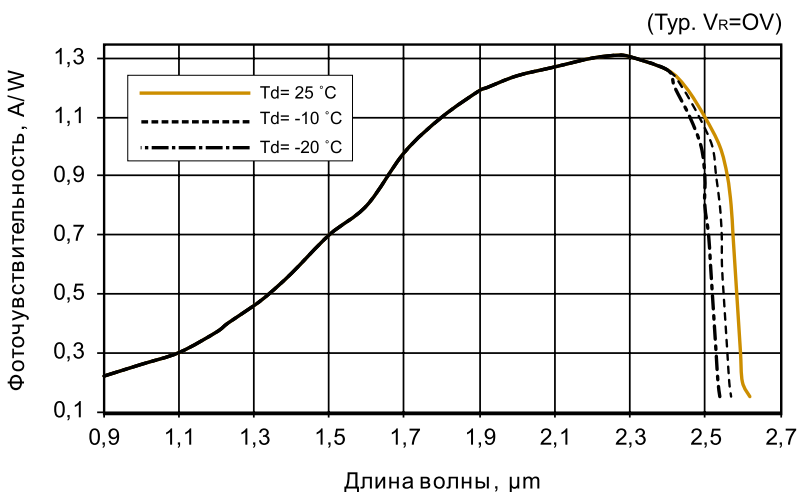
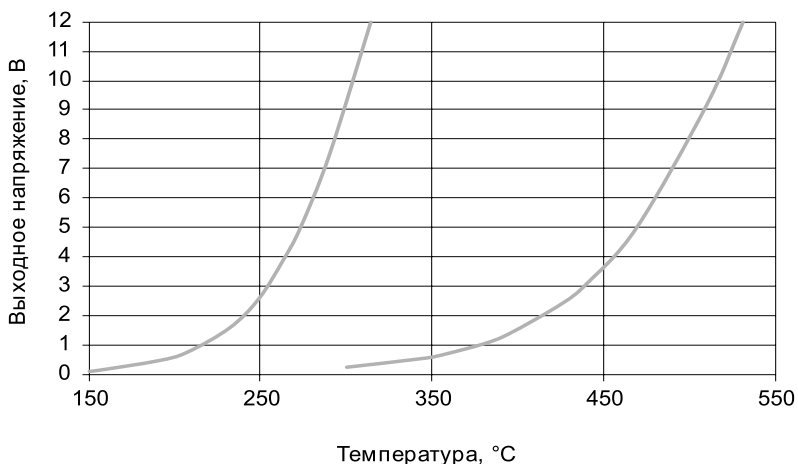


Рис. 2. Спектральная характеристика чувствительности фотодиода фирмы Hamamatsu серии G12183

По эксплуатационным характеристикам для авиационного применения целесообразно применять существующие кварцевые волокна, основной спектральный диапазон пропускания которых ле-

невелики ($\leq 0,1$ дБ). Это позволило удовлетворительно организовать передачу информационного излучения по сквозному тракту пирометра.



Канал для ступицы диска Канал для обода диска
Рис. 3. Типичные переходные характеристики измерительных пирометрических каналов

жит в интервале длин волн излучения 0,4...1,65 мкм. Типичные спектральные характеристики моноволокон из кварца, разработанные в основном для волоконно-оптических линий связи, представлены на рис. 1. В настоящее время в академических институтах, в частности в ИОФ РАН, ведутся исследовательские работы по созданию волокон с металлизированным покрытием и расширенным в инфракрасной области удовлетворительным пропусканием до 2,0...2,5 мкм. В данной работе использовались опытные образцы таких волокон для измерения низких температур.

В этих спектральных областях энергия излучения тел с указанными выше температурами крайне мала. Так при использовании апертурного волоконного датчика с кварцевым волокном, имеющим ядро диаметром 1 мм, для измерения температуры диска в области 150 °С необходима регистрация мощности излучения порядка $3 \cdot 10^{-12}$ Вт. Для надежной регистрации сигналов такой мощности были разработаны специальные высокочувствительные фотопреобразователи повышенной стабильности. В качестве фотодиодов использовались изделия из InGaAs фирмы Hamamatsu серии G12183, спектральная чувствительность которых представлена на рис. 2.

Интегральные потери в пропускании излучения в коротких (до 10 м) кварцевых волокнах для воспринимаемой этим фотодиодом граничной длинноволновой области волн излучения в 2,4...2,5 мкм

невелики ($\leq 0,1$ дБ). Это позволило удовлетворительно организовать передачу информационного излучения по сквозному тракту пирометра. На основе, ранее проведенных работ созданы два пирометрических измерительных канала разной чувствительности на диапазоны температур: 150...310 °С для области диска в районе ступицы и 280...530 °С для обода диска. Такие малые интервалы диапазонов обусловлены тем, что при указанных низких температурах для пирометров, работающих в ближней ИК-области спектра, зависимость интенсивности воспринимаемого излучения от температуры характеризуется нелинейностью с большой крутизной (рис. 3).

Фотодиоды, преобразующие мощность излучения в электрический ток, обладают низким уровнем собственных шумов и хорошей линейностью передаточной характеристики в динамическом диапазоне >120 дБ, а электронные уси-

*Творческая неудовлетворённость
саими собой – вот главный двигатель
прогресса.*
В. Филатов

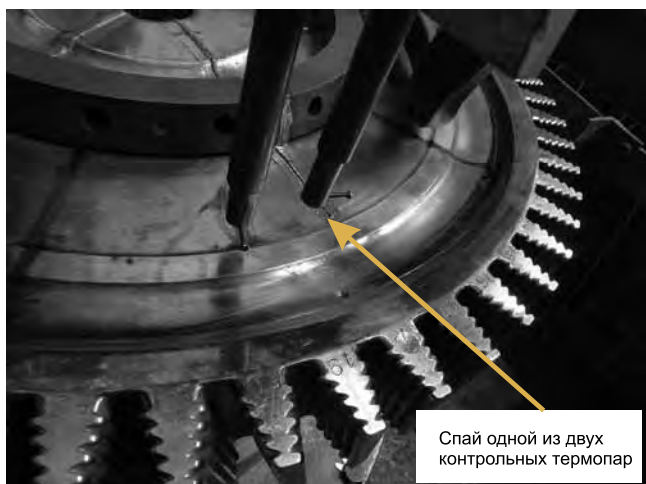


Рис. 4. Внешний вид ориентации световодов на диск

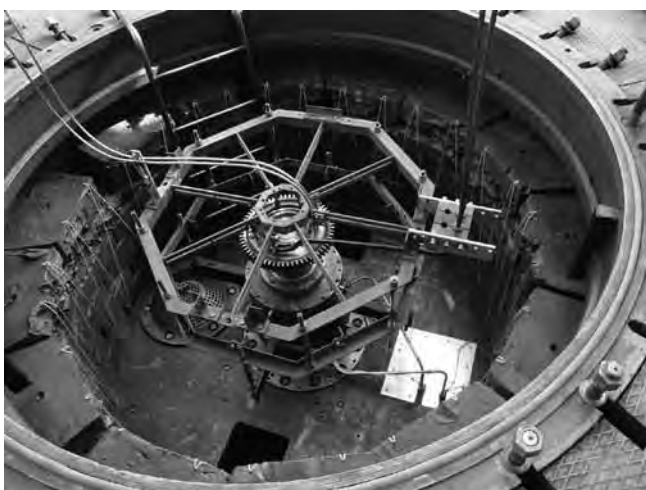


Рис. 5. Общий вид диска внутри барокамеры на стенде Т14-01Б

лителю, являющиеся определяющим компонентом в фотопреобразователе особенно для работы с малыми сигналами, сопоставимыми с тепловыми шумами, такими свойствами не обладают. В дальнейшем предполагается создание специальных усилителей с логарифмической переходной характеристикой. В созданном чувствительном (для температур 150...310 °С) фотопреобразователе уровень собственных шумов на выходе составил около 20 мВ СКЗ (спектр близок к «белому» шуму), а временная нестабильность по постоянному току порядка — 8 мВ/ч. Для другого канала эти характеристики в два раза меньше. Максимальное выходное напряжение составило 12 В, что характеризует суммарный динамический диапазон фотопреобразователя в 60 дБ, то есть в случае повышения чувствительности для снижения нижней границы измеряемых температур следует совершенствовать электронный усилитель.

На низких температурах (150...320 °С) динамический диапазон небольшой ≈ 200 °С. В области высоких температур (≤ 800 °С) динамический диапазон на макете пирометра составил около 400 °С из-за

меньшей крутизны зависимости интенсивности излучения от температуры в соответствии с формулой Планка в коротковолновой области Вина.

Проведенные испытания на разгонном стенде в «ЦИАМ им П. И. Баранова» двух каналов низкотемпературного волоконного пирометра показала их работоспособность. Фотопреобразователи с помощью кварцевых гибких световодов длиной 4 м были вынесены за пределы барокамеры, внутри которой наблюдался наибольший уровень электромагнитных помех от электродвигателя привода и индуктора нагревателя.

Приемные торцы световодов из моноволокна, заключенных в защитные медные трубки, установлены на расстоянии 10 мм от поверхности исследуемого диска (рис. 4). Принимаемое световодами излучение характеризует усредненное значение температуры с области на диске диаметром около 4 мм.

В процессе подготовки к испытаниям двумя хромель-алюмелевыми термопарами был препарирован модельный диск (в качестве которого использовался диск турбины из материала ЭП-741 П) и изготовлен индукционный нагреватель. На рис. 5 представлен общий вид диска со смонтированной системой нагрева и установленными световодами в барокамере разгонного стенда.

Медные трубки закреплены на раме над диском внутри барокамеры и выводят выходные концы волокон с оптическими разъемами через герметичные выводы за пределы барокамеры, где состыковываются с фотопреобразователями пирометров.

Испытания проводились при давлении в барокамере 0,07...0,08 бар. Частота электрического тока, используемая на индукционном нагревателе, — 2,5 кГц.

Для испытаний на стенде были изготовлены два опытных низкотемпературных пирометра, внешний вид одного из них представлен на рис. 6. Конец волокна датчика, который размещен в барокамере, заклеен высокотемпературным (до 1000 °С) клеем



Рис. 6. Внешний вид опытного варианта низкотемпературного пирометра

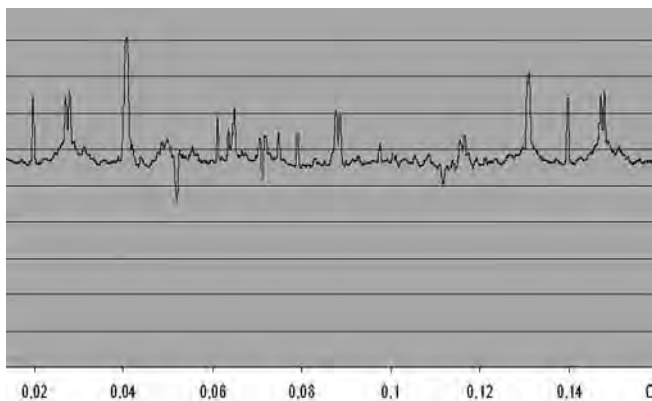


Рис. 7. Распределение электрического сигнала пирометра по каналу «ступица» за оборот диска

ТПК-2 ВИАМ в трубку из нержавеющей стали с наружным диаметром 2 мм. Кварцевый волоконный кабель в полиимидной оболочке с наружным диаметром 3 мм имеет длину 4 м и на выходном конце заключен в стандартный оптический разъем, с помощью которого надежно стыкуется с фотопреобразователем.

Проведенные на стенде испытания показали удовлетворительную сходимость результатов измерений с учетом методических и систематических поправок. Зависимости графиков температур по высокотемпературному каналу практически совпали с линиями показаний по одной из контрольных термопар.

Характерно, что при установившемся режиме это расхождение по каналу «обод» (имеющем меньшую чувствительность по сравнению с каналом «ступица») становится $< 5^{\circ}\text{C}$. Это сопоставимо с погрешностями градуировки как пирометра, так и термопары.

Отдельно стоит методический вопрос о корректности оценки температуры поверхности диска по волоконной термопаре, препарированной на диске покрывной фольгой традиционным способом. Другой источник погрешности пирометра состоит в идентичности поверхности образца материала (вырезан из области ступицы аналогичного диска), по которой производилась градуировка пирометра с поверхностью испытываемого диска, который ранее многократно испытывался и нагревался в области его периферии. Низкая излучательная способность слабо окисленных сталей (у данного образца $\epsilon \approx 0,5$) и ее неопределенность на испытываемом диске может значимо влиять на результаты пирометрии.

Для низкотемпературного канала сопоставимые графики температур показали хорошую эквидистантность, но со смещением $15...20^{\circ}\text{C}$.

Причины происхождения этого смещения могут быть различными: из-за отклонений в исходной градуировке; загрязнения входного торца волокна;

смещения ориентации входного торца как по радиусу диска, так и по углу к его поверхности. Для данного препарирования открытым остается вопрос о степени теплопередачи от покрывной фольги, нагреваемой полем индуктора, к спаян термопары. Возможна суперпозиция воздействий перечисленных факторов.

Рассмотрение связи тонкой структуры электрического сигнала пирометра с характером поверхности диска показало важность ее однородности для достоверности измерений. Наличие на поверхности диска элементов новой и старой прокладки проводов препарирования с фольгированным покрытием, вероятно, приводит к локальному увеличению излучательной способности. Так рис. 7 хорошо отображает неоднородность излучения с поверхности диска вдоль кольца наблюдения. При средней температуре диска 275°C максимальный пик от старой термопары составил 25°C , а для новых (действующих) термопар -15°C .

Целесообразно рассмотреть при полностью пирометрическом контроле температур в экспериментальных исследованиях дисков возможность покрытия их тонким слоем (до 50 мкм) специальной высокотемпературной порошковой краски черного цвета (есть краски с термостойкостью до 650°C). Излучательная способность такой краски — $0,95...0,98$.

Проведенная адаптация и последующий цикл испытаний разработанной двухканальной пирометрической системы бесконтактного измерения температуры в диапазоне температур $150...500^{\circ}\text{C}$ для исследования вращающихся дисков ГТД на разгонном стенде ЦИАМ показали ее работоспособность и хорошую идентифицируемость с традиционными термопарными измерениями.

Учитывая, что такие пирометрические измерения с волоконными датчиками для специфичных условий разгонного стенда в России проведены впервые, целесообразно и в дальнейшем их использование при исследованиях вращающихся дисков ГТД с целью накопления опыта методического характера.

Список литературы

1. *Carmen Vázquez, Alberto Tapetado and Henar Miguélez.* Monitoring machining temperature using optical fibers. (An IR fiber-optic pyrometer measures temperatures above 250°C close to rotating components where other sensing techniques are unsuitable.) 3 July 2014, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201406.005510.
2. *Orlov I.Ya., Nikiforov I.A., Afanasjev A.V.* Wireless Infrared Pyrometer with Fiber Optic // *Wireless Engineering and Technology.* 2014. №5. p. 25-33. Published Online April 2014 in SciRes.

Эдуард Владимирович Асланян — старший научный сотрудник, Борис Александрович Балуев — начальник отдела ФГУП «ЦИАМ им П.И.Баранова».
 Контактные телефоны: (495) 362-00-65, 552-34-18.
 E-mail: baluev@rtc.ciam.ru aslanian@ciam.ru