

Определение температуры рабочего тела в турбине с помощью монокристаллического измерителя максимальной температуры

Церетели А.А., Ельшин А.А.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: aaelshin@ciam.ru

Представлены результаты экспериментального исследования по отработке методики измерения температуры газа в относительном движении в турбине с помощью датчиков монокристаллического измерителя максимальной температуры с учетом поправок на неполное торможение потока. Исследования выполнены в рамках испытаний газогенератора ЦИАМ. Статья носит методический характер.

Ключевые слова: измеритель кристаллический, максимальная температура, неполное торможение, турбина.

Gas temperature measurement on turbine core by using maximum temperature crystal meter

Ceretely A.A., Elshin A.A.

CIAM, Moscow

The article is methodical. It represents the results of experimental study on the development of methods for gas temperature measurement at relative stream on turbine core by using maximum temperature crystal meter. The study also contains corrections that take into account partial flow stagnation. The research was conducted within CIAM gas generator testing.

Keywords: crystal meter, maximum temperature, partial stagnation, turbine.

Введение

При разработке высокотемпературных турбин перспективных газотурбинных двигателей критически важно учитывать реальную температуру газа в турбине. В настоящее время она определяется преимущественно расчетным путем, что не всегда обеспечивает надлежащую точность из-за потерь, утечек и т.д. Более достоверную информацию можно получить путем измерения температуры газа в относительном движении, однако проведение таких измерений осложнено ограниченностью пространства, высокими температурами, агрессивной средой, высокими скоростями вращающихся деталей, а также необходимостью обеспечения надежной работы во время измерений. Для таких сложных условий может быть применен метод ИМТК (измеритель максимальной температуры монокристаллический) [1], разработанный в НИЦ «Курчатовский институт». Например, в работе [2] описано использование

этого метода для измерения температуры поверхности, нагретой потоком плазмы. В авиакосмической отрасли метод ИМТК был использован при термометрировании теплозащитного покрытия моделей многоцветного корабля «Буран» во время испытаний в космосе [3]. Компания «Siemens» применяла данный метод при модернизации газовых турбин серии GTX-100 [4].

Настоящая статья носит методический характер; в ней представлена методика и результаты измерения температуры торможения газа в относительном движении T_w^* в межлопаточном пространстве турбины при помощи ИМТК. Исследование выполнено в рамках испытаний газогенератора (ГГ) ЦИАМ.

Расположение датчиков ИМТК на рабочих лопатках турбины показано на рис. 1. Датчики из монокристалла карбида кремния размером 0,2×0,2×0,2 мм заделаны с помощью специального термоцемента в торцевой поверхности керамических трубок диаметром 1,1 мм. Трубки проходят сквозь тело лопатки

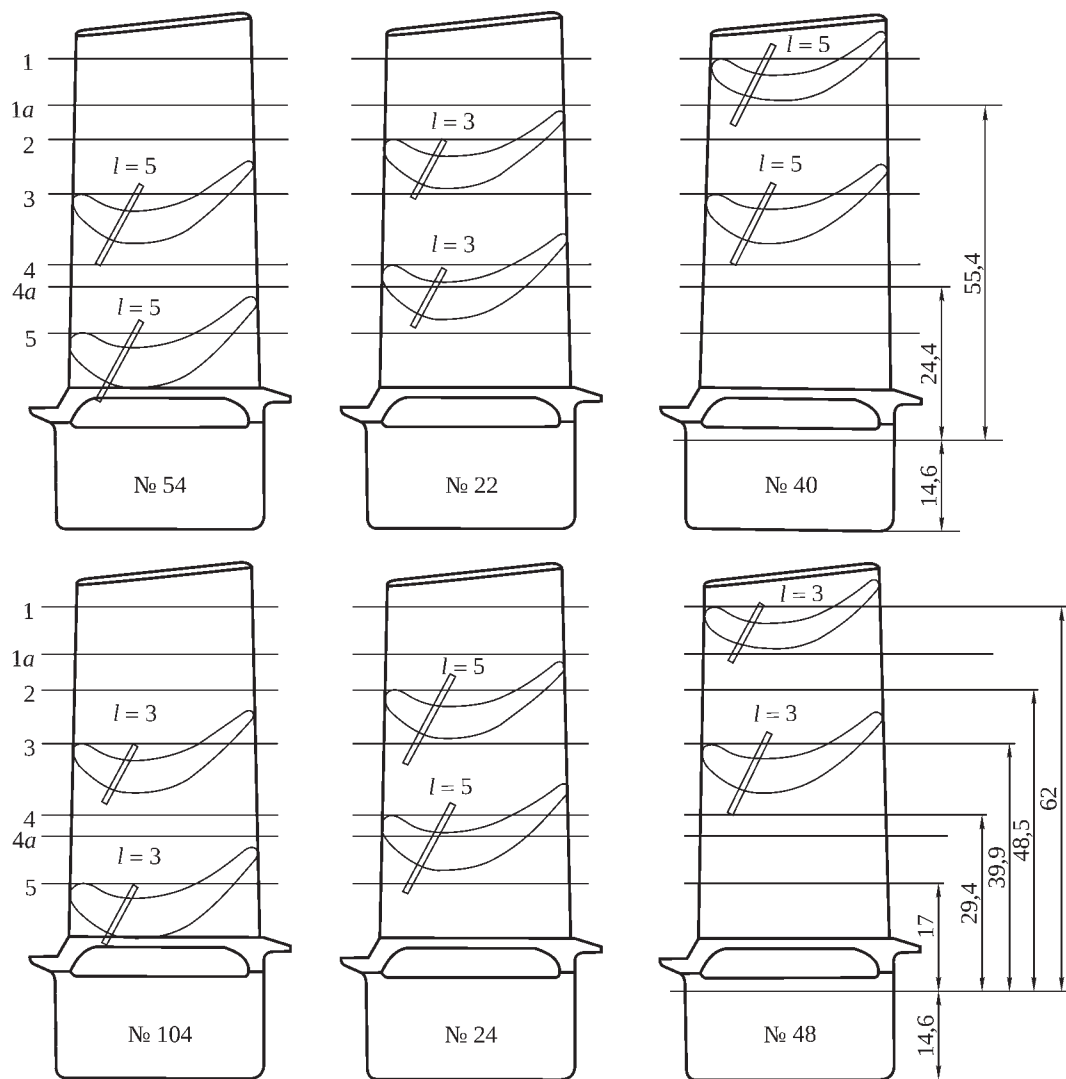


Рис. 1. Расположение датчиков ИМТК на рабочих лопатках турбины с указанием номеров радиальных сечений $N_{\text{сеч}}$



Рис. 2. Фотографии рабочих лопаток с датчиками ИМТК

на расстоянии $\sim 1/3$ хорды от входной кромки и выступают в поток на расстояние 3 или 5 мм от поверхности спинки и корыта в зависимости от варианта препарировки (рис. 2). Отверстия для керамических трубок выполнены так, чтобы не повредить внутренние штырьки и рассекатели в системе охлаждения лопатки. Трубки зафиксированы в теле лопатки термоцементом.

Лопатки препарированы в пяти сечениях по высоте (на каждой лопатке – по два измеряемых сечения) для получения радиального поля температуры T_w^* .

Режимы работы ГГ определены согласно требованиям из [1, 5]; параметры режимов указаны в табл. 1.

Результаты измерения температуры T_w^*

Измерение температуры газа T_w^* датчиками ИМТК осуществлялось на стационарном режиме работы ГГ при оборотах $n = 9340 \dots 9365$ об/мин. Время выдержки на режиме составило 900 с; суммарная наработка ГГ с датчиками ИМТК – 57 мин (табл. 2).

Для надежности измерений последовательно испытано два комплекта по три лопатки с датчиками ИМТК, дублирующими друг друга. После испытаний датчики ИМТК демонтированы с лопаток и в соответствии с методикой [1, 5] проведена расшифровка их показаний, результаты которой представлены на рис. 3. Значения температуры торможения газа в относительном движе-

Таблица 1. Параметры работы газогенератора

№ испыт.	№ режима	n , об/мин	$n_{пр}$, об/мин	T_1^* , К	P_1 , кгс/см ²	P_1^* , кгс/см ²	T_2^* , К	$T_{2пр}^*$, К	P_2^* , кгс/см ²	π_k^*	$\pi_{к.пр}^*$	G_B , кг/с	$G_{в.пр}$, кг/с	P_G^* , кгс/см ²	$G_{в.кв}$, кг/с	$G_{Г^*}$, кг/с	$G_{Г^*}$, кг/с	q	$T_{Г.рас}^*$, К
1	1	7263	7276	287	0,980	1,023	441	443	3,405	3,328	3,320	16,76	16,88	3,319	14,42	0,207	14,63	0,014	931
	2	9365	9381	287	0,921	1,023	562	564	6,295	6,153	6,134	24,91	25,08	6,137	21,99	0,501	22,50	0,023	1345
	3	9365	9381	287	0,920	1,023	562	564	6,275	6,134	6,115	25,02	25,18	6,118	21,81	0,506	22,32	0,023	1359
	4	7263	7276	287	0,980	1,023	447	449	3,515	3,436	3,422	18,50	18,60	3,427	15,34	0,196	15,54	0,013	879
2	1	7100	7292	273	0,990	1,033	433	457	3,485	3,373	3,200	16,76	16,97	3,398	15,22	0,196	15,42	0,013	878
	2	9342	9595	273	0,940	1,033	548	578	6,365	6,161	5,728	24,65	23,96	6,206	22,34	0,510	22,85	0,023	1334
	3	9342	9595	273	0,929	1,033	548	578	6,365	6,161	5,728	25,90	25,17	6,206	22,33	0,510	22,84	0,023	1335
	4	9342	9595	273	0,928	1,033	548	578	6,395	6,190	5,754	26,01	25,28	6,235	22,48	0,510	22,99	0,023	1329
	5	7240	7436	273	0,989	1,033	439	463	3,575	3,460	3,280	17,42	16,93	3,485	15,96	0,191	16,15	0,012	842

Таблица 2. Время наработки газогенератора на различных режимах его работы

№ испытаний	Время, с						
	Выход на МГ	Работа на МГ	Выход на стационарный режим	Работа на стационарном режиме	Переход на МГ	Работа на МГ	Останов
1	150	152	128	900	13	253	80
2	170	192	134	900	19	242	88

нии T_w^* по показаниям датчиков ИМТК на вогнутой (корыто) и выпуклой (спинка) сторонах лопаток существенно различаются, при этом разница температур возрастает при приближении к периферии лопатки.

Различие температур на корыте и спинке объясняется эффектами сегрегации температурных полей за охлаждаемым сопловым аппаратом. Холодные струйки от соплового аппарата из-за нестационарных эффектов мигрируют к стороне разрежения (спинке), что служит причиной более низкой температуры газа с этой стороны, чем со стороны корыта. Для среднего сечения разница температур составляет $\Delta T \approx 45^\circ\text{C}$, для периферийного сечения $\Delta T \approx 120^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что показания датчиков ИМТК, установленных в сходственных точках на расстоянии 3 и 5 мм от поверхности лопатки, хорошо согласуются между собой, что свидетельствует о незначительном влиянии теплоотвода по керамической трубке.

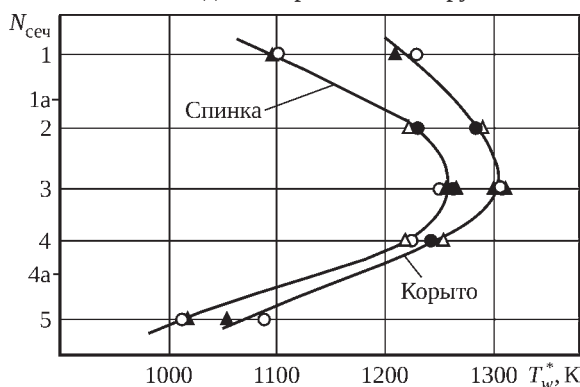


Рис. 3. Эпюра температуры газа в межлопаточном пространстве, измеренной на рабочих лопатках ГГ датчиками ИМТК:

испытание №1: Δ – $l = 3$ мм; \blacktriangle – $l = 5$ мм;
испытание №2: \circ – $l = 3$ мм; \bullet – $l = 5$ мм

Результаты измерения температуры T_w^* с учетом коэффициента восстановления на термоприемнике

При измерении температуры высокоскоростного газового потока необходимо учитывать коэффициент восстановления полной температуры потока на термоприемнике [6]. Торможение газа на конце керамической трубки с датчиком ИМТК является неполным, следовательно, температура по показаниям датчика меньше, чем истинная температура торможения в потоке. Степень восстановления температуры при торможении движущегося газа на конце термоприемника характеризует коэффициент восстановления. Тогда полная температура потока в относительном движении T_w^* может быть определена из соотношения

$$T_w^* = \frac{T_{зам}^*}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 (1-n)}, \quad (1)$$

где $T_{зам}^*$ – замеренное датчиком значение полной температуры; k – показатель адиабаты ($k = 1,33$); λ – относительная скорость потока в точке расположения датчика; n – коэффициент восстановления датчика. Таким образом, зная скорость набегающего на датчик потока и коэффициент восстановления термоприемника, можно определить истинное значение полной температуры газового потока.

Согласно [6] коэффициент восстановления зависит от профиля термоприемника, режима течения и физических свойств среды. Поскольку в литературе отсутствуют данные для определения зависимости коэффициента восстановления термоприемника с датчиком ИМТК от режима течения и угла набегающего потока,

то для установления этой зависимости было проведено отдельное экспериментальное исследование. Изготовлен термоприемник из двух керамических трубок, идентичных по размерам трубкам препарировки лопаток газогенератора. Длина вылета одного приемника 5 мм, другого, повернутого относительно первого

на 180° , – 3 мм. В торцы трубок с помощью термоцемента заделаны спаи микротермопар типа ХА-0,1. Термоприемник установлен на оси в аэродинамической трубе и во время испытаний поворачивался с помощью координатника на угол 360° и обратно с шагом 10° .

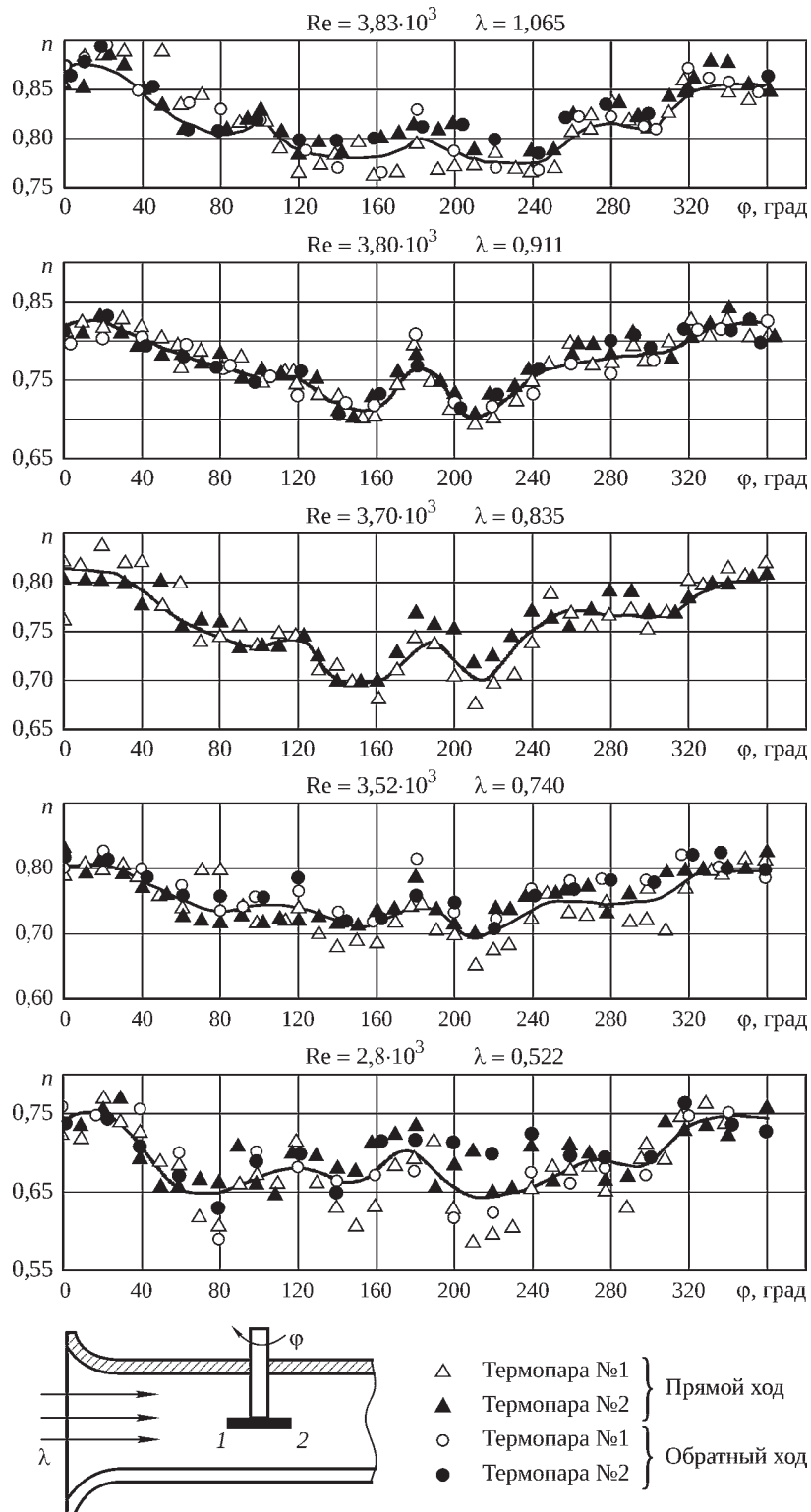


Рис. 4. Зависимость коэффициента восстановления n термоприемника от скорости и угла набегающего потока

Коэффициент восстановления термоприемника при различных скоростях и углах набегающего потока определялся отношением:

$$n = \frac{T_{\text{зам}}^* - T}{T^* - T} \quad (2)$$

где $T_{\text{зам}}^*$ – замеренная термоприемником полная температура потока; T^* – полная температура потока; T – статическая температура потока в точке расположения термоприемника, $T = \tau T^*$; $\tau = f(\lambda)$ [7].

Значения коэффициента восстановления термоприемника, полученные при испытаниях, представлены на рис. 4. При увеличении скорости потока λ и постоянном угле набегающего потока коэффициент восстановления увеличивается. Так, при $\varphi = 0$ при изменении λ от 0,522 до 1,065 коэффициент восстановления возрастает от 0,75 до 0,89. При $\lambda = \text{const}$ коэффициент восстановления уменьшается при увеличении угла набегающего потока на термоприемник.

При обработке результатов экспериментов на лопатках ГГ направление скорости потока, набегающего на датчики ИМТК, принято по касательной к профилю лопатки в точке расположения датчика. Распределение углов набегающего потока по высоте лопатки представлено на рис. 5: на спинке лопатки углы лежат в диапазоне $80 \dots 102^\circ$, на корыте – $100 \dots 124^\circ$. Как свидетельствуют данные рис. 4, в указанных диапазонах изменения угла набегающего потока коэффициент восстановления термоприемника меняется незначительно. Основное изменение коэффициента восстановления наблюдается при изменении скорости потока, натекающего на датчик.

Для определения скорости λ в межлопаточном канале для каждого сечения рабочей лопатки, в котором расположены термодатчики, решены уравнения Эйлера. В качестве примера на рис. 6 показаны линии постоянной скорости в сечении 1 для $\lambda_r = 0,83$.

Зная скорость потока в месте расположения термоприемника (рис. 7), можно определить поправку к температурам, замеренным датчиками ИМТК, на неполное торможение потока на датчиках. После несложных преобразований с учетом (1) поправку полной температуры потока можно представить в виде:

$$\Delta T_w^* = T_w^* - T_{\text{зам}}^* = \frac{T_{\text{зам}}^* \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 (1-n)}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 (1-n)} \quad (3)$$

Значения поправок температуры ΔT_w^* на неполное торможение потока для каждого датчика ИМТК, рассчитанные по формуле (3) с учетом значений λ в точке расположения датчика, представлены на рис. 8. Величина поправки ΔT_w^* зависит от места расположе-

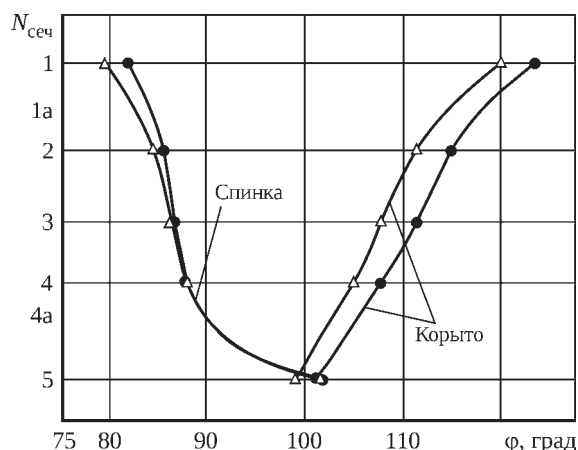


Рис. 5. Распределение углов набегающего потока по высоте лопатки:
 Δ – $l = 3$ мм; \bullet – $l = 5$ мм

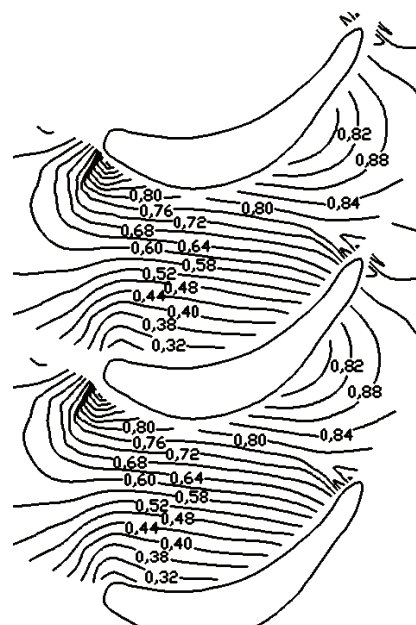


Рис. 6. Линии постоянной скорости вокруг профиля рабочей лопатки в сечении 1 для $\lambda_r = 0,83$

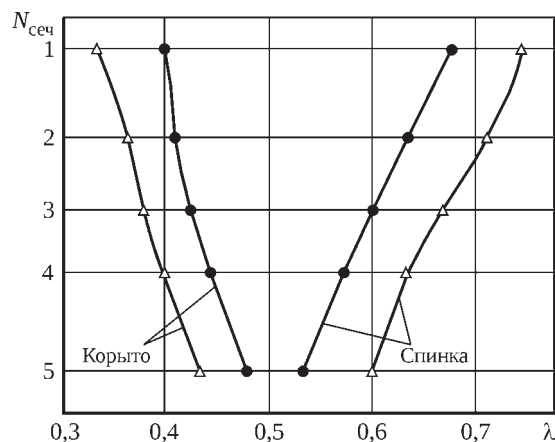


Рис. 7. Значения λ в точках расположения датчиков ИМТК по сечениям лопатки:
 Δ – $l = 3$ мм; \bullet – $l = 5$ мм

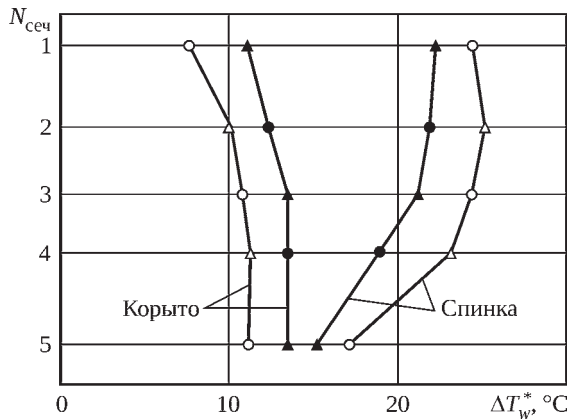


Рис. 8. Поправка температуры на неполное торможение потока на датчиках ИМТК, расположенных по высоте рабочей лопатки, при различной длине термоприемника: испытание №1: Δ – $l=3$ мм; \blacktriangle – $l=5$ мм; испытание №2: \circ – $l=3$ мм; \bullet – $l=5$ мм

ния датчика и длины термоприемника. Для датчиков ИМТК, расположенных с выпуклой (спинка) стороны лопатки, поправка ΔT_w^* больше, чем для датчиков, расположенных с вогнутой (корыто) стороны лопатки. Так, для выпуклой стороны лопатки $\Delta T_w^* = 15...26^\circ\text{C}$, для вогнутой стороны $\Delta T_w^* = 8...13^\circ\text{C}$. Для датчиков, расположенных с вогнутой стороны лопатки, ΔT_w^* больше у термоприемников длиной 5 мм, для датчиков, расположенных с выпуклой стороны лопатки, наоборот, поправка ΔT_w^* больше для термоприемников длиной 3 мм. Следует также отметить, что величина поправки ΔT_w^* для вогнутой стороны лопатки уменьшается от корня к периферии лопатки, в то время как для выпуклой стороны величина ΔT_w^* от корня к периферии лопатки растет.

На рис. 9 представлена эпюра температуры газа в межлопаточном пространстве с учетом поправок на неполное торможение потока. Значения T_w^* лежат в заштрихованной области.

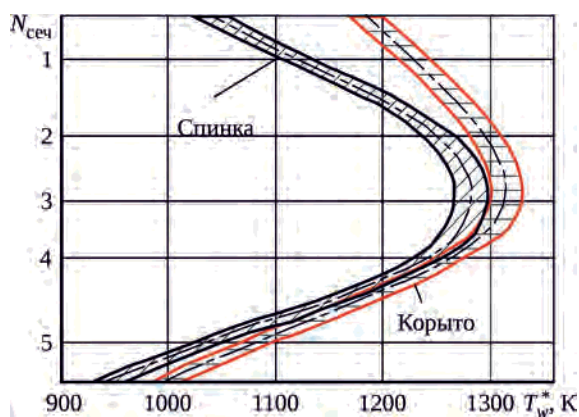


Рис. 9. Эпюра температуры газа в межлопаточном пространстве с учетом поправок на неполное торможение потока

Точность измерения методом ИМТК

При проведении термометрирования с помощью ИМТК часто один или несколько датчиков устанавливаются в такие точки объекта, где температура контролируется стандартным методом, например, термопарой. Это позволяет оценить погрешность показаний ИМТК, которая обычно не выходит за пределы, указанные в технической характеристике.

Разработчиками метода ИМТК заявлено, что в среднем в диапазоне температур $100...1200^\circ\text{C}$ среднее квадратичное отклонение (СКО) для стационарного режима составляет $\pm 6^\circ\text{C}$, для нестационарного $\pm 12^\circ\text{C}$ [8].

Ниже представлены технические характеристики ИМТК.

Технические характеристики ИМТК [1]

Диапазон измеряемых температур, $^\circ\text{C}$	150...1400
Время выдержки на максимальной температуре, мин	1...1000
Размеры ИМТК:	
стандартный:	
диаметр, мм	1
длина, мм	5
малогобаритный:	
диаметр, мм	0,5
длина, мм	3
микроизмеритель:	
диаметра, длина, мм	0,2
Абсолютная погрешность измерения во всем диапазоне температур, если время выдержки известно с точностью $\pm 10\%$, $^\circ\text{C}$	± 15
Ошибка измерения температуры несколькими датчиками, расположенными в одной точке, $^\circ\text{C}$	± 8
Скорость нагрева ИМТК, $^\circ\text{C}/\text{с}$, не более	200
Воздействие агрессивных сред	не подвержен
Срок годности	не ограничен

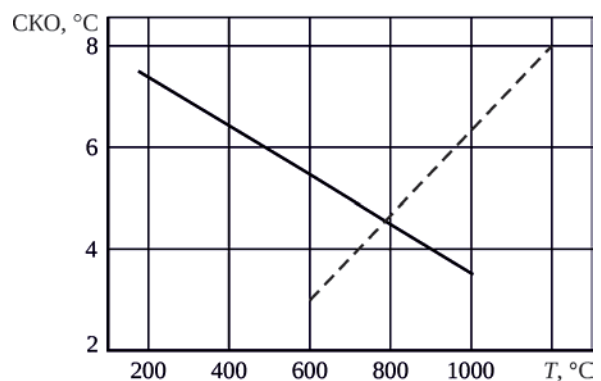


Рис. 10. Зависимость среднее квадратичного отклонения от температуры [8]:
 — — — ИМТК из алмаза;
 - - - - ИМТК из карбида кремния

Зависимость среднеквадратичного отклонения от уровня измеряемых температур представлена на рис. 10. Для алмазного ИМТК СКО уменьшается в диапазоне измеряемых температур 100...1000°C, а для ИМТК из карбида кремния – увеличивается с ростом измеряемой температуры в диапазоне 600...1200°C.

Метод ИМТК внесен в Государственный реестр средств измерений под номером 3952-73 [9].

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование по отработке методики измерения температуры газа в относительном движении на газогенераторе ЦИАМ с помощью датчиков ИМТК, заделанных в торцах керамических трубок диаметром 1,1 мм и выступающих в поток из рабочих лопаток с вогнутой и выпуклой сторон на 3 и 5 мм, позволяет сделать следующие выводы.

Литература

1. Бачучин И.В., Забусов О.О., Морозов В.А., Николаенко В.А., Салтыков М.А. Измерение температуры с помощью облученных материалов. М.: Атомная энергия, 2011. Т. 110. Вып. 3. С. 149–153.
2. Власов В.И., Залогин Г.Н., Землянский Б.А., Кусов А.Л., Рудин Н.Ф., Тимошенко В.П. Об измерениях температуры поверхности материалов, нагреваемых потоком плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2008. Т. 6. С. 1–32.
3. Балов Н.И., Григорьев Н.В., Гурнак В.С. и др. Бор-4 – первый отечественный орбитальный воздушно-космический аппарат // Тезисы XXXII академ. чтений по космонавтике. Москва, 29 января – 1 февраля 2008. С. 48.
4. Annerfeld M., Shukin S., Bjorkvan M. et al. GTX 100 Turbine Section Measurement Using a Temperature Sensitive Crystal Technique. A Comparison with 3D Thermal and Aerodynamic Analyses // In. Power-Gen Europe. May 25-27, 2004, Barcelona, Spain. P. 369.
5. Николаенко В.А., Морозов В.А. Разработка и опыт использования ИМТК. М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1979. 36 с.
6. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 704 с.
7. Таблицы газодинамических функций. ЦИАМ, 1956. 164 с.
8. Кузнецов В.Н., Николаенко В.А. Метрология метода измерения максимальной температуры с помощью ИМТК. М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1979. 27 с.
9. Сайт Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерения: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/349480>

References

1. Bachuchin I.V., Zabusov O.O., Morozov V.A., Nikolaenko V.A., Saltykov M.A. Izmerenie temperatury s pomoshch'iu obluchennykh materialov [Temperature Measurement via Irradiated Materials]. Moscow: Atomnaia energiya publ., 2011. Vol. 110. Issue. 3. P. 149–153.
2. Vlasov V.I., Zalogin G.N., Zemlianskii B.A., Kusov A.L., Rudin N.F., Timoshenko V.P. Ob izmereniiakh temperatury poverkhnosti materialov, nagrevaemykh potokom plazmy [About Temperature Measurement of Plasma-Stream-Heated Materials Surface]. Fiziko-khimicheskaia kinetika v gazovoi dinamike [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics]. 2008. Vol. 6. P. 1–32.

-
3. Balov N.I., Grigor'ev N.V., Gurnak V.S. et al. Bor-4 – pervyi otechestvennyi orbital'nyi vozdušno-kosmicheskii apparat [Bor-4 – First National Orbital Aerospace Apparatus]. Abstracts of Papers of XXXII akadem. chtenii po kosmonavtike. Moscow, 29 January – 1 February 2008. P. 48.
 4. Annerfeld M., Shukin S., Bjorkvan M. et al. GTX 100 Turbine Section Measurement Using a Temperature Sensitive Crystal Technique. A Comparison with 3D Thermal and Aerodynamic Analyses // In. Power-Gen Europe. May 25-27, 2004, Barcelona, Spain. P. 369.
 5. Nikolaenko V.A., Morozov V.A. Razrabotka i opyt ispol'zovaniia IMTK [Design and Use Practices of Maximal Temperature Crystal Meter]. Moscow: Institut atomnoi energii imeni I.V. Kurchatova, 1979. 36 p.
 6. Preobrazhenskii V.P. Teplotekhnicheskie izmereniia i pribory [Heat Engineering Measurements and Apparatus]. Moscow: Energiia, 1978. 704 p.
 7. Tablitsy gazodinamicheskikh funktsii [Gas-Dynamic Functions Tables]. CIAM, 1956. 164 p.
 8. Kuznetsov V.N., Nikolaenko V.A. Metrologiia metoda izmereniia maksimal'noi temperatury s pomoshch'iu IMTK [Method Metrology of Maximal Temperature Measurement via Maximal Temperature Crystal Meter]. Moscow: Institut atomnoi energii imeni I.V. Kurchatova, 1979. 27 p.
 9. Website of The Federal Information fund for ensuring the uniformity of measurements: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/349480>