

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПЛЁНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК СОПЛОВОГО АППАРАТА

Матвеев В.Н., Волков А.А., Кудряшов И.А., Попов Г.М.  
Самарский университет, г. Самара, ivan.kudryash1337@gmail.com

*Ключевые слова: охлаждаемая турбина, сопловой аппарат, плёночное охлаждение, коэффициент эффективности охлаждения.*

При проведении научно-исследовательских работ по заказу ПАО «Кузнецов» для отработки конфигурации сеточных моделей потока в лопаточных венцах (ЛВ) охлаждаемого соплового аппарата (СА) предприятием были предоставлены результаты экспериментального определения значений коэффициента плёночного охлаждения  $\theta$ .

Для определения значений  $\theta$  были выполнены испытания трёх блоков СА, каждый из которых состоял из трёх лопаток. Замеры температуры  $T_{л}$  проводились в 11 точках на поверхности центральных лопаток блоков СА.

В ходе эксперимента исследовалась эффективность только плёночного охлаждения входной кромки, корытца и спинки. Продувки блоков СА осуществлялись горячим воздухом с температурой на входе  $t_{г}^* = 850^{\circ}\text{C}$  ( $T_{г}^* = 1123\text{ K}$ ) при изоэнтропической скорости потока на выходе из СА  $\lambda_{1s} = 0,92$  и критерии Рейнольдса  $Re = 3,5 \cdot 10^6$ .

Температура охлаждающего воздуха на входе в переднюю полость лопатки равнялась  $380^{\circ}\text{C}$  ( $T_{охл}^* = 653\text{ K}$ ).

При испытаниях одного из блоков СА в двух точках на поверхности лопатки не удалось измерить температуру  $T_{л}$ . Поэтому при анализе результатов эксперимента эти точки не рассматривались. На основании определения средних температур  $T_{л\text{ср}}$  были вычислены средние значения коэффициента эффективности охлаждения  $\theta_{\text{ср}}$  в каждой из 9 точек на поверхности лопаток в соответствие с формулой:

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{T_{г}^* - T_{л\text{ср}}}{T_{г}^* - T_{охл}^*}.$$

Определение погрешностей эксперимента проводилось в соответствие с ГОСТ Р 8.736-2011 [1] и Рекомендациями МИ 2083-90 [2]. Значения коэффициента  $\theta_{\text{ср}}$  и их погрешности представлены на рис. 1.

Анализ этих данных показал, что значения неисключённой систематической погрешности результата косвенного измерения  $d(\theta_{\text{ср}})$  существенно меньше величин среднего квадратического отклонения  $S(\theta_{\text{ср}})$  во всех точках измерений. Это, по-видимому, объясняется технологическими отклонениями изготовления лопаток (отверстий выдува охладителя и места их расположения) блоков СА.

Отношения значений неисключённой систематической погрешности  $d(\theta_{\text{ср}})$  к величинам  $S(\theta_{\text{ср}})$  не превышают 0,8, поэтому, в соответствие с Рекомендациями МИ 2083-90 [2], погрешностью  $d(\theta_{\text{ср}})$  по сравнению со случайной погрешностью можно пренебречь и определять границы погрешности результата измерения  $\theta_{\text{ср}}$  (без учёта знака) по формуле:

$$\Delta(\theta_{\text{ср}}) = tS(\theta_{\text{ср}}),$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента, который зависит от доверительной вероятности  $P$ , принятой равной 0,95, и числа результатов измерений  $n = 3$ .

В заключение следует отметить, что при обработке конфигурации конечно-объемных сеток для численного моделирования потока в ЛВ охлаждаемого СА целесообразно было бы иметь результаты эксперимента с меньшей погрешностью. Увеличение количества испытываемых блоков СА на один и два позволит сузить границы погрешности экспериментального определения  $\theta_{\text{cp}}$  ориентировочно в 1,66 и 2,19 раза, обеспечив в первом случае (без учета знака)  $\Delta(\theta_{\text{cp}})$  не более 0,10, а во втором – не более 0,073.

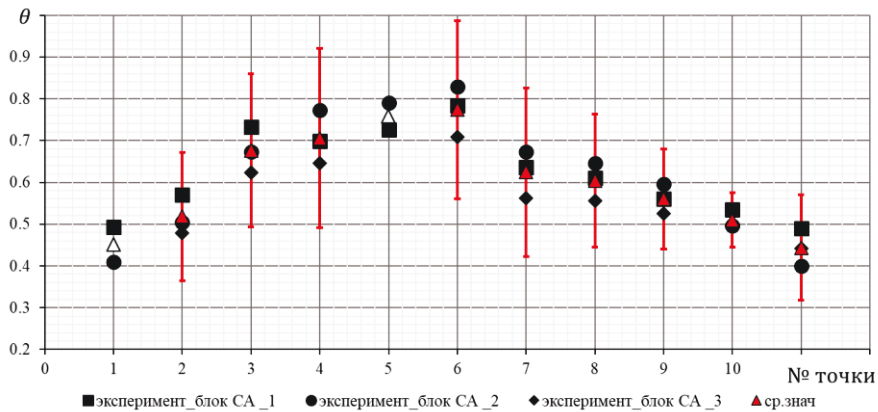


Рис. 3 – Результаты экспериментального определения значений коэффициента эффективности охлаждения и их границ погрешности

### Список литературы

- ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения: дата введения 2011-12-13. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2013. 20 с.
- МИ 2083-90. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей: дата введения 1992-01-01. Комитет стандартизации и метрологии СССР. М.: Изд-во стандартов, 1991. 10 с.

### Сведения об авторах

Матвеев Валерий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник. Область научных интересов: рабочие процессы турбомашин и ГТД, проектирование и численное моделирование лопаточных машин.

Волков Андрей Александрович, младший научный сотрудник. Область научных интересов: рабочий процесс охлаждаемых турбин.

Кудряшов Иван Александрович, инженер. Область научных интересов: рабочий процесс охлаждаемых турбин.

Попов Григорий Михайлович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник. Область научных интересов: рабочие процессы турбомашин и ГТД, проектирование и численное моделирование лопаточных машин.

### ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE VALUES OF FILM COOLING OF THE NOZZLE VANES

Matveev V.N., Volkov A.A., Kudryashov I.A., Popov G. M.

Samara National Research University, Samara, Russia, ivan.kudryash1337@gmail.com

*Keywords: cooled turbine, nozzle unit, film cooling, cooling efficiency factor.*

The results of determining, based on experimental data, the values of the film cooling coefficient of the nozzle apparatus and their errors are presented. The ratio of random and systematic errors is estimated. Recommendations are given for reducing the experimental error during further tests.