

Измерение температуры газа на рабочих лопатках турбины высокого давления при стендовых испытаниях газогенератора

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, посвященного отработке методики измерения температуры газового потока с помощью контактных термоприемников с хромель-алюмелевыми термопарами. Статья носит методический характер.

Ключевые слова: газогенератор, турбина, лопатка, измерение температуры, термопара, термоприемник, неполное торможение потока.

Gas temperature measurement of high-pressure turbine rotor blades during bench tests of a core engine

Ceretely A.A., Elshin A.A.

CIAM, Moscow

Results of an experimental study dedicated to development of a methodology for measuring temperature of a gas flow using contact thermal detectors with chromel-alumel thermocouples are presented. The article is methodical.

Keywords: core engine, turbine, blade, temperature measurement, thermocouple, thermal detector, partial flow stagnation.

Введение

Повышение эффективности работы современных высокотемпературных турбин авиационных ГТД возможно лишь при знании характеристик потоков, обтекающих горячие элементы турбины. В обеспечении надежности охлаждения элементов важнейшую роль играет определение температуры по всему объему газа, особую сложность представляет измерение поля температур газа в относительном движении.

В ЦИАМ была разработана методика измерения температуры газового потока с помощью контактных приемников (нескольких вариантов) с хромель-алюмелевыми термопарами, закрепленными на поверхности рабочей лопатки турбины вблизи входной кромки.

Известно, что контактные термопреобразователи в потоке при высоких скоростях и температурах работают с систематическими ошибками, обусловленными:

– неполным торможением потока на чувствительном элементе;

– тепловым излучением на холодные поверхности;
– кондуктивным теплоотводом по термоэлектродам, изоляции и арматуре.

Настоящая работа выполнена в связи с отсутствием в литературе исчерпывающих рекомендаций по непрерывному измерению температуры газового потока, набегающего на вращающуюся лопатку.

Цель проведенных экспериментов – выбор варианта установки контактного приемника температуры на рабочую лопатку турбины для получения непрерывной информации о температуре газового потока. Эксперименты проводились на полноразмерном газогенераторе.

Методика определения температуры газового потока в ГТД контактным способом

Выбор термоприемника и учет методической погрешности для определения температуры газа. При измерении температуры газа контактным способом термоприемник вступает в теплообмен с газовой средой.

Величина методической погрешности измерения температуры газа определяется характером теплообмена и его интенсивностью. Для изучения методической погрешности измерения температуры газа составим в общем виде уравнение теплового баланса термодатчика (элемента термопары):

$$Q_k = Q_n + \frac{dQ_T}{dx} dx, \quad (1)$$

где Q_k – количество тепла, которое получает термопара путем конвективного теплообмена с протекающим газом; Q_n – количество тепла, которое теряет термопара в окружающую среду стенкой лопатки путем излучения; Q_T – количество тепла, отводимое за счет теплопроводности.

Раскрывая выражение (1), получим:

$$\begin{aligned} \alpha P dx (T_g^* - T_T) = \\ = C_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{1,2} P dx \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right] + s \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} dx, \quad (2) \end{aligned}$$

где α – коэффициент теплоотдачи от газа к термопаре; $P dx$ – площадь поверхности шарика-спая термопары; x – координата вдоль оси Ox , параллельной скорости набегающего потока и проходящей через центр шарика-спая термопары; λ – коэффициент теплопроводности материала термопары; s – площадь поперечного сечения проводов термопары; C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный относительный коэффициент лучеиспускания системы; $\varphi_{1,2}$ – средний угловой коэффициент, или коэффициент облученности; T_T – температура термопары; $T_{\text{ст}}$ – температура поверхности (стенки), окружающей термопару; T_g^* – полная температура газа (температура торможения).

Уравнение (2) не интегрируется в общем виде и может быть решено численно.

Для сокращения времени на аналитические расчеты систематических ошибок в работе [1] приводятся результаты их графического определения. При номографировании основное уравнение определения ошибок заменено системой уравнений, разрешаемой сеточной номограммой.

Ниже приведены расчетные формулы для определения систематических ошибок.

1. Погрешность от теплового излучения чувствительного элемента в окружающее пространство определяется следующим образом.

Количество тепла, получаемое в единицу времени термопарой от омывающего ее потока газа, согласно закону Ньютона [2; 3]:

$$Q_1 = \alpha F (T - T_T),$$

где F – площадь конвективного теплообмена термодатчика; T – температура газа; T_T – температура

термодатчика; α – коэффициент конвективной теплоотдачи при вынужденной конвекции.

Количество тепла, излученного термопарой на стенку лопатки:

$$Q_2 = C F \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right],$$

где T_T – температура термопары; $T_{\text{ст}}$ – температура стенки лопатки в месте установки термопар; C – коэффициент излучения данного черного тела.

Приравняв Q_1 к Q_2 и разрешив уравнение относительно ΔT – погрешности, вызванной потерей на теплоизлучение, – решение можно написать в виде:

$$\Delta T = T - T_T = \frac{C}{\alpha} \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right].$$

При наличии экрана, температура которого T_3 , разность $T - T_3$ находится из выражения

$$\Delta T = T - T_3 = \frac{C}{\alpha} \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right].$$

2. Ошибка от теплоотвода по проводам чувствительного элемента [4]:

$$\Delta T_{\text{конд}} = \frac{T_g^* - T_{\text{осн}}}{\text{ch}(2l/d) \sqrt{\text{Bi}}},$$

где T_g^* – температура газа; $T_{\text{осн}}$ – температура в месте установки термопары; $\text{ch}(2l/d)$ – гиперболическая функция; l – длина выступающей части термопары; d – диаметр спая термопары; $\text{Bi} = \alpha l / \lambda$ – число Био; α – коэффициент конвективной теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности материала термопары.

3. Погрешность [4; 5] от неполного торможения потока с учетом коэффициента восстановления на термодатчике определяется выражением

$$\Delta T_{\text{торм}} = T_T (1-r) \frac{\frac{k-1}{2} M^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2}, \quad (3)$$

где T_T и r – температура и коэффициент восстановления термодатчика; M – число Маха; k – показатель адиабаты.

Формулу расчета температуры газового потока можно представить в виде

$$T_g^* = T_T + \Delta T_{\text{торм}} + \Delta T_{\text{изл}} + \Delta T_{\text{конд}}, \quad (4)$$

где T_T – показание термопары; $\Delta T_{\text{торм}}$ – поправка на неполное торможение с учетом коэффициента восстановления; $\Delta T_{\text{изл}}$ – погрешность от теплового излучения; $\Delta T_{\text{конд}}$ – поправка от теплоотвода по проводам чувствительного элемента.

Экспериментальный метод определения температуры газа. Рассмотрим возможные способы уменьше-

ния методической погрешности измерения температуры газа. Как следует из формулы коэффициента теплоотдачи от газа к цилиндрическому телу, $Nu = \alpha d / \lambda = A(Re_d)^{0,5}$, где $Re_d = wd/v$; w – скорость набегающего потока; d – диаметр цилиндра (в нашем случае диаметр спая термопары). Множитель A находится в зависимости от критерия Pr [6]:

Pr	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	7	10
A	0,932	0,99	1,042	1,092	1,14	1,184	2,36	2,68

При вынужденной конвекции коэффициент теплоотдачи можно представить в виде

$$\alpha \approx Ad^{-0,53} \quad (5)$$

Из (5) следует, что коэффициент теплоотдачи приблизительно пропорционален корню квадратному из скорости потока, возрастание которой приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи.

Ясно также, что по мере уменьшения диаметра термоприемника он будет показывать температуру, все более соответствующую температуре газового потока [7]. Полное отсутствие лучистого теплообмена будет у термопары, имеющей нулевой диаметр. Следовательно, применяя группу термоприемников одного и того же типа, но разного диаметра ($d_{тз}$), можно по экспериментальным показаниям термоприемников графиче-

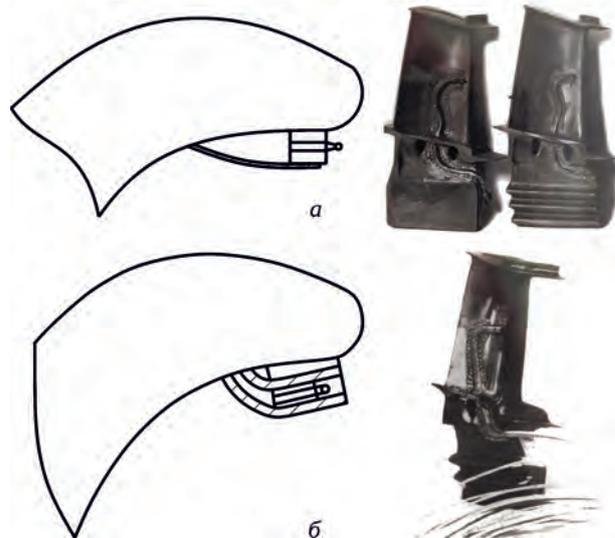


Рис. 1. Измерение температуры газа в относительном движении (T_w^*):

a – открытый спай; b – спай экранирован жаростойкой фольгой

чески получить значение показаний гипотетического термоприемника, обладающего нулевым диаметром.

Практически, применяя термоприемники диаметром 0,05...0,2 мм при скорости потока $w \geq 120$ м/с, можно измерить истинную температуру газового потока экстраполяционным методом. Но такие термопары

Табл. 1. Результаты измерения параметров газозвдушенного потока в газогенераторе на разных режимах

Параметр	Запуск	Малый газ	Запуск подогревателя	Режим 2 $T_{п} = 93^{\circ}\text{C}$	Режим 3 $T_{п} = 150^{\circ}\text{C}$	Режим 4 $T_{п} = 180^{\circ}\text{C}$	Режим 5 $T_{п} = 185^{\circ}\text{C}$
Термопара с экраном $\varnothing 0,5$ мм № 1, $^{\circ}\text{C}$	292	569	595	720	855	–	–
Термопара с экраном $\varnothing 0,5$ мм № 2, $^{\circ}\text{C}$	245	611	580	724	–	–	–
Термопара с экраном $\varnothing 0,5$ мм № 3, $^{\circ}\text{C}$	250	576	600	740	883	975	1040
Термопара с экраном $\varnothing 0,5$ мм № 4, $^{\circ}\text{C}$	216	611	575	725	872	–	1010
Микрокабельная термопара $\varnothing 1$ мм ($d_{тз} = 0,23$ мм) № 13, $^{\circ}\text{C}$	213	585	605	720	860	966	1050
Микрокабельная термопара $\varnothing 0,3$ мм ($d_{тз} = 0,06$ мм) № 16, $^{\circ}\text{C}$	247	593	615	740	875	995	1069
Проволочная термопара с открытым спаем $\varnothing 0,5$ мм № 9, $^{\circ}\text{C}$	225	573	610	720	589	971	1050
Проволочная термопара с открытым спаем $\varnothing 0,5$ мм № 11, $^{\circ}\text{C}$	220	578	605	728	865	971	1054
Проволочная термопара с открытым спаем $\varnothing 0,5$ мм № 15, $^{\circ}\text{C}$	160	565	580	705	845	970	1050
Температура воздуха на входе в газогенератор $T_{в.вх}$, $^{\circ}\text{C}$	19	19	19	19	19,5	19,5	20
Относительная частота вращения ротора $\bar{n} = n/n_{\max}$, об/мин	–	0,54	–	0,83	0,9	1,0	0,995/0,992
Температура газа за турбиной $T_{т}^*$, $^{\circ}\text{C}$	–	445	–	560	680	790	810
Давление за КВД $p_{\text{КВД}}^*$, кгс/см ²	–	–	–	3,912	3,96	4,734	4,865/4,932
Температура за КВД $T_{\text{КВД}}^*$, $^{\circ}\text{C}$	–	–	–	307,4	396,7	495,3	502,4/512,3
Температура подогретого воздуха на входе в газогенератор $T_{\text{под}}^*$, $^{\circ}\text{C}$	–	–	–	93	153	180	185/183
Средняя массовая температура газа на входе в турбину $T_{т}^*$, $^{\circ}\text{C}$	–	–	–	–	–	1068	1117/1139

очень хрупки и при больших скоростях потока быстро выходят из строя. Применение микрокабельных термопар позволяет обойти эту проблему.

Объект испытаний и измерительная аппаратура.

Измерение температуры газа на рабочих лопатках турбины высокого давления проводилось при стендовых испытаниях на полноразмерном газогенераторе.

Для определения температуры газа в относительном движении рабочие лопатки турбины дорабатывались для вывода термопар и препарировались термопарами «хромель-алюмель». Были использованы микрокабельные термопары с диаметром кабеля $d_{\text{каб}} = 1,0$ мм (диаметром термоэлектродного провода $d_{\text{тэ}} = 0,23$ мм) и $d_{\text{каб}} = 0,3$ мм ($d_{\text{тэ}} = 0,06$ мм). Рабочие лопатки были также препарированы проволочными термопарами диаметром $d_{\text{тэ}} = 0,5$ и $0,2$ мм, изолированные нитью КН-11 и пропитанные жаростойким лаком для измерения температуры газа в относительном движении. Схема препарировки показана на рис. 1. На каждой лопатке была закреплена одна термопара, измеряющая температуру газа в относительном движении.

Также были изготовлены хромель-алюмелевые термопары с $d_{\text{тэ}} = 0,5$ мм, спай которых был экранирован жаростойкой фольгой. Все термопары были расположены вблизи входной кромки.

От рабочих лопаток изолированные термоэлектроды прокладывались по диску и далее через специальный трубопровод, установленный в валу турбокомпрессора, к токосъемному устройству, расположенному во входном направляющем аппарате компрессора высокого давления.

Газогенератор был снабжен приборами для измерения следующих параметров по газозаборному тракту:

- температура воздуха на входе в воздухозаборник;
- расход воздуха через газогенератор;
- давление и температура воздуха за компрессором;
- давление и температура газа за турбиной.

При испытаниях газогенератора с целью получения кинематического подобия двигателю в газозаборном тракте на входе устанавливался подогреватель воздуха.

В табл. 1 приведены результаты измерения параметров газозаборного потока в газогенераторе.

Результаты определения температуры газа в относительном движении и анализ погрешностей измерения на газогенераторе

С помощью микрокабельных термопар разного диаметра, но одного типа и одинаковых теплофизических свойств была определена истинная температура газа путем экстраполяции к нулевому диаметру. На рис. 2 представлено изменение температуры газа в зависимости от диаметра термоэлектродного провода.

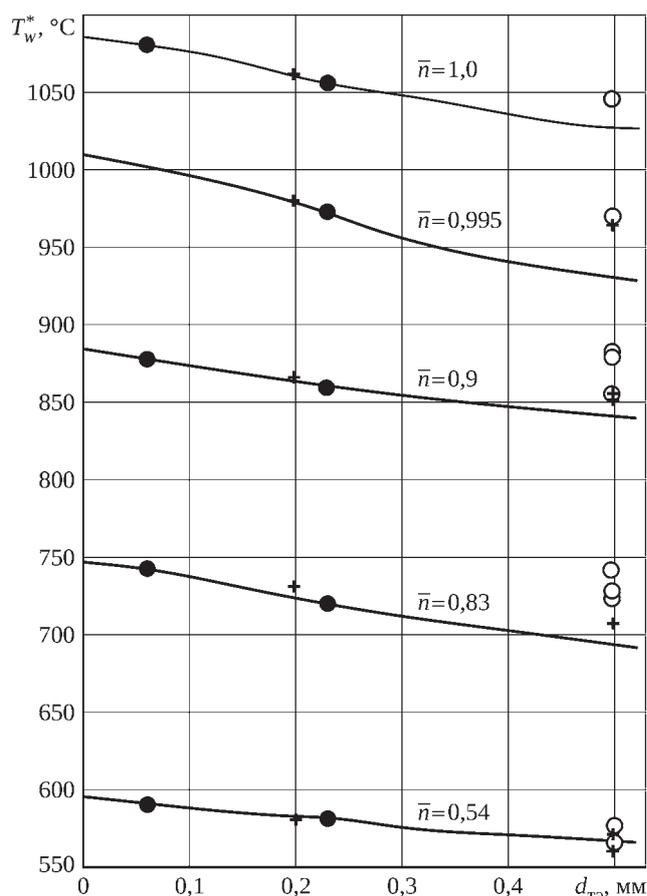


Рис. 2. Изменение температуры газа в относительном движении в зависимости от диаметра термоэлектродного провода: ● – микрокабельные термопары с открытым спаем; + – проволочные термопары с открытым спаем; ○ – проволочные термопары с экраном

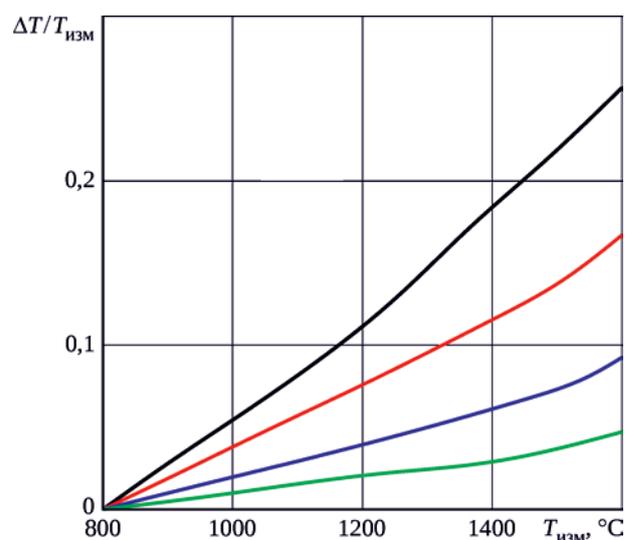


Рис. 3. Изменение поправок на излучение для термопары с открытым спаем для разных коэффициентов теплоотдачи от газа к спаю термопары: — $\alpha = 1163$ Вт/(м²·°С); — $\alpha = 1744,5$ Вт/(м²·°С); — $\alpha = 3489$ Вт/(м²·°С); — $\alpha = 6978$ Вт/(м²·°С)

Расчет систематических поправок на температуру газа, измеренную термопарой с открытым спаем, проводился по данным работы [1]. Коэффициент теплоотдачи от газа к спаю термопары составляет:

- $\alpha > 6978 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ для $d_{\text{тэ}} = 0,06 \text{ мм}$;
- $\alpha = 3489 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ для $d_{\text{тэ}} = 0,2 \text{ мм}$;
- $\alpha = 2326 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ для $d_{\text{тэ}} = 0,5 \text{ мм}$.

В данном случае конвективный теплообмен между газом и спаем термопары является доминирующим в установлении температуры спая.

На рис. 3 показаны кривые поправок на излучение для термопары с открытым спаем для разных коэффициентов теплоотдачи от газа к спаю термопары при температуре стенки лопатки $T_{\text{ст}} = 800^\circ\text{С}$. Видно, что расхождение между собственной температурой спая термопары и действительной температурой газа может быть значительным. Чем больше разность температур между спаем термопары и стенкой и чем меньше скорость протекающего газа, тем значительнее расхождение. При этом необходимо отметить, что с повышением уровня замеряемой температуры кривые изменения погрешности по $T_{\text{изм}}$ идут круче. Результаты расчета систематических поправок показали удовлетворительное совпадение с истинным значением температуры.

Погрешность измерения температуры газа в относительном движении определялась следующим образом. «Истинная» температура газа в относительном движении (T_w^*) получалась экстраполяцией к нулевому диаметру по показаниям идентичных хромель-алюмелевых микрокабельных термопар диаметром 0,3 и 1 мм (см. рис. 2). Суммарное абсолютное значение система-

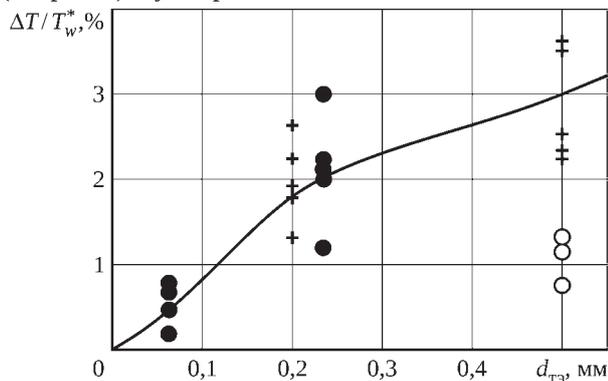


Рис. 4. Изменение относительной погрешности $\Delta T/T_w^*$ в зависимости от диаметра термоэлектродного провода:

- — микрокабельные термопары с открытым спаем;
- + — проволочные термопары с открытым спаем;
- — проволочные термопары с экраном

Литература

1. Измерение температуры газового потока при стендовых испытаниях ГТД. Термометры для измерения температуры газового потока при стендовых испытаниях ГТД. Типы, основные параметры и технические требования: руководящий техн. материал авиац. техники: РТМ 1551-77. 1977. 24 с.

Табл. 2. Относительная погрешность измерения температуры газа

Термопара	$\Delta T/T_w^*$, %
Микрокабельная $\varnothing 0,3 \text{ мм}$ ($d_{\text{тэ}} = 0,06 \text{ мм}$) с открытым спаем	0,2...0,8
Микрокабельная $\varnothing 1 \text{ мм}$ ($d_{\text{тэ}} = 0,23 \text{ мм}$) с открытым спаем	1,1...2,8
Проволочная $\varnothing 0,2 \text{ мм}$ с открытым спаем	1,3...2,6
Проволочная $\varnothing 0,5 \text{ мм}$ с открытым спаем	2,2...3,6
Проволочная $\varnothing 0,5 \text{ мм}$ с экраном из жаростойкой фольги	0,8...1,35

тической погрешности (ΔT) термопар определялось по разности между истинным значением и показанием термопар. Относительная погрешность определялась как отношение $\Delta T/T_w^*$. На рис. 4 представлена зависимость относительной погрешности $\Delta T/T_w^*$ от диаметра термоэлектродного провода.

Результаты измерения температуры газа в относительном движении термоэлектродами разного диаметра, имеющими различное конструктивное исполнение, показаны в табл. 2.

Заключение

Проведены измерения температуры газа в относительном движении закрепленными на рабочих лопатках турбин термопарами. При изменении температуры газа до $T_w^* = 1100^\circ\text{С}$ погрешность измерения температуры газа конкретным способом может составлять более чем 3% в зависимости от метода измерения.

Как показали результаты эксперимента, наименьшую погрешность измерения имеют микрокабельные термопары с открытым спаем диаметром 0,3 мм ($d_{\text{тэ}} = 0,06 \text{ мм}$) и обычные термопары диаметром 0,5 мм, экранированные экраном из жаростойкой фольги. Погрешность измерения этими термопарами может составлять менее 1%. Предельная инструментальная погрешность измерения для всех видов термопар составляет $\sim 0,85\%$.

Термопары работают в условиях больших окружных скоростей, испытывая огромные центробежные силы, поэтому важным параметром работоспособности термопар является их ресурс. Сопоставляя результаты измерения температуры микрокабельными и экранированными термопарами с продолжительностью их работы, можно заключить, что микрокабельные термопары более работоспособны.

-
2. Романов А.Г., Церетели А.А. Экспериментальное определение температуры продуктов сгорания бензино-воздушной смеси контактным способом. 1968. 8 с. (Технический отчет / ЦИАМ; № 305).
 3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е, доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
 4. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. 3-е изд., перераб. М.: Энергия, 1978. 704 с.
 5. 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.
 6. Шорин С.Н. Теплопередача. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1964. 490 с.
 7. Гордов А.Н. Измерения температур газовых потоков. М.; Л.: Mashgiz, 1962. 136 с.

References

1. Izmerenie temperatury gazovogo potoka pri stendovykh ispytaniyakh GTD. Termometry dlia izmereniia temperatury gazovogo potoka pri stendovykh ispytaniyakh GTD. Tipy, osnovnye parametry i tekhnicheskie trebovaniia [Measurement of gas flow temperature during bench tests of GTE. Thermometers for measuring gas flow temperature during bench tests of GTE. Types, main parameters and technical requirements]. *Rukovodiashchii tekhnicheskii material aviatsionnoi tekhniki* [Technical guidance material for aviation equipment] RTM 1551-77. 1977. 24 p.
2. Romanov A.G., Tsereteli A.A. Eksperimental'noe opredelenie temperatury produktov sgoraniia benzino-vozdushnoi smesi kontaktnym sposobom [Experimental determination of a gasoline-air mixture's combustion products' temperature by contact method]. 1968. 8 p. (Technical report. CIAM. No. 305).
3. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of the heat transfer theory]. 5th edition, supplemented. Moscow: Atomizdat, 1979. 416 p.
4. Preobrazhenskii V.P. Teplotekhnicheskie izmereniia i pribory [Heat engineering measurements and equipment]. 3rd edition, revised. Moscow: Energiia, 1978. 704 p.
5. Tsereteli A.A., El'shin A.A. Opredelenie temperatury rabocheho tela v turbine s pomoshch'iu monokristallicheskogo izmeritelia maksimal'noi temperatury [Gas temperature measurement on turbine core by using maximum temperature crystal meter]. *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines]. 2019. No. 2 (3). P. 31–38.
6. Shorin S.N. Teploperedacha [Heat transfer]. 2nd edition. Moscow: Vysshaia shkola [Higher school], 1964. 490 p.
7. Gordov A.N. Izmereniia temperatur gazovykh potokov [Measuring temperature of gas flows]. Moscow; Leningrad: Mashgiz, 1962. 136 p.

Материалы получены редакцией 28.01.2020