

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

УДК 669:536.52:53.08:535.253.21

Т. П. АНДРЕЕВА

СОЗДАНИЕ  
АВИАЦИОННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО  
ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Обсуждаются основные направления разработки оптических пирометрических преобразователей (ОПП) для применения на газотурбинном двигателе, проводимой во ФГУП «УНПП „Молния“» (Уфа). Для достижения требуемого значения основной инструментальной доверительной погрешности ОПП впервые в стране была поставлена и решена задача разработки специализированного термостойкого кремниевого фотодиода для применения в ОПП. Рассмотрены разработанные во ФГУП «УНПП „Молния“» и НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» (С.-Петербург) средства метрологического обеспечения в виде моделей абсолютно черных тел на точках плавления чистых металлов, поверочные схемы, комплекс аппаратуры обработки сигнала ОПП. *Оптический пирометрический преобразователь; пирометр; средства метрологического обеспечения; модели абсолютно черных тел; поверочные схемы; аппаратура обработки сигнала*

## ВВЕДЕНИЕ

Оценка температурного состояния теплонапряженных частей газотурбинного двигателя (ГТД) при его испытаниях и эксплуатации с целью контроля и управления является основой обеспечения безопасности полетов. Особенно жесткие требования предъявляются к точности поддержания температуры поверхности рабочих лопаток турбины высокого давления ГТД.

Безальтернативным средством получения измерительной информации о температурном состоянии двигателя являются средства оптической пирометрии. В связи с этим в течение последних лет как в нашей стране, так и за рубежом активно решались проблемы, связанные с созданием средств оценки температурного состояния лопаток в виде оптических пирометрических преобразователей (ОПП), аппаратуры обработки сигнала ОПП и средств метрологического обеспечения.

Основными зарубежными разработчиками и производителями оптических пирометрических преобразователей являются фирмы: «International Harvester Company», отделение «Solar Division», «Kollsman Instrument Corporation» (Великобритания), «Land Pyrometers Ltd.» (Великобритания), «Smiths Industries Ltd.», отделения «Aviation Division» и «Aerospace and Defence Systems Company», «Nergetty and Zambra (Aviation) Ltd.», кон-

сорциум с фирмой «Land Pyrometers Ltd.», «Vanzetti Infrared and Computer Systems Incorporated» (США), «Nasa Levis Research Center». В последние годы на рынок средств оптической пирометрии для авиационных двигателей активно продвигается продукция фирмы «Auxitrol», Франция.

Бортовой вариант средств оптической пирометрии совместной разработки фирм «Land Pyrometers Ltd.» и «Kollsman Instrument Ltd.» применен на двигателе RB-199 многоцелевого истребителя-бомбардировщика Panavia Tornado [1–3], а также на турбореактивном двигателе OLYMPUS-593 и -602 самолета Concord [4, 5].

Аппаратура для измерения температуры лопаток ГТД успешно использовалась фирмой «Дженерал Электрик» в программах разработки двигателей JЕ4 (СПС), TF39 (С5А) и GF6 (ДС10) и для бортового применения в системах автоматического регулирования двигателя J79 [6].

В отечественной промышленности разработкой средств оптической пирометрии занимались ВНИЦ ЦИАМ им. П. И. Баранова (Москва), ряд моторостроительных предприятий, в том числе НПО «Сатурн» (Москва), КБКП (Казань), ТМКБ «Союз» (Москва) и ФГУП «УНПП „Молния“» (Уфа).

В настоящее время достигнуты определенные успехи в разработке отдельных компо-





Рис. 1. Установка оптического пирометрического преобразователя на двухконтурном ГТД

нентов ОПП и в помехоустойчивой обработке сигналов. В то же время недостаточное внимание уделялось решению проблем, связанных с обеспечением промышленного серийного выпуска ОПП, отвечающего комплексу взаимосвязанных требований к его точности и эксплуатационной надежности.

## 2. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ОПП В КАЧЕСТВЕ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛОПАТОК РАБОЧЕГО КОЛЕСА ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ГТД

Типичная компоновка оптического зонда ОПП на газотурбинном двигателе приведена на рис. 1.

В условиях эксплуатации ОПП на ГТД оптический зонд крепится к наиболее нагретой части внутреннего контура двигателя. Для создания защиты оптики объектива от закапывания в систему обдува подается чистый воздух. С целью обеспечения падающего режима работы электронная часть ОПП размещается в более холодной части двигателя.

В поле зрения ОПП попадает сложный поток излучения, включающий в себя излучение от лопаток турбины, продуктов сгорания топлива, сажистых частиц, водяного пара. В связи с тем, что ОПП должен регистрировать только излучение лопаток турбины, для снижения влияния постороннего излучения в качестве фотоприемника был выбран кремниевый фотодиод. Область спектральной чувствительности кремниевого фотодиода попадает в «окно» между пиками селективного из-

лучения газов и водяного пара [7]. Распределение излучения лопаток ( $B_\lambda$ ), продуктов сгорания газового потока в поле зрения оптического пирометрического преобразователя и характеристика спектральной чувствительности кремниевое фотодиода ( $\Psi_\lambda$ ) представлены на рис. 2.

$B_\lambda, \Psi_\lambda$ , отн. ед.

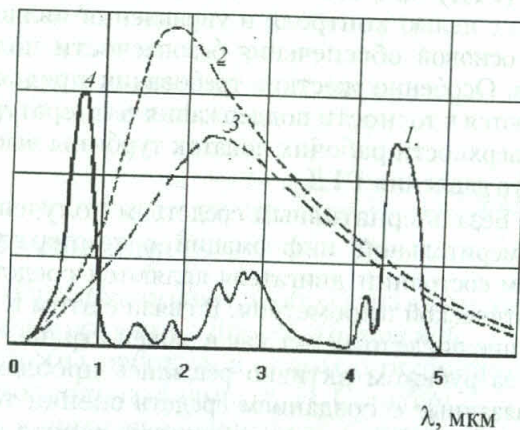


Рис. 2. Распределение спектра излучения лопаток и продуктов сгорания в газотурбинном двигателе в поле зрения ОПП: 1 — смеси газов и паров воды, 2 — сажистых частиц, 3 — лопаток, 4 — характеристика спектральной чувствительности кремниевое фотодиода

На основе имеющихся особенностей по спектральному составу излучения, попадающего в поле зрения ОПП, а также реальных эксплуатационных условий при работе в составе ГТД сформулирован комплекс технических требований к ОПП, который отражен в технических заданиях и положен в основу отраслевого стандарта на ОПП [8]. Основные



Таблица

## Основные технические характеристики образцов ОПП и промышленных пирометров

Тип ОПП, пирометра	ОПП-94К	ОПП-82	Бихроматический пирометр	Промышленный пирометр М68Л
Параметр	Значение параметра			
Диапазон измерения температуры, К ....	973÷1423	973÷1423	973÷1373	623÷3273
Полоса пропускания, кГц .....	0÷100	0÷100	0÷100	Время срабатывания 10÷50 мс
Основная инструментальная доверительная погрешность с доверительной вероятностью 0,95 при измеряемой температуре 1273 К, не более, К .....	±12 (±6)*	±12 (±6)*	±6**	±6**
Показатель визирования, не более .....	0,05	0,05	0,03	0,005÷0,3
Расстояние до цели, мм .....	100÷200	100÷200	до 200	—
Световой диаметр, мм .....	12	12	10÷12	—
Спектральный диапазон, мкм .....	0,6 ÷ 1,15	0,6÷1,15	0,9÷1,1; 1,2÷1,4	0,78÷1,6
Синусоидальная вибрация:				
амплитуда ускорения, g .....	30	30	Нет данных	3
амплитуда перемещения, мм .....	5	5	Нет данных	Нет данных
диапазон частот, Гц .....	5–2000	5–2000	Нет данных	Нет данных
Механический удар одиночного действия:				
пиковое ударное ускорение, g .....	15	15	Нет данных	до 50
Акустический шум:				
диапазон частот, Гц .....	50–10000	50–10000	50–10000	Нет данных
уровень звукового давления, дБ .....	150	150	150	Нет данных
Повышенная температура среды, К (°С):				Нет данных
в зоне объектива .....	923(+650)	923(+650)		273÷733 (0÷+500)
в зоне световода .....	623(+350)	623(+350)		273÷588 (0÷+315)
в зоне фотоэлектрического преобразователя без теплозащитного кожуха ..	353(+80)	353(+80)		273÷333 (0÷+60)
в зоне фотоэлектрического преобразователя с теплозащитным кожухом ..	393(+120)	393(+120)	393(+120)	273÷353 (0÷+80)
кратковременно .....	488(+215)	488(+215)	488(+215)	с охлаждающей пластиной

\* Достигается при использовании исходных образцовых средств метрологического обеспечения с доверительной погрешностью  $\pm 0,5$  К при доверительной вероятности 0,99.

\*\* Инструментальная погрешность.

технические характеристики образцов ОПП, сканирующего бихроматического пирометра разработки ВНИЦ ЦИАМ им. П. И. Баранова [9], предназначенного для использования в стендовых условиях, а также промышленного двухдиапазонного инфракрасного волоконно-оптического термометра М68Л [10] приведены в таблице.

Из анализа технических требований на ОПП, параметров экземпляров аналогичной зарубежной техники и пирометров общепромышленного применения можно отметить, что по значению основной инструментальной погрешности ОПП-94К, ОПП-82 близки к общепромышленным пирометрам, но существенно превосходят их по стойкости к эксплуатационным воздействиям. Учитыв-

вая особенности эксплуатации, требования со стороны системы регулирования, а также технические параметры образцов зарубежной техники, определяли основные проблемы и тенденции в разработке, совершенствовании технических параметров и функциональных возможностей ОПП. В частности,

• по конструкции оптического зонда:

- разработка термостойкой оптики (предлагается использование стойкой к воздействию температур окружающей среды в широком диапазоне (213 ÷ 923) К (–60 ÷ +650)°С),
- обеспечение герметичности конструкции оптического датчика,
- обеспечение вибростойкости,



- обеспечение стойкости к повышенному давлению окружающей газовой среды,
- обеспечение эффективного охлаждения, включая использование топлива для системы охлаждения,

- обеспечение эффективной системы обдува оптики для защиты оптики от закапчивания продуктами сгорания топлива,

- повышение ресурса оптического зонда ОПЗ;

- по техническим характеристикам ОПЗ:

- снижение основной инструментальной доверительной погрешности измерения температуры,

- обеспечение полосы пропускания от 0 частоты до 200 кГц,

- обеспечение стойкости электронной части датчика к воздействию температур окружающей среды в диапазоне  $(213 \div 398) \text{ K}$   $(-60 \div +125)^\circ \text{C}$ ,

- повышение ресурса ОПЗ.

Так, при использовании ОПЗ на гражданских самолетах типа ТУ-204, ИЛ-96-300 необходимым условием является повышение ресурса ОПЗ до значения гарантийной наработки не менее 5000 часов и назначенного ресурса не менее, чем 10000 часов.

Выполнение этого комплекса требований в условиях серийного выпуска и эксплуатации ОПЗ привело к необходимости разработки новых эффективных технических решений.

Цель разрабатываемых мероприятий может быть определена как отсутствие событий поставки и эксплуатации серийно выпускаемых ОПЗ в неработоспособном состоянии. Эксплуатация ОПЗ в неработоспособном состоянии обусловлена наличием вероятности события превышения основной инструментальной погрешности ОПЗ допускаемых пределов, что может быть определено как неконтролируемый метрологический отказ. Метрологический отказ может происходить, если инструментальная погрешность ОПЗ возросла вследствие действия технологических и эксплуатационных факторов, а также в результате стремления изготовителя к увеличению поля контрольного допуска, с которым сравниваются значения контролируемых параметров.

Анализ сложных эксплуатационных условий и требования к ОПЗ как к измерительному преобразователю обусловили его функциональную структуру.

ОПЗ представляет собой совокупность элементарных измерительных преобразовате-

лей, необходимых для преобразования потока излучения с излучающей поверхности ограниченной площади в выходное напряжение. Функциональная схема ОПЗ представлена на рис. 3. ОПЗ состоит из 2-х частей: оптической и электронной, представляющих собой неразъемную конструкцию.

Оптическая часть ОПЗ (оптический зонд) включает в себя:

- термостойкий объектив (О), выделяющий диафрагмой поля зрения участок поверхности лопатки турбины ГТД, с которого собирается излучение;

- гибкий волоконный световод (ГВС), помещенный в металлорукав, для транспортирования излучения с выделенного участка поверхности лопатки турбины ГТД;

- систему обдува (СО), создающую поток воздуха, обтекающего поверхность линзы и препятствующего закапчиванию оптики объектива продуктами сгорания топлива.

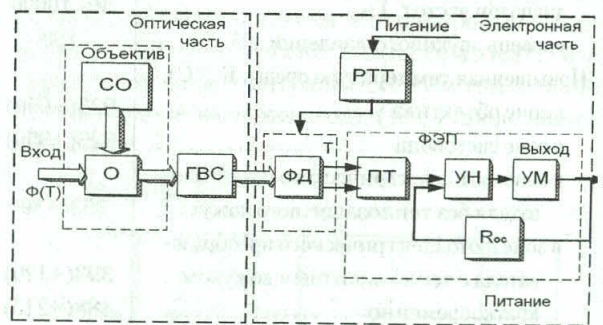


Рис. 3. Функциональная схема ОПЗ

Объектив включает в себя плосковыпуклую линзу с положительным фокусным расстоянием, апертурную диафрагму, узел крепления входного торца гибкого волоконного световода (ГВС), радиатор, узел крепления объектива к корпусу турбины. Лейкосапфировая линза объектива, совмещающая также и функцию защитного окна, запаяна припоем ПСР-72 во втулку-оправу, изготовленную из титана ОТ-4-1. Выбор материала линзы, втулки-оправы и применение уникальной технологии пайки обеспечивают создание герметичной конструкции оптического зонда ОПЗ. Разработанная конструкция обеспечивает герметичность объектива при рабочем давлении на линзу 2943 кПа  $(30 \text{ кгс/см}^2)$  в течение 2÷5 тысяч часов и более.

Поскольку лейкосапфир для производства линз в промышленности был применен впервые, для обеспечения процесса серийного изготовления лейкосапфировых линз была раз-



работана техническая документация на линзу 8Г7.520.004ТУ [11].

Введение ГВС в конструкцию ОПП позволяет размещать электронную часть в более благоприятной зоне, где уровень температуры и виброперегрузок несколько ниже, чем непосредственно на корпусе турбины ГТД. В связи с тем, что световоды, работающие в условиях вибраций и температур с уровнями воздействий, приведенными выше, серийно не выпускаются, необходимо было разработать специальный термостойкий гибкий волоконный световод и организовать его серийное изготовление [12, 13]. Разработанный специально для применения в ОПП гибкий волоконный световод ИАЖЮ.20037 0006 ТУ (АЦО.594.013ТУ) представляет собой жгут диаметром 1,5 мм и состоит из свободно уложенных волокон, имеющих коаксиальную структуру и изготовленных из совместимой пары силикатных стекол (до  $20 \cdot 10^3$  шт.) [14]. Для защиты от нежелательного воздействия внешней агрессивной среды ГВС помещен в герметичный, гофрированный металлорукав с бронированной оплеткой [15].

Электронная часть включает в себя фотоэлектрический преобразователь ФЭП и регулятор тока термостата (РТТ). ФЭП состоит из фотодиода (ФД), дифференциально подключенного к входу предварительного и широкополосного усилителей, охваченных глубокими отрицательными обратными связями. Широкополосный усилитель включает в себя усилитель напряжения (УН) и усилитель мощности (УМ).

Рассматривая последовательные преобразования потока излучения, падающего на объектив ОПП, в оптической и электрической части сигнала в электронной части, математическую модель для сигнала на выходе ОПП в каждой точке температурного диапазона можно представить в виде

$$U_{\text{опп}}(T) = KGS_{\lambda_{\text{max}}} \int_0^{\infty} \tau_{\alpha}(\lambda)\tau_{\beta}(\lambda)\tau_{\gamma}(\lambda) \times \\ \times P_c(\lambda)\varepsilon(\lambda T)b(\lambda T)\Psi(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $K$  — коэффициент передачи усилителя-преобразователя, имеющий физический смысл сопротивления и выраженный в Ом;  $G$  — коэффициент пропорциональности, связанный с геометрическими факторами;  $S_{\lambda_{\text{max}}}$  — монохроматическая чувствительность фотодиода в максимуме характеристики относительной спектральной чувствитель-

ности;  $\tau_{\alpha}(\lambda)$ ,  $\tau_{\beta}(\lambda)$ ,  $\tau_{\gamma}(\lambda)$  — коэффициенты пропускания оптической системы ОПП, торцов световода ОПП, входного окна фотодиода;  $P_c(\lambda)$  — коэффициент пропускания световода;  $\varepsilon(\lambda T)$  — излучательная способность излучающей полости модели АЧТ;  $b(\lambda T)$  — спектральная плотность энергетической яркости, излучаемой АЧТ;  $\Psi(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность фотодиода.

Минимизация основной инструментальной погрешности может быть обеспечена, в первую очередь, за счет ужесточения требований к компонентам ОПП, образующим цепь измерительных преобразователей, основным из которых является фотодиод.

Для повышения вероятности правильного контроля технического состояния ОПП в эксплуатации необходимо определить значения контрольных допусков при процедуре градуировки и поверки ОПП.

Наиболее существенными составляющими основной инструментальной погрешности ОПП являются:

$\delta T_y$  — погрешность, обусловленная влиянием параметров измерительной схемы;

$\delta T_{\lambda}$  — погрешность, обусловленная технологическим рассеянием спектральных характеристик фотоприемников;

$\delta T_M$  — погрешность, обусловленная наличием погрешности образцовых измерительных средств, используемых для градуировки ОПП.

Значение погрешности  $\delta T_y$ , связанной со схемной реализацией ОПП, можно представить в виде функции, зависящей от параметров отдельных элементов, смещения нуля усилителя, сопротивления резисторов в цепи обратной связи и дифференциального сопротивления фотодиода. Расчетная оценка этой составляющей погрешности определялась с доверительной вероятностью 0,99.

Значение погрешности ОПП  $\delta T_{\lambda}$ , связанной с технологическим рассеянием спектральной характеристики ОПП, определялось экспериментально-расчетным методом по измеренным спектральным характеристикам фотоприемников, использовавшихся в ОПП, и выборке экземпляров ОПП-32, ОПП-16, ОПП-94. Оценки этой составляющей погрешности  $\delta T_{\lambda}$  проведены с доверительной вероятностью 0,95.

Значение составляющей основной доверительной погрешности  $\delta T_M$ , связанной с погрешностью средств метрологического обес-



печения, определялось с доверительной вероятностью 0,95.

С учетом конкретных значений доверительных вероятностей, с которыми определялись значения составляющих основной инструментальной доверительной погрешности ОПП, ее абсолютное значение может быть с доверительной вероятностью 0,95 определено по зависимости

$$|\delta T_{\text{опп}}| = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\delta T_y\right)^2 + (2S_\lambda)^2 + \left(\frac{2}{3}\delta T_M\right)^2} + |\Delta_k|, \quad (2)$$

где  $\Delta_k$  — контрольный допуск, с которым сравнивается значение погрешности в процессе поверки.

Проведенные количественные оценки отдельных составляющих показывают, что наибольшее влияние на величину основной инструментальной погрешности оказывают составляющие  $\delta T_\lambda$ ,  $\delta T_y$ , связанные с параметрами фотодиода, в частности, вариации темнового тока и дифференциального сопротивления от номинальных значений в партии фотодиодов.

К техническим параметрам фотодиода предъявляется целый комплекс требований по дифференциальному сопротивлению, темновому току, интегральной чувствительности, а также эксплуатационным требованиям. В связи с отсутствием серийно выпускаемых фотодиодов, удовлетворяющих всему комплексу требований, впервые в стране была поставлена и решена задача разработки специализированного термостойкого кремниевого фотодиода ФД-293 («Полет-9») АДБ 368.245 ТУ [16] для применения в ОПП. В соответствии с разработанными техническими и эксплуатационными требованиями в специализированном для применения в ОПП фотодиоде были достигнуты уникальные параметры:

- темновой ток не более 500 нА при рабочей температуре 423 К;
- дифференциальное сопротивление не менее  $10^8$  Ом при температуре 283 К.

Интегральная чувствительность у фотодиодов ФД-293 примерно в 1,5 раза выше, чем у серийно выпускаемого фотодиода ФД-28КП.

Кроме того, обеспечивается стойкость фотодиода к воздействию эксплуатационных факторов (синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения до 30 г в диапазоне ча-

стот  $1 \div 2000$  Гц; рабочей температуры окружающей среды ( $213 \div 423$ ) К).

Проведенные расчетные оценки основной инструментальной доверительной погрешности ОПП при доверительной вероятности 0,95 показывают, что составляющие погрешности ОПП, связанные с параметрами фотодиода снижаются не менее чем в 2 раза.

На рис. 4 приведены фотографии разработанных во ФГУП «УНПП „Молния“» образцов оптических пирометрических преобразователей ОПП-94, ОПП-32.

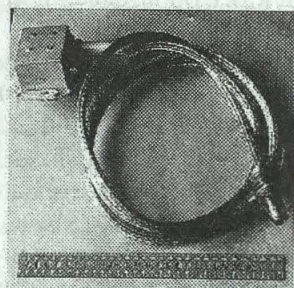
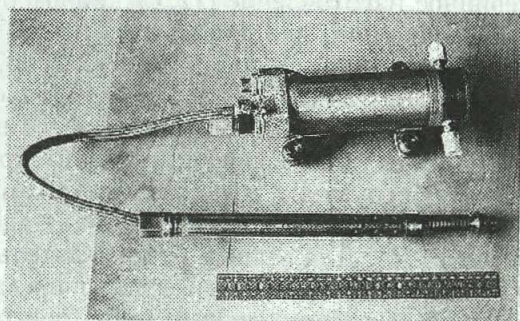


Рис. 4. Оптические пирометрические преобразователи для применения на борту самолетов: а — ОПП-32; б — ОПП-94К

В конструкциях ОПП-94К, ОПП-82, достигнутые технические характеристики которых приведены в таблице, применен специализированный фотодиод ФД-293.

Особо следует остановиться на рассмотрении погрешности метода при проведении измерений температуры лопаток турбины ГТД в условиях реальной эксплуатации. Методическая погрешность ( $\delta T_{\text{мет}}$ ) измерений температуры посредством ОПП обусловлена:

- изменением излучательной способности объекта излучения;
- смещением наиболее нагретого участка поверхности за пределы пятна визирования;
- изменением излучательной способности поверхности лопатки;
- влиянием сторонних излучателей, какими являются другие элементы конструкции ГТД;



– влиянием излучения промежуточной среды;

– влиянием ограничения потока излучения от объекта.

Модель методической погрешности достаточно подробно исследована в работе [17]. Метрологические характеристики методических погрешностей могут быть оценены методом математического моделирования для разных условий эксплуатации и разных типов двигателей и, соответственно, могут быть определены для конкретных ОПП при размещении их на ГТД различных типов.

## 2. СИСТЕМА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПП

Важнейшей задачей разработки ОПП является создание средств метрологического обеспечения. Для достижения требований по основной инструментальной доверительной погрешности ОПП в условиях производства и эксплуатации, обеспечения единства измерений и связи с государственным эталоном единицы температуры необходимо было не только создать средства метрологического обеспечения, но и разработать объединяющую их локальную поверочную схему [18].

В качестве средств метрологического обеспечения, воспроизводящих единицу температуры по излучению, было предложено применить модели абсолютно черных тел (АЧТ). Во главе локальной поверочной схемы находится исходное образцовое средство измерений: модель АЧТ типа ИТ-20, разработанная в ВНИИМ им. Д. И. Менделеева (С.-Петербург) [19], воспроизводящая единицу температуры в диапазоне  $973 \div 1673$  К с доверительной погрешностью  $\pm 3$  К при доверительной вероятности 0,99. Для переноса единицы температуры от исходных образцовых средств измерения к образцовым средствам измерений, которые используются непосредственно в производстве для выпуска ОПП, был применен групповой компаратор, элементами которого являлись образцы ОПП, проявившие долговременную стабильность параметров.

Для серийного производства ОПП используются образцовые модели АЧТ типа ИТО-1200М, которые воспроизводят единицу температуры в диапазоне  $973 \div 1323$  К с доверительной погрешностью  $\pm 6$  К при доверительной вероятности 0,99. Для проведения периодической поверки в условиях эксплуатации ОПП разработаны пульта контроля ПКП-32, ПКП-32М, которые воспроизводят единицу

температуры в точке 1273 К с доверительной погрешностью  $\pm 6$  К при доверительной вероятности 0,99.

Модели АЧТ ИТО-1200М и ПКП-32М были исследованы и аттестованы в ВНИИ «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» [20]. На рис. 5 представлены средства метрологического обеспечения для обеспечения серийного производства и эксплуатации ОПП.

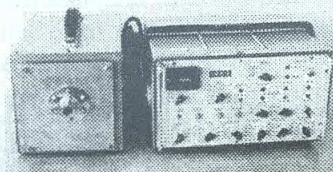
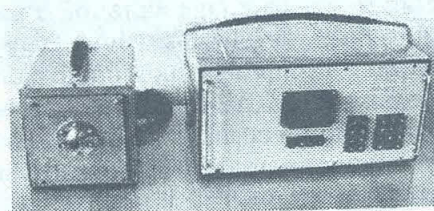
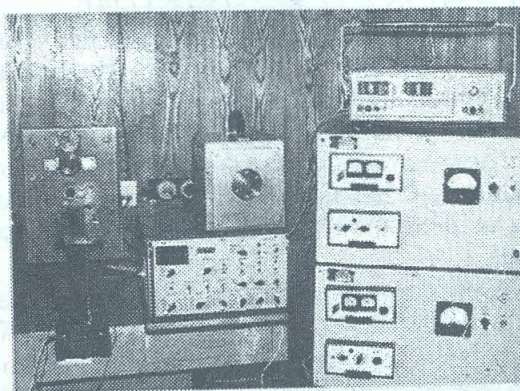


Рис. 5. Модели абсолютно черных тел:  
а — ИТО-1200М для условий производства;  
б — ПКП-32, ПКП-32М для эксплуатации

При использовании этих средств метрологического обеспечения достигается значение основной инструментальной доверительной погрешности ОПП  $\pm 12$  К при доверительной вероятности 0,95 при измеряемой температуре 1273 К.

В настоящее время, вследствие совершенствования эталонной базы страны — объединения специальных эталонов в единую поверочную схему «ГОСТ 8.558-93 Государственная поверочная схема для средств измерения температуры» [21], а также появления более совершенных средств измерений ранее разработанные поверочные схемы в значительной степени утратили свой метрологический статус. С целью дальнейшего снижения значения основной инструментальной доверительной погрешности ОПП в условиях серийного



производства предлагается система метрологического обеспечения выпуска и эксплуатации ОПП [22], включающая в себя:

- исходные образцовые меры единицы температуры, представляющие собой модели АЧТ и предназначенные для воспроизведения единицы температуры на точках затвердевания чистых металлов меди при  $t = 1084,62^\circ\text{C}$  ( $T = 1357,77\text{ K}$ ) [23] и серебра при  $t = 961,78^\circ\text{C}$  ( $T = 1234,93\text{ K}$ ) [24];

- образцовый пирометр — средство измерения I разряда, обладающее стабильными характеристиками (минимальными дрейфами) и спектральным диапазоном, идентичным спектральному диапазону ОПП, и предназначенный для переноса единицы температуры от исходной меры к образцовым средствам;

- образцовые средства измерений II разряда — модели АЧТ в диапазоне  $973 \div 1323\text{ K}$ ;

- оптический тестер для периодической проверки, калибрования параметров в ОПП эксплуатации на базе специальной галогенной лампы накаливания, излучение которой соответствует на определенном спектральном участке излучению АЧТ за счет применения в конструкции специально подобранных расчетно-экспериментальным методом светофильтров [25].

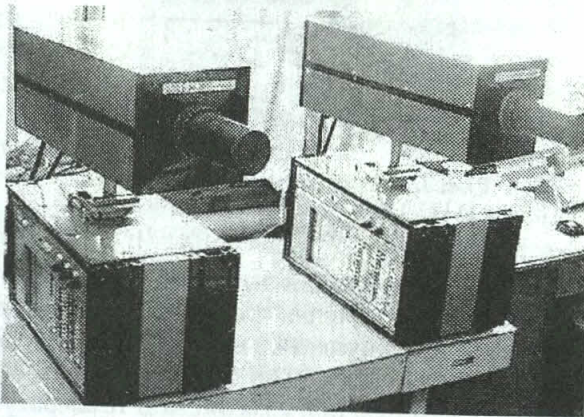


Рис. 6. Модели АЧТ для воспроизведения единицы температуры на точках затвердевания чистых металлов Си при  $t = 1084,62^\circ\text{C}$  ( $T = 1357,77\text{ K}$ ) и Ag при  $t = 961,78^\circ\text{C}$  ( $T = 1234,93\text{ K}$ ) (с характеристиками, близкими к рабочему эталону)

Модели АЧТ на точках затвердевания чистых металлов серебра и меди, разработанные и изготовленные в ВНИИ НП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (С.-Петербург), представлены на рис. 6. Каждая из этих моделей АЧТ содержит графитовый блок с излучающей полостью цилиндрической формы. Во-

круг излучающей полости в графитовом блоке имеется коаксиальная цилиндрическая полость, содержащая чистый металл: в одной модели АЧТ — серебро, в другой — медь. Нагревательный блок, располагается коаксиально поверх полости, содержащей чистый металл, и представляет собой печь сопротивления.

В процессе плавления или затвердевания чистых металлов, окружающих излучающую полость, в течение некоторого времени ( $\approx 20$  мин) температура полости поддерживается постоянной с доверительной погрешностью, не превышающей  $\pm 0,3\text{ K}$  при доверительной вероятности 0,99.

Локальная поверочная схема, объединяющая эти средства метрологического обеспечения, приведена на рис. 7.

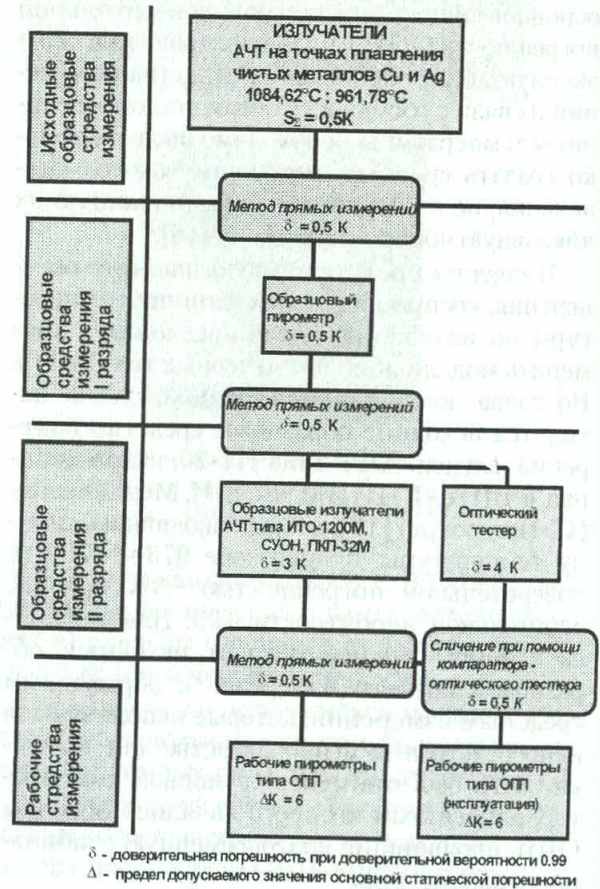


Рис. 7. Локальная поверочная схема, включающая в себя исходные образцовые средства метрологического обеспечения на точках плавления чистых металлов

Применение данной поверочной схемы и разработанных образцовых измерительных средств позволит обеспечить промышленный выпуск ОПП с основной инструментальной



доверительной погрешностью не более  $\pm 6$  К при доверительной вероятности 0,99.

### 3. АППАРАТУРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ОПТИЧЕСКИХ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Для обработки сигнала ОПП во ФГУП «УНПП „Молния“» был разработан комплекс аппаратуры, позволяющий получать информацию:

- о средней температуре лопаток рабочего колеса ротора турбины ГТД (средняя температура поверхности всех лопаток по траектории визирования);
- средней максимальной температуре лопаток (средняя температура поверхности кромок всех лопаток по траектории визирования);
- максимальной температуре отдельной лопатки (температура поверхности кромки одной наиболее нагретой лопатки).

Аппаратура обработки сигнала ОПП разработана в следующих модификациях.

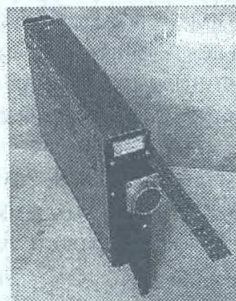
Блок БОС-32, который является бортовой аппаратурой обработки сигнала оптического пирометрического преобразователя ОПП-32 в реальном масштабе времени. Блок выдает достоверную информацию о текущих значениях средней температуры лопаток рабочего колеса ротора турбины ГТД, средней максимальной температуры лопаток. Блок БОС-32 взаимодействует с электронной системой управления и контроля ЭСУД-32, СКСУ-32.

Блок измерения и анализа сигнала оптического пирометра БИАСОП является наземной стендовой аппаратурой для обработки сигнала ОПП в реальном масштабе времени. Блок выдает достоверную информацию о текущих значениях средней температуры лопаток рабочего колеса ротора турбины ГТД, средней максимальной температуры лопаток, о максимальной температуре отдельной лопатки. БИАСОП является унифицированным блоком и совместим для работы с двигателями с различным числом рабочих лопаток. Блоком оснащены стенды ряда моторостроительных предприятий Перми, Самары, С.-Петербурга, Москвы, Запорожья. В конструкции блока реализован пакет из ряда изобретений [26–33].

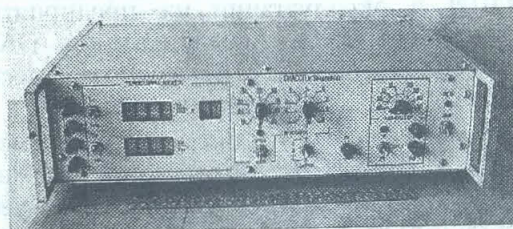
Образцы разработанной аппаратуры обработки сигнала приведены на рис. 8.

В настоящее время в России ОПП применяется в системе САУ ГТД на двигателе ПС-90А в качестве датчика первичной информа-

ции о температуре лопаток рабочего колеса турбины высокого давления на пассажирских самолетах Ил-96-300, Ту-204, Ил-76М. Разработанной аппаратурой обработки сигнала типа БИАСОП оснащен ряд моторостроительных конструкторских бюро.



а



б

Рис. 8. Аппаратура обработки сигнала ОПП: а – БОС-32; б – БИАСОП

Имеющаяся эксплуатация разработанных средств оптической пирометрии на ряде двигателей ПС-90А и стендов моторостроительных предприятий показывает:

- отдельные лидерные экземпляры преобразователей конструкции ОПП-94К имеют наработку, достигающую 3000÷4000 ч,
- отдельные образцы аппаратуры обработки сигнала имеют наработку до 8000 ч и практически не имеют замечаний по работе в эксплуатации.

### ВЫВОДЫ

1) В настоящее время во ФГУП «УНПП „Молния“» разработан комплекс средств оптической пирометрии, включающий в себя:

- первичные измерительные преобразователи температуры ОПП-32, ОПП-94К, ОПП-82;
- бортовые и стендовые блоки обработки сигнала оптических пирометрических преобразователей типа БОС-32, БИАСОП;
- средства метрологического обеспечения для производства и эксплуатации ОПП.

2) Разработанный комплекс средств оптической пирометрии может обеспечить проведение контроля и диагностики температуры лопаток рабочего колеса турбины высо-



кого давления ГТД в условиях испытательных стендов моторостроительных испытаний ОПП и эксплуатации в бортовых условиях.

3) Специализированный фотоприемник ФД-293 «Полет-9» АДБ 368.245 ТУ, локальные поверочные схемы с применением образцовых средств измерений (группового компаратора, образцового пирометра), система контрольных допусков использовались при промышленном выпуске и эксплуатации оптических пирометрических преобразователей ОПП-94, ОПП-94К (8Г2.823.015 ТУ), ОПП-82 (8Г2.823.016 ТУ) на предприятии ФГУП «УНПП „Молния“». Результаты работы внедрены в эксплуатационных документах, руководстве по эксплуатации (8Г2.823.015РЭ), применяемых при контроле ОПП в эксплуатации на предприятиях-заказчиках ОАО «Авиадвигатель», ОАО «Пермские моторы», ТМКБ «Союз» (Москва), СНТК им. Н. Д. Кузнецова (Самара).

4) Дальнейшие усилия разработчиков средств оптической пирометрии должны быть сосредоточены в первую очередь на увеличении гарантийного и назначенного ресурса оптических пирометрических преобразователей. При этом должны быть решены проблемы повышения стойкости оптической части (в частности, гибкого волоконного световода) к механическим воздействиям, а также проблемы снижения закапчивания оптики продуктами сгорания топлива за счет повышения эффективности системы обдува оптики.

5) По разработке аппаратуры обработки сигналов необходимо сосредоточить усилия на создании интегрированной аппаратуры, включающей в себя функции первичного преобразователя температуры и аппаратуры обработки сигнала, также на совершенствовании программных и аппаратных методов фильтрации помех, возникающих от появления в поле визирования ОПП сажистых частиц от сгорания топлива (однополярных помех).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Заказы** на оптические датчики // Срочная информация. М.: ЦИАМ, 1978. № 2. С. 12–14.
2. **Метод** контроля температуры лопаток ГТД // Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 1977. № 24 (645). С. 15–16.
3. **Оптический** пирометр для измерения лопаток турбины ГТД // Срочная информация. М.: ЦИАМ, 1980. № 51. С. 3–4.
4. **Curwen K. R.** Turbine blade pyrometer system in the control of concorde engine // Instrumentation for Airbreathing Propulsion. 1978. V. 34. P. 399–406.
5. **Curwen K. R.** Turbine blade radiation pyrometer system // Aircraft Engineering. 1972. No 12. P. 369–377.
6. **Kats R.** Experiences in the design and application of turbine blade pyrometers // Instrumentation for Airbreathing Propulsion. 1978. V. 34. P. 410–418.
7. **Walters S.** New instrumentation for advanced turbine research // Mechanical Engineering. 1983. V. 105, No 2. P. 43–51.
8. **ОСТ 1.0404-86.** Преобразователи оптические пирометрические для бесконтактного измерения температуры поверхности лопаток турбины газотурбинных двигателей. Параметры, размеры и технические требования. Введ. 1986. 15В.
9. **Специальные** методы измерения, применяемые в ЦИАМ. Отдел измерительной техники и метрологии // Центральн. ин-т авиацион. моторостроения им. П. И. Баранова. М., 2002. 36 с.
10. **Инфракрасные** бесконтактные пирометры // Эталон прибор. Челябинск, 2000. 128 с.
11. **ТУ 8Г7.520.004.** Линза лейкосапфировая. Введ. 01.06.85. 32 с.
12. **Волоконные** световоды для применения в оптическом пирометрическом преобразователе: Отчет ОКР / УАКБ «Молния»; Рук. В. Н. Еремин. ГР № Е28840. Уфа, 1981. 55 с.
13. **Андреева Т. П., Валиуллина М. Ш., Губайдуллин И. Т.** Требования и особенности применения гибких волоконных световодов в конструкциях бесконтактных датчиков — оптических пирометрических преобразователей // Устройства обработки оптических сигналов. Волоконно-оптические датчики различных физических величин: Матер. V Всесоюзн. конф. ВОСПИ-88. М., 1988. Ч. 5. С. 130–133.
14. **ТУ ИАЖЮ.20037 0006 (АЦО.593.013ТУ).** Жгут волоконно-оптический термостойкий. Введ. 01.01.91. 24 с.
15. **ТУ 8Д4.48.466.** Рукав. Введ. 01.06.85. 14 с.
16. **ТУ АДБ № 368.245.** Фотодиод ФД-293. Введ. 01.01.89. 45 с.
17. **Уразбахтин Р. Н.** Модели и средства информационной обработки для построения оптических пирометрических систем измерения температуры лопаток ГТД: Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1996. 167 с.
18. **Андреева Т. П., Исанин В. Г., Чистяков В. А.** Метрологическое обеспечение производства и эксплуатации пирометров типа ОПП // Авиационная промышленность. 1989. № 6. С. 66–67.
19. **Установки** с излучателями типа черного тела для проверки пирометров в диапазоне температур 573–2773К / Г. С. Амброк, Ю. Д. Бароненкова, Н. Л. Гоголев и др. // Методы и средства оптической пирометрии. М.: Наука, 1983. С. 93–102.



20. **Исследование** пирометров типа ОПП, образцовых излучателей, предназначенных для градуировки и поверки пирометров, и разработка методики их аттестации и поверки: Отчет о НИР / НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»; Рук. Б. Н. Олейник. ГР № 01850027231. Л., 1986. 55 с.
21. **ГОСТ 8.558-93.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема измерений температуры. Введ. 1993.
22. **Андреева Т. П., Камалов В. М., Гоголев Н. Л.** Комплексная система метрологического обеспечения промышленного производства и эксплуатации оптических пирометрических преобразователей для измерения температуры поверхности рабочих лопаток турбины газотурбинных двигателей // Двигатели XXI века: Матер. междунар. науч. конф. М.: ЦИАМ, 2000. Ч. 1. С. 389–391.
23. **Техническое** описание и инструкция по эксплуатации Хд 2.991.024 ТО. Исходная образцовая мера температуры затвердевания меди  $t = 1084,62^{\circ}\text{C}$  ( $T = 1357,77\text{ K}$ ) типа РЭИ АЧТ Медь / НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». 1992. 20 с.
24. **Техническое** описание и инструкция по эксплуатации Хд2.991.024 ТО. Исходная образцовая мера температуры затвердевания серебра при  $t = 961,78^{\circ}\text{C}$  ( $T = 961,78\text{ K}$ ) типа РЭИ АЧТ Серебро / НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». 1992. 20 с.
25. **Коган А. В.** Градуировка и поверка пирометров излучения для близкой инфракрасной области спектра по температурным лампам // Измерительная техника. 1976. № 4. С. 53–55.
26. **А. с. 1205653** (СССР). МКИ G01J 5/14. Способ измерения температуры лопаток ротора ГТД и устройство для его осуществления / В. В. Дунаев, И. Т. Губайдуллин, М. Т. Валеев и др. Заявл. 27.12.83; Оpubл. в Б. И. 15.01.86. Бюл. № 2.
27. **А. с. 1415871** (СССР). МКИ G01J 5/06. Способ измерения средней температуры лопаток турбины газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления / В. В. Дунаев, И. Т. Губайдуллин, М. Т. Валеев и др. Заявл. 02.10.85; Оpubл. в Б. И. 7.08.88. Бюл. № 29.
28. **А. с. 1450469** (СССР). МКИ F01D 25/00. Устройство для контроля температуры рабочих лопаток газовой турбины / В. А. Шипигусев, В. С. Литвинов, Ю. Н. Марфин и др. Заявл. 4.11.85; Оpubл. в Б. И. 7.01.89. Бюл. № 1.
29. **А. с. 1452256** (СССР). МКИ F01D 19/00. Устройство для контроля температуры рабочих лопаток газовой турбины / А. Н. Саженков, М. М. Ханнанов, В. А. Шипигусев и др. Заявл. 2.07.87; Оpubл. в Б. И. 15.01.89. Бюл. № 2.
30. **А. с. 1485758** (СССР). МКИ G01 J19/00. Устройство для измерения температуры лопаток газотурбинного двигателя / М. М. Ханнанов, В. В. Дунаев, М. Т. Валеев и др. Заявл. 31.08.87; Оpubл. в Б. И. 7.06.89. Бюл. № 21.
31. **А. с. 1473490** (СССР). МКИ G01 J5/14. Способ измерения температуры лопаток ротора турбины и устройство для его осуществления / М. М. Ханнанов, М. Т. Валеев, И. Т. Губайдуллин и др. Заявл. 15.09.86; Оpubл. в Б. И. 15.05.89. Бюл. № 14.
32. **А. с. 1609276** (СССР). МКИ G01 J5/14. Способ измерения температуры лопаток ротора газотурбинного двигателя / И. Т. Губайдуллин и др. Заявл. 07.09.88; Оpubл. в Б. И. 23.11.90. Бюл. № 43.
33. **А. с. 1745052** (СССР). МКИ G01 J5/14. Способ измерения частоты электрического сигнала и устройство для его осуществления / Губайдуллин И. Т. и др. Заявл. 14.12.88; Оpubл. в НПО «Поиск». 30.06.92. Бюл. № 24.

#### ОБ АВТОРЕ

**Андреева Татьяна Петровна**, нач. сектора ФГУП «УНПП «Молния». Дипл. физик (ЛГУ, 1970). Канд. техн. наук по элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 2002). Исследования и разработки в области оптической пирометрии, метрологии.

