

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В АВИАЦИОННЫХ ГТД

Новосадов Д.А.<sup>1</sup>, Загадов И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский университет, г. Самара, [novdaniil2001@gmail.com](mailto:novdaniil2001@gmail.com)

*Ключевые слова:* измерение температуры, пирометрия, термокраска, монокристаллические датчики температуры (ИМТК), термографические люминофоры, стеклокерамические решетки

В горячей части современных авиационных двигателей температуры достигли значений близких или превышающих температуру плавления жаропрочных сплавов на никелевой основе. Исходя из этого необходимо крайне точно измерять температуру самых теплонагруженных элементов конструкции, таких как: жаровая труба, рабочие и сопловые лопатки, диски и т. д. В данной работе рассмотрены перспективные системы мониторинга температуры, которые применяются в авиационных ГТД.

В настоящий момент существует два типа систем для определения температуры: измерения в реальном времени приведены в табл.1 (онлайн системы) и автономные системы приведены в табл.2. Онлайн системы позволяют измерять параметры рабочего тела в процессе работы двигателя. Главным недостатком является получение только точечных результатов или необходимости в оптическом доступе, который не всегда можно обеспечить в стесненных условиях ГТД. Автономные системы, напротив, позволяют получать температурное состояние всей исследуемой поверхности, но только на максимальных режимах работы. Главным недостатком автономных систем является необходимость разборки изделия для получения результатов.

Табл.1. Сравнение автономных методов [1]

Метод	Диапазон температур (°C)	Точность измерения (°C)	Пространственное разрешение
ИМТК	До 1400	±10	Низкое
Металлургические датчики температуры	До 650	15-25	Низкое (одиночные точки)
Стеклокерамические решетки	1100	Неизвестна	Низкое
Термочувствительные краски	До 1500	10-100	Умеренное
Термоисторические краски	150-1400	±5	Высокое

Табл.2. Сравнение онлайн методов [1]

Метод	Диапазон температур (°C)	Точность измерения (°C)	Пространственное разрешение
Термопары	До 1200	±5	Низкое
Пирометрия	500-2000	0,3	Низкое
Термочувствительные краски	Не более 200	1-5	Высокое
Термографические люминофоры	До 1600	1-5	Высокое

Далее будем рассматривать только те методы, которые используются в авиационной отрасли. Принцип работы термокраски заключается в разложении кристаллической решетки вследствие высоких температур и в последующем изменении ее цвета. Изменение цвета происходит в следствие как воздействия температуры, так и его продолжительности, что является большим недостатком в связи с невозможностью определения температуры при длительных испытаниях (рис.1)

Термоисторические краски являются прямым продолжением термокрасок и отличаются от них тем, что имеют более высокую точность и могут использоваться при длительных испытаниях (рис.2) [2]. Данная особенность полностью нивелирует недостатки термокрасок, что позволяет использовать эти покрытия совместно с онлайн методами при длительных испытаниях.

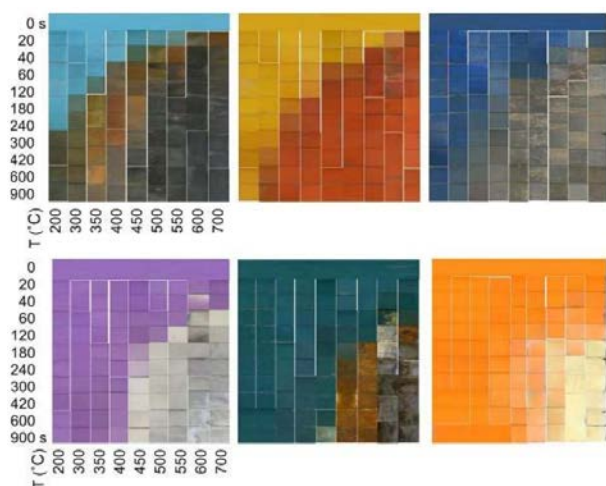


Рис. 1 – Изменение цвета однофазных термокрасок марки SC



Рис. 2 – Структура термоисторической краски после 50 часовых испытаний

Монокристаллические датчики температуры (ИМТК) разработаны для более точного измерения температурного градиента на сопловых аппаратах турбины по сравнению с красками. Принцип работы заключается в изменении электрического сопротивления в зависимости от температуры, на основании которого определяется температура потока. Точность метода составляет  $\pm 5^\circ\text{C}$  до температуры  $1400^\circ\text{C}$  [3].

Среди онлайн методов можно выделить пирометрию, имеющую наиболее широкий температурный диапазон и высокую точность измерения. Однако, использование пирометров в ГТД затруднительно в связи с их габаритными размерами, необходимости подвода охлаждения, а также высокой стоимости. Работа пирометров основана на законах Планка и Вина [4], которые описывают свойства теплового излучения абсолютно черного тела. Принцип работы заключается в фиксации теплового излучения от поверхности элемента, которое передается на детектор с помощью оптоволоконна. Детектор формирует электрический сигнал пропорциональный исследуемой поверхности.

Несмотря на все недостатки и трудности в использовании, пирометры являются информативным методом, так как с их помощью измеряется температура большей части поверхности в реальном времени без внесения изменений в материальную часть. Также на основании полученных результатов есть возможность строить температурные карты [5].

Далее рассмотрим термопары как наиболее используемый способ замера температуры в настоящее время. Они обладают неоспоримыми преимуществами, среди которых простота использования, дешевизна и широкий диапазон температур. Большая номенклатура термопар [5] позволяет использовать их в различных условиях без значительных материальных затрат. Однако, они имеют серьезные недостатки: определение температуры в одной точке, необходимость в подготовке большого количества деталей, использование дорогостоящего оборудования (токосъемников) при подготовке деталей ротора.

Термографические люминофоры являются самым молодым методом в исследовании температуры лопаток ГТД. Они представляют собой материалы, которые способны изменять свои оптические свойства от температуры. Люминофоры возбуждаются лазерным излучением, что вызывает их свечение в определенном спектре. Индикация температуры возможна благодаря изменения интенсивности спектра или времени затухания люминесценции. Ключевым преимуществом является возможность легирования ТЗП с

помощью люминофор [7] и, как следствие, измерение температуры как подложки, так и поверхности изделия. Стоит отметить, что для получения результатов необходимо использовать оптическую систему, что несет за собой недостатки, указанные в пирометрах.

Анализируя вышесказанное можно отметить, что нет идеального средства замера температуры, которое обеспечивало бы все потребности при испытаниях авиационных ГТД. Однако, явно видно развитие в этом направлении, так как устаревшие методы эволюционируют и избавляются от своих недостатков, что отчетливо видно на примере термокрасок. Также можно отметить эффективную синергию некоторых методов, так термографическая люминофора, легированная в ТЗП, позволяет калибровать пирометры в реальном времени. На основании информации, представленной в данной работе, будет проведено наглядное сравнение методов на примере отсека камеры сгорания малоразмерного газотурбинного двигателя.

### **Список литературы**

1. Yule L., Zaghari B., Harris N., Hill M. Surface temperature condition monitoring methods for aerospace turbomachinery: exploring the use of ultrasonic guided waves // *Measurement Science and Technology*. – 2021. – Vol. 32. – P. 052002.
2. Pilgrim C. C., et al. Surface temperature measurements in an industrial gas turbine using thermal history paints // *12th European Conference on Turbomachinery, Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC 2017)*. – 2017. – P. 1–13.
3. Церетели А. А., Ельшин А. А. Определение температуры рабочего тела в турбине с помощью монокристаллического измерителя максимальной температуры // *Авиационные двигатели*. – 2019. – № 2(3). – С. 31–38.
4. Minkina W., Dudzik S. *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. – Chichester: Wiley, 2009.
5. Li D., et al. Turbine blade temperature error as measured with an optical pyrometer under different wavelengths and blade TBC thickness // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58. – P. 1626.
6. Sentek [Электронный ресурс] : официальный сайт кабельного завода / ООО «Сигнум». – Режим доступа: <https://sentek.ru/> (дата обращения: 23.04.2025).
7. Yañez Gonzalez A., et al. On-line temperature measurement inside a thermal barrier sensor coating during engine operation // *Journal of Turbomachinery*. – 2015. – Vol. 137. – P. 1–9.

### **Сведения об авторах**

Новосадов Данил Алексеевич, лаборант-исследователь ИЦ-206 Самарского университета. Область научных интересов: стенды для испытания авиационных ГТД.

Загадов Илья Александрович, лаборант-исследователь ИЦ-206 Самарского университета. Область научных интересов: уплотнительные системы авиационных ГТД.

## **PROMISING TEMPERATURE MEASUREMENT TECHNOLOGIES FOR AVIATION GAS TURBINE ENGINES**

Novosadov D.A. Zagadov I.A.

Samara National Research University, Samara, Russia, [novdani2001@gmail.com](mailto:novdani2001@gmail.com)

The paper reviews advanced temperature measurement methods for the hot section of aviation gas turbine engines. Real-time and autonomous systems are considered, including thermal paints, pyrometers, thermocouples, and thermographic phosphors. Key advantages, limitations, and potential combined use are discussed, with focus on applicability in confined engine environments