

УДК 681.518

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ОДНОВИТКОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА\*

**С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов,  
О.П. Скобелев**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук  
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61  
E-mail: borovik@iccs.ru

*Приведено описание установки для экспериментальных исследований погрешности измерения температуры чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика в канале термокоррекции системы сбора и обработки информации о радиальных зазорах между торцами лопаток и статорной оболочкой компрессора и турбины. Получены количественные оценки погрешностей, подтверждающие работоспособность и эффективность предложенного ранее метода уменьшения таких погрешностей.*

**Ключевые слова:** канал термокоррекции системы, одновитковый вихретоковый датчик, температурная погрешность, модель передачи тепла, метод уменьшения погрешности, экспериментальные исследования.

### Введение

Известно, что в системах управления перспективными авиационными газотурбинными двигателями (ГТД) планируется использование датчиков радиальных зазоров (РЗ) между торцами лопаток и статорными оболочками компрессора и турбины, поскольку РЗ определяют наиболее значимые показатели экономичности и надежности [1].

Известны также системы сбора и обработки информации о РЗ, которые успешно применялись в стендовых испытаниях ГТД [2, 3]. В таких системах измерение РЗ осуществляется с помощью одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника. ЧЭ датчиков размещены непосредственно в газоздушном тракте и подвержены интенсивному воздействию мешающих факторов, в том числе температуры, которая достигает 650 °С в компрессорах и 1200 °С в турбинах, оказывая существенное влияние на результаты измерения РЗ. Поэтому в системах приходится использовать каналы термокоррекции, в которых предусмотрено применение встроенной в каждый ОВТД термопары (ТП) для измерения температуры ЧЭ, с последующей цифровой обработкой данных о РЗ с учетом температуры ЧЭ [2, 3].

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №11-08-01032а).

Сергей Юрьевич Боровик (д.т.н.), ведущий научный сотрудник.

Марина Михайловна Кутейникова, младший научный сотрудник.

Борис Константинович Райков, старший научный сотрудник.

Юрий Николаевич Секисов (д.т.н.), заведующий лабораторией.

Олег Петрович Скобелев (д.т.н.), профессор, главный научный сотрудник.

Вместе с тем, как показал анализ, выполненный в работе [4], вынужденное размещение горячего спая (ГСп) ТП на удалении от ЧЭ в несколько миллиметров является причиной систематической составляющей погрешности измерения температуры ЧЭ, снижающей в конечном счете точность получаемой информации о РЗ. В том же источнике предложен метод уменьшения этой погрешности, предусматривающий применение второй встроенной в датчик ТП, ГСп которой размещен рядом с согласующим трансформатором (СТ). При этом температура ЧЭ определяется путем расчета теплового потока в токовом датчике (ТВ) датчика по перепаду температур, измеренных обеими встроенными ТП, и по вычисленным значениям тепловых сопротивлений участков ТВ между ЧЭ и ГСп первой ТП, а также ГСп первой и второй ТП. Рассматриваются также технические средства, реализующие предложенный метод, однако вопросы, связанные с экспериментальным подтверждением эффективности предложенного метода, в работе [4] остались без ответа.

В настоящей статье предпринята попытка устранить существующий пробел. Статья посвящена экспериментальной оценке погрешностей измерения температуры ЧЭ ОВТД. Приведены описания установки для экспериментальных исследований таких погрешностей и полученных результатов.

#### Установка для экспериментальных исследований

Схематическое изображение установки представлено на рис. 1. Установка состоит из воздуховода, входное отверстие которого сопряжено с выходом миниатюрной тепловой пушки<sup>1</sup>, обеспечивающей регулируемый по температуре поток горячего воздуха в пределах от 50 до 600 °С (на входе воздуховода). Воздуховод прямоугольного сечения (35×40 мм<sup>2</sup>) выполнен в огнеупорном кирпиче. Толщина боковой стенки 30 мм, верхней и нижней – по 15 мм. Воздуховод заключен в металлическую оболочку, а на его боковых стенках размещены вспомогательные элементы, обеспечивающие установку и крепеж двух ОВТД<sup>2</sup>. При этом оси датчиков ортогональны оси воздуховода, а ЧЭ, расположенные вблизи внутренних поверхностей боковых стенок воздуховода, параллельны его оси.

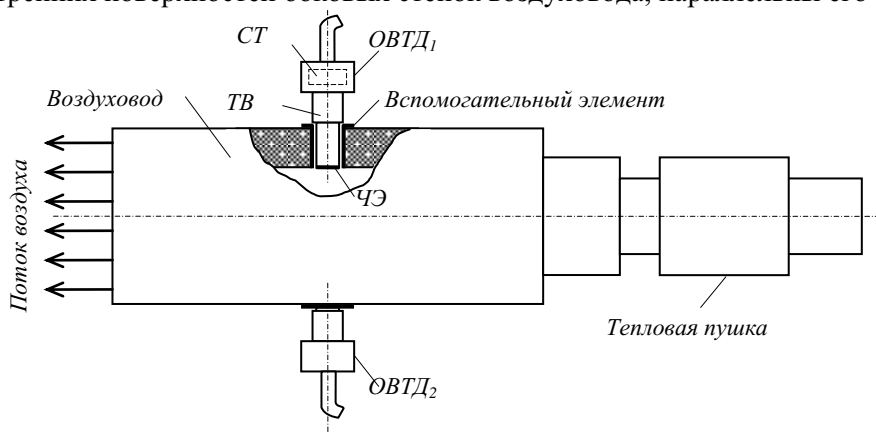


Рис. 1. Схематическое изображение установки

<sup>1</sup> Используется устройство промышленного изготовления Hot Air Gun QUICK 885 мощностью 2500 Вт.

<sup>2</sup> Вспомогательные элементы аналогичны тем, что используются при установке и крепеже датчиков на статорных оболочках компрессоров и турбин ГТД.

В каждый из датчиков, в которых уже существуют по одной ТП (их ГСп расположены в начале ТВ (поблизости от ЧЭ)), дополнительно встроены еще по одной ТП (ГСп расположены в конце ТВ (рядом с СТ)), причем ЧЭ датчиков также оснащаются ТП (по одному ГСп непосредственно на ЧЭ<sup>3</sup>). Результаты измерения температур (в трех точках на каждый датчик) индицируются в цифровом виде на мультиметре М838 с разрешением 1 °С.

### Результаты исследований

Объекты исследования – датчики, изготовленные из нержавеющей стали (НС) и предназначенные для измерения РЗ (0÷3 мм) в компрессорах (ОВТД-К-3(НС), длина ЧЭ 10 мм, его сечение 1×1 мм<sup>2</sup>) и в турбинах (ОВТД-Т-3(НС), длина ЧЭ 14 мм, его сечение 2,5×1 мм<sup>2</sup>) [2].

В табл. 1 приведены результаты измерений температуры ЧЭ ( $\theta_0$ ) и ТВ ( $\theta_1$  и  $\theta_2$ ). Температура воздуха на выходе тепловой пушки ( $\theta_n$ ) измерялась ее собственными (встроенными) средствами, температуры  $\theta_0$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – термодатчиками ТП<sub>0</sub>, ТП<sub>1</sub>, ТП<sub>2</sub> соответственно (с последующим выходом на мультиметр М838). Размещение ГСп на ЧЭ и ТВ иллюстрирует рис. 2. Там же изображены модель передачи тепла в ТВ от ЧЭ до СТ и геометрические параметры тепловых сопротивлений  $R_1$  от ГСп ТП<sub>0</sub> до ГСп ТП<sub>1</sub> и  $R_2$  от ГСп ТП<sub>1</sub> до ГСп ТП<sub>2</sub> ( $R_1 = \frac{l_1}{\lambda S_1}$ ,

$$R_2 = R_{21} + R_{22} = \frac{l_{21}}{\lambda S_{21}} + \frac{l_{22}}{\lambda S_{22}}, \text{ где } \lambda - \text{коэффициент теплопроводности материала}$$

ТВ,  $l_1$  – длина первого участка ТВ с площадью сечения  $S_1 = \pi(r_{1н}^2 - r_{1в}^2)$ ,  $r_{1н}$ ,  $r_{1в}$  – наружный и внутренний радиусы соответственно;  $R_{21}$  – тепловое сопротивление участка ТВ длиной  $l_{21}$  и площадью сечения  $S_{21} = \pi(r_{21н}^2 - r_{21в}^2)$ ,  $r_{21н}$ ,  $r_{21в}$  – наружный и внутренний радиусы участка соответственно;  $R_{22}$  – тепловое сопротивление участка ТВ длиной  $l_{22}$  и площадью сечения  $S_{22} = \pi(r_{22н}^2 - r_{22в}^2)$ ,  $r_{22н}$ ,  $r_{22в}$  – наружный и внутренний радиусы этого участка).

Таблица 1

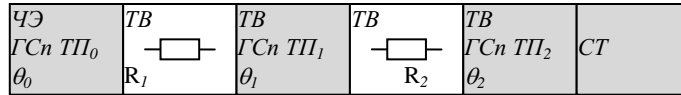
### Результаты измерений температуры ЧЭ и ТВ в исследуемых датчиках

Температура, °С (ОВТД-К-3(НС))				Температура, °С (ОВТД-Т-3(НС))			
$\theta_n$	$\theta_0$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_n$	$\theta_0$	$\theta_1$	$\theta_2$
100	60	45	36	100	63	40	33
200	106	71	50	200	114	62	45
400	232	139	83	400	225	109	70
500	285	175	106	500	275	138	90
600	338	201	117	600	325	158	100

Как отмечалось во введении, метод, предложенный в работе [4], предусматривает расчет температуры ЧЭ по измеренным с помощью ТП<sub>1</sub> и ТП<sub>2</sub> температурам  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (см. табл. 1) и вычисленным заранее тепловым сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$  (для заданных значений теплопроводности НС и размеров ТВ):

<sup>3</sup> Используются хромель-алюмелевые (ХА) ТП.

$$\theta_0 = \theta_1 + (\theta_1 - \theta_2) \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (1)$$



а

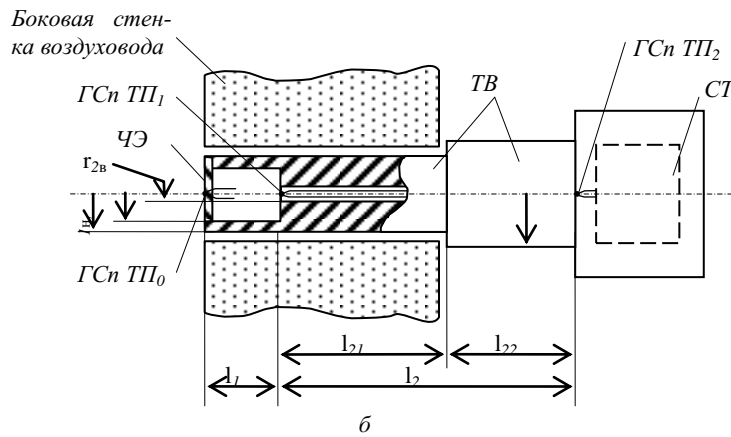


Рис. 2. Модель передачи тепла в ТВ от ЧЭ до СТ (а) и геометрические параметры тепловых сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (б)

Тогда искомая погрешность измерения определяется разностью измеренных и расчетных значений температур ЧЭ

$$\Delta = \theta_0 - \theta_{0(p)} \quad (2)$$

или в относительном виде

$$\delta = \frac{\Delta}{\theta_0} 100\%. \quad (3)$$

Расчеты температуры  $\theta_{0(p)}$  и погрешностей  $\Delta$ ,  $\delta$  были выполнены согласно выражениям (1–3) при  $\lambda=31.401 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  [5],  $l_1=7$  мм,  $l_{21}=19$  мм,  $l_{22}=38$  мм,  $r_{1н}=10$  мм,  $r_{1в}=9.5$  мм,  $r_{21н}=r_{1н}=10$  мм,  $r_{22н}=14$  мм,  $r_{2в}=1.5$  мм для ОВТД-К-3(НС);  $l_1=12.3$  мм,  $l_{21}=20$  мм,  $l_{22}=46$  мм,  $r_{1н}=14$  мм,  $r_{1в}=13.4$  мм,  $r_{21н}=r_{1н}=14$  мм,  $r_{22н}=17$  мм,  $r_{2в}=1.5$  мм для ОВТД-Т-3(НС). Полученные результаты сведены в табл. 2, в которой для привязки к данным табл. 1 в первую колонку повторно введены измеренные значения температуры потока на выходе тепловой пушки ( $\theta_n$ ).

Из табл. 2 следует, что максимальная погрешность  $\Delta$  составила 5.32 °С и в относительном виде  $\delta$  не превышает 5 % (причем при минимальной температуре  $\theta_0$ ). Это подтверждает работоспособность и эффективность метода, предложенного в работе [4]. Если же метод не использовать, то погрешность измерения можно оценить по экспериментальным данным табл. 1 как разность температуры

ЧЭ ( $\theta_0$ ) и температуры в начале ТВ ( $\theta_1$ ), измеренных ТП<sub>0</sub> и единственной встроенной ТП<sub>1</sub> (в существующих конструкциях ОВТД).

Таблица 2

**Расчетные значения температуры ЧЭ и погрешностей ее измерения**

Температура $\theta_n$ , $\theta_{0(p)}$ и погрешность $\Delta$ , °С (ОВТД-К-3(НС))				Температура $\theta_n$ , $\theta_{0(p)}$ и погрешность $\Delta$ , °С (ОВТД-Т-3(НС))			
$\theta_n$	$\theta_{0(p)}$	$\Delta$	$\delta$ , %	$\theta_n$	$\theta_{0(p)}$	$\Delta$	$\delta$ , %
100	59.27	0.73	1.2	100	59.86	3.14	5.0
200	104.29	1.71	1.6	200	110.24	3.76	3.3
400	227.78	4.22	1.8	400	219.68	5.32	2.4
500	284.39	0.61	0.2	500	274.22	0.78	0.3
600	334.17	3.83	1.1	600	322.59	2.41	0.7

$$\Delta_z = \theta_0 - \theta_1$$

Сравнение  $\Delta_z$  с  $\Delta$ , найденной с помощью выражения (2), показывает, что  $\Delta_z$  в несколько раз превышает  $\Delta$ .

**Заключение**

Разработана и изготовлена установка для экспериментальных исследований погрешностей измерения температуры ЧЭ ОВТД при использовании метода уменьшения таких погрешностей, предложенного в работе [4]. Показано, что искомая погрешность не превышает 5 %.

Вместе с тем необходимо отметить, что в соответствии с принятым в предложенном методе допущением теплообмен между ЧЭ и СТ происходит путем теплопроводности по ТВ, представленному двумя тепловыми сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , а теплообмен через боковые поверхности ТВ незначителен и практически отсутствует. Тогда окружающую ТВ среду также можно представить эквивалентным тепловым сопротивлением  $R_{1cp}$ , параллельным  $R_1$ , и сопротивлением  $R_{2cp}$ , параллельным  $R_2$ . При этом  $R_{1cp} \gg R_1$ , а  $R_{2cp} \gg R_2$  и заметного влияния на тепловой поток в ТВ, как и на температуру  $\theta_1$ ,  $R_{1cp}$  и  $R_{2cp}$  не оказывают. Так и происходит в установке для экспериментальных исследований ОВТД, в которой воздуховод выполнен из материала с малой теплопроводностью. Но в реальных силовых установках, где статорные оболочки изготовлены из материалов с намного большей теплопроводностью, может оказаться весьма существенным эффект шунтирования сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  эквивалентными сопротивлениями  $R_{1cp}$  и  $R_{2cp}$  соответственно, причем в наибольшей степени ожидается влияние  $R_{1cp}$  на  $R_1$ , поскольку вся площадь поверхности именно этой части ТВ (вблизи ЧЭ) контактирует со статорной оболочкой. В результате температура  $\theta_1$  будет приближаться к температуре  $\theta_0$  (ЧЭ). Однако для получения количественной оценки  $\theta_1$ , а следовательно, и погрешности измерения температуры  $\theta_0$  необходима разработка более совершенной модели теплообмена в ТВ ОВТД и окружающей среды, включая статорную оболочку и вспомогательные элементы конструкции для крепежа и установки датчиков. Кроме того, несмотря на положительный результат проведенных исследований, представляется полезным продолжение экспериментальных работ, аналогичных лабораторным, но на реальных объектах (компрессоре и турбине) в процессе стендовых испытаний.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боровик С.Ю., Данильченко В.П., Секисов Ю.Н. Активное регулирование радиальных зазоров в проточной части ГТД (обзор зарубежных публикаций) // Газотурбинные технологии. – 2011. – № 2. – С. 36-40.
2. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
3. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под общ. ред. О.П. Скобелева. – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.
4. Боровик С.Ю., М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов [и др.] Погрешность измерения температуры чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика в каналах термокоррекции системы сбора информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и метод ее уменьшения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3(35). – С. 43-48.
5. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

*Статья поступила в редакцию 11 декабря 2013 г.*

#### EXPERIMENTAL ESTIMATION OF SINGLE-COIL EDDY-CURRENT SENSOR TEMPERATURE MEASURE ERROR

***S.Yu. Borovik, M.M. Kuteynikova, B.K. Raykov, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev***

Institute for the Control of Complex Systems of Russian academy of sciences  
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russia

*The description of the experimental research installation for examination of an error of single-coil eddy-current sensor sensing element temperature measuring in the thermo-correction channel of the system for information acquisition about radial clearances between blade tips and a stator of compressor or turbine is given. Quantitative estimates of this error are obtained. These results confirm an operability and efficiency of the previously proposed method for reduction of such errors.*

***Keywords:*** thermo-correction channel of the system, single-coil eddy-current sensor, temperature error, the model of heat transfer, method of reducing the error, experimental research.

---

*Sergey Yu. Borovik (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Scientist.*

*Marina M. Kuteynikova, Senior Scientist.*

*Boris K. Raykov, Junior Scientist.*

*Yuriy N. Sekisov (Dr. Sci. (Techn.)), Director of Laboratory.*

*Oleg P. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Chief Scientist.*