

Алгоритм восстановления профиля плоской оптической поверхности высокой точности

Я. В. ГЛАДЫШЕВА, И. В. ЖИВОТОВСКИЙ, Д. Г. ДЕНИСОВ, Н. В. БАРЫШНИКОВ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: yanagladysheva@gmail.com

Реализован алгоритм абсолютной калибровки методом двух плоскостей. Проанализирована погрешность восстановления профиля оптической поверхности с помощью математического моделирования и на основе экспериментальных данных.

Ключевые слова: профиль поверхности, шероховатость, интерференционные методы, метод трех плоскостей, абсолютная калибровка.

An algorithm of absolute calibration has been realized using the two-flat absolute calibration method. With the help of mathematical modeling and based on the experimental data the analysis is made of the error of profile reconstruction of the optical surface.

Key words: surface profile, roughness, interferometric method, three-flat method, absolute calibration.

В настоящее время большой интерес вызывают задачи, связанные с определением и контролем параметров крупногабаритных оптических поверхностей высокой точности. Оптические приборы данного класса точности применяют в области внегалактической астрономии [1], для регистрации гравитационных волн [2], при создании современных телескопических систем наблюдения за космическими летательными аппаратами, а также в силовой лазерной оптике [3–5]. Требования к качеству поверхностей подобных оптических деталей очень высоки, так как от них зависит функционирование технической системы в целом. Среднее квадратическое отклонение (СКО) распределения высот по поверхности детали может достигать 0,1 нм. Технология изготовления оптических поверхностей позволяет получать изделия различной конфигурации с требуемыми характеристиками. Разработка методов контроля параметров этих поверхностей особенно актуальна в условиях производства. Поверхности высокой точности принято оценивать в четырех пространственно-частотных диапазонах (I–IV), связанных с масштабом неоднородностей: 450–33; 33–2,5; 2,5–0,12; 0,12–0,01 мм [6]. Для каждого диапазона устанавливают требования к размеру неоднородностей рабочей поверхности детали, а границы определяют возможностями приёмной системы интерферометра. Контроль параметров в диапазонах осуществляют с помощью интерферометрических методов восстановления профиля оптической поверхности [7]. В схему интерферометра входят исследуемая поверхность и эталонная, имеющая паспорт. Для получения точности необходима калибровка эталонной поверхности. Так как качество измеряемой детали и эталонной поверхности сопоставимо, то для получения объективных результатов требуется исключить погрешности поверхности эталона из результатов измерений. Эту задачу решают методами абсолютной калибровки.

Для нахождения абсолютного профиля эталонной поверхности ранее использовали жидкие зеркала, имеющие значительные недостатки, связанные с влиянием вибраций и капиллярным эффектом в области стенок резервуара [8]. Такие зеркала располагали горизонтально, что под влиянием гравитации приводило к их прогибу. Позднее был предложен метод трех плоскостей, заключающийся в попарном измерении характеристик пластин А, В, С, где А — эталонная, В, С — поверхности плоскопараллельной пластины [9]. С помощью данного метода можно вычислить только одномерный профиль исследуемой поверхности, для определения двухмерного были предложены усовершенствованные методы на основе рассмотренного, но включающие дополнительные измерения с поворотом или перемещением хотя бы одной из поверхностей [10–13]. Наиболее распространены методы на основе разложения по полиномам Цернике [10], методы с представлением профиля поверхности в виде суммы чётных и нечётных функций [11], а также с использованием зеркальной симметрии или симметрии вращения [12]. Отдельно представлены методы с горизонтальным расположением эталонной пластины [13]. Однако все они не удовлетворяют требованиям по точности, предъявляемым к крупногабаритным оптическим поверхностям. Использование полиномов также невозможно. В методах, основанных на разложении профиля поверхности по полиномам Цернике, задействовано не более 36 первых полиномов, что недостаточно при измерениях во втором и третьем диапазонах. Применение горизонтальных схем нежелательно из-за большого прогиба крупногабаритных поверхностей [13].

Постановка задачи. Разработка метода абсолютной калибровки, позволяющего с высокой точностью измерять двухмерный профиль поверхности крупногабаритной детали в широком пространственно-частотном диапазоне

Таблица 1

Классификация неоднородностей, характеризующих поверхности в диапазонах пространственных частот

Параметр	Диапазон			
	I	II	III	IV
Пространственный масштаб неоднородностей, мм	600—33	33,0—2,5	2,50—0,12	0,12—0,01
Пространственно-частотный масштаб неоднородностей, мм ⁻¹	$1,67 \cdot 10^{-3}$ — $3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$ —0,4	0,4—8,3	8,3—100
Контролируемый	PV, λ	RMS gradient, нм/см	Rq, нм	Rq, нм
Допустимое значение	0,33=1/3	7	1,8	1,1
Диапазон гармоник	1—18 (апертура 600 мм)	20—240 (апертура 600 мм)	12—200 (апертура 33 мм)	3—12 (апертура 0,4 мм)

$4 \cdot 10^{-1}$ — $1,67 \cdot 10^{-3}$ мм⁻¹, весьма актуальна. В табл. 1 представлены диапазоны пространственных неоднородностей, а также параметры, соответствующие этим диапазонам.

В таблице обозначено: Rq — СКО точек топографии поверхности от средней линии; PV — максимальное расстояние между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины относительно среднего уровня профиля поверхности; RMS gradient — СКО перепадов высот профиля оптической поверхности между соседними пикселями; λ — длина волны.

Единственный метод, позволяющий определить профиль исследуемой поверхности с необходимой точностью, — это метод двух плоскостей. Он был предложен в работе по созданию активных сред для сверхмощного лазера в проекте Laser Megajoule [14] и заключается в перемещении вспомогательной плоской пластины относительно эталонной в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Метод двух плоскостей позволяет получить информацию о форме эталонной поверхности, отделив её от вспомогательной пластины. При обработке экспериментальных данных используют анализ профиля поверхности на основе преобразования Фурье. Существенным недостатком является необходимость механического поворота контролируемой детали на угол $\pi/2$, так как при контроле поверхности диаметром до 1000 мм этот поворот может привести к эффекту так называемого «перетекания материала» и изменению толщины детали.

В настоящей работе предложено обобщение данного метода на основе двумерных измерений в плоскости (x, y) без механического поворота исследуемой поверхности [15—16]. Разработан алгоритм, позволяющий определить границы применимости данного метода. В измерительной схеме участвуют эталонная и исследуемая плоскости. Эталонная поверхность неподвижна во время измерений, а исследуемая перемещается относительно эталонной вдоль горизонтальной оси на T/2 влево и на T/2 вправо, вдоль вертикальной оси вверх на T/2 и вниз на T/2 (рис. 1). Четверем измерениям исследуемой поверхности соответствует функция $m_i(x, y)$:

$$\begin{bmatrix} m_1(x, y) \\ m_2(x, y) \\ m_3(x, y) \\ m_4(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{оп}(-x, y) \\ h_T(x + T/2, y) \\ h_T(x - T/2, y) \\ h_T(x, y + T/2) \\ h_T(x, y - T/2) \end{bmatrix},$$

где $h_{оп}(x, y)$, $h_T(x, y)$ — распределение высот эталонной (опорной) и исследуемой (тестовой) поверхностей, соответственно; T — диапазон перемещения детали.

Восстановление распределения высот неоднородностей на исследуемой поверхности вычисляют с помощью Фурье-анализа профиля поверхности:

$$h_T(x, y) = \frac{1}{2\pi(v_x^2 + v_y^2)} \left[\iint (v_x \iint \text{Diff}_x(x, y) e^{-2\pi i(v_x x + v_y y)} dx dy) \times \right. \\ \left. \times e^{-2\pi i(v_x x + v_y y)} dx dy + \right. \\ \left. + \iint (v_y \iint \text{Diff}_y(x, y) e^{-2\pi i(v_x x + v_y y)} dx dy) e^{-2\pi i(v_x x + v_y y)} dx dy \right];$$

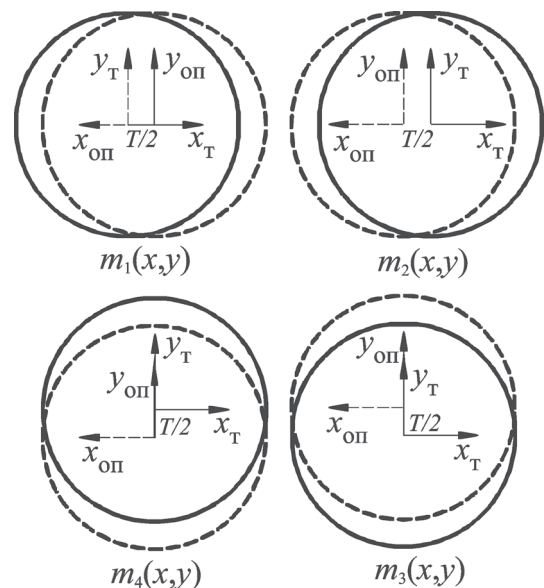


Рис. 1. Положения исследуемой поверхности относительно образцовой: сплошная линия — исследуемая поверхность; пунктирная линия — эталонная поверхность

$$\left. \begin{aligned} \text{Diffx}(x, y) &= \frac{m_1(x, y) - m_2(x, y)}{T} = \\ &= \iint 2\pi v_x \text{sinc}(\pi v_x T) \hat{h}_T(v_x, v_y) e^{2\pi i(v_x x + v_y y)} dv_x dv_y; \\ \text{Diffy}(x, y) &= \frac{m_3(x, y) - m_4(x, y)}{T} = \\ &= \iint 2\pi v_y \text{sinc}(\pi v_y T) \hat{h}_T(v_x, v_y) e^{2\pi i(v_x x + v_y y)} dv_x dv_y, \end{aligned} \right\} (1)$$

где v_x, v_y — пространственные частоты; $\text{Diffx}(x, y)$ — разница между измерениями, нормированная на модуль T ; $\hat{h}_T(v_x, v_y)$ — прямое Фурье-преобразование от распределения высот исследуемой поверхности относительно частот v_x, v_y .

Локальные наклоны по оси Ox рассчитывают как частную производную функцию $h_T(x, y)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_T(x, y)}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\iint FT[h_T(v_x, v_y)] e^{2\pi i(v_x x + v_y y)} dv_x dv_y \right] = \\ &= \iint 2\pi i v_x FT[h_T(v_x, v_y)] e^{2\pi i(v_x x + v_y y)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Из (1), (2) следует, что спектр $\text{Diffx}(x, y)$, умножается на функцию $\text{sinc}(\pi v_x T)$, которая фильтрует диапазон восстанавливаемых пространственных частот в зависимости от выбранного значения T . На рис. 2 представлена функция $\text{sinc}(\pi v_x T)$ в плоскости Ox профиля исследуемой поверхности для различных перемещений. Чем меньше перемещения, тем больший диапазон пространственных частот можно восстановить. Однако при малых перемещениях шум, присутствующий при измерениях, будет снижать точность восстановления, а при больших — уменьшится диапазон восстанавливаемых пространственных частот.

Представленный метод является оригинальным и новым подходом к измерению профилей поверхностей высокой точности, однако требуются исследования области его применения для контроля неоднородностей оптических поверхностей в широком пространственно-частотном диапазоне.

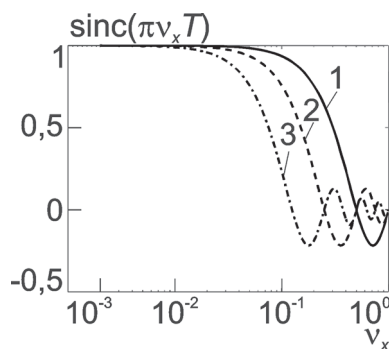


Рис. 2. Фильтрующая функция $\text{sinc}(\pi v_x T)$ для различных перемещений T :

1, 2, 3 — $T = 2, 4, 8$ мм, соответственно

Численный эксперимент. Для проверки и определения области применения метода двух плоскостей был разработан алгоритм. Исследуемую поверхность задавали в виде двумерных гармоник, синусоидальных функций. Каждому пространственно-частотному диапазону соответствовали гармоники (см. табл. 1). Для I и II диапазонов анализируемая апертура поверхности составляла 600 мм, для III — 33 мм. Апертуру исследуемой поверхности выбирали в соответствии с анализируемым пространственно-частотным диапазоном. Затем поверхность восстанавливали по алгоритму при различных значениях T . В табл. 2 представлены оптические параметры качества (Ra , Rq , PV) для исходной и восстановленной поверхностей.

Таблица 2

Оптические параметры исходной и восстановленной с помощью алгоритма калибровки поверхностей ($T=0,66$ мм)

Параметр	Поверхности	
	исходная	восстановленная
Ra^*	$-2,7244 \cdot 10^{-19}$	$-7,9688 \cdot 10^{-19}$
Rq	0,5	0,4938
PV	1,9957	1,999

Примечание: * Ra — СКО точек топографии поверхности.

Так как качество восстановления профиля поверхности зависит от выбора параметра перемещения T , то каждую гармонику восстанавливали в I—III пространственных диапазонах. Результаты представлены в табл. 3. Значение T выбирали исходя из критерия ошибки восстановления Δ :

$$\Delta = (\sigma_i - \sigma_{\text{алг}} / \sigma_i) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $\sigma_i, \sigma_{\text{алг}}$ — СКО распределения высот неоднородностей исходной и восстановленной функций.

В качестве критерия ошибки восстановления был выбран порог 5 %.

Минимальное значение перемещения T определяется как

$$T = 2D_a / N, \quad (4)$$

где D_a — размер апертуры; N — количество точек анализа.

В эксперименте размер апертуры составлял 600 мм, количество точек анализа — 1000, следовательно, минимальное перемещение, которое может быть разрешено алгоритмом, $T=1,2$ мм. Гармоники I диапазона были восстановлены, качество восстановления удовлетворяло критерию (3) с минимальным необходимым значением $T=6$ мм. В диапазоне II восстановление в соответствии с критерием (3) было успешно для гармоник с 20-й по 93-ю, остальные же гармоники были восстановлены с большей погрешностью, например погрешность восстановления 240-й гармоники составила 28 %. Удовлетворительное восстановление для гармо-

Таблица 3

Результаты эксперимента восстановления трехмерных гармоник с помощью алгоритма двух плоскостей

Диапазон	Масштаб, мм	№ гармоники	T , мм	σ_i	$\sigma_{алг}$	$\sigma_i - \sigma_{алг}$	Δ , %
I	450—33	1	48,000	0,0778	0,0739	0,0039	5,0
		10	9,600	0,0778	0,0744	0,0034	4,4
		18	6,000	0,0778	0,0738	0,0040	5,1
II	33—2,5	20	4,800	0,0778	0,0747	0,0031	4,0
		25	3,600	0,0778	0,0751	0,0027	3,5
		93	1,200	0,0778	0,0739	0,0039	5,0
		240	1,200	0,0778	0,0558	0,0220	28,3
III	2,5—0,12	12	0,396	0,0778	0,0746	0,0032	4,1
		200	6,600	0,0778	0,0092	0,0686	88,2

ник диапазона III произошло только для начальной гармоники. Таким образом, анализ показал, что восстановление профиля шероховатой поверхности с необходимой точностью возможно в диапазоне пространственных частот $1,67 \cdot 10^{-1}—1,67 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$.

Численный эксперимент с использованием реального профиля поверхности.

Следующим этапом работы было восстановление реального профиля поверхности. На интерферометре Intellium H2000 (ESDI, USA), основанном на интерферометре Физо, была измерена эталонная пластина (Zygo, USA), имеющая диаметр апертуры 100 мм. Серийные измерения проводили с усреднением данных по 128 кадрам и минимальным интервалом по времени между измерениями. Данные о распределении высот неоднородностей на поверхности были записаны в файл и восстановлены с помощью алгоритма калибровки методом двух плоскостей. Диапазон пере-

мещения составлял 0,24 мм в соответствии с (4), количество точек анализа — 812. Перемещения измеряемой поверхности в вертикальном и горизонтальном направлениях осуществляли не экспериментально, а с помощью программного обеспечения.

На рис. 3, а представлен исходный профиль поверхности до восстановления, на рис. 3, б — профиль после восстановления с помощью алгоритма калибровки методом двух плоскостей. Профили поверхностей практически не отличаются, что свидетельствует о высокой точности восста-

новления исходной поверхности. Для сравнения восстановленной и исходной поверхностей рассчитали их оптические параметры. В табл. 4 представлены результаты для 5 измерений по 128 кадрам эталонной пластины Zygo, $T = 0,24 \text{ мм}$.

Таблица 4

Результаты измерений эталонной пластины

Номер измерения, i	σ_i	$\sigma_{алг}$	Δ , %	$\Delta_{кв}^*$, нм	$\Delta_{отн.кв}^{**}$, %
1	11,8110	12,20280	3,317250	3,067345	25,97024
2	11,4277	11,61698	1,656330	2,088516	18,27590
3	12,0586	12,14190	0,690790	1,419825	11,77437
4	12,1285	12,06420	0,530156	1,247233	10,28349
5	11,9771	11,76510	1,770045	2,243512	18,73168

Примечание: $\Delta_{кв}^* = \sqrt{\sigma_i^2 - \sigma_{алг}^2}$ — погрешность квадратичных величин;
 $\Delta_{отн.кв}^{**} = (\Delta_{кв}^* / \sigma_i) \cdot 100 \%$ — относительная погрешность абсолютных величин.

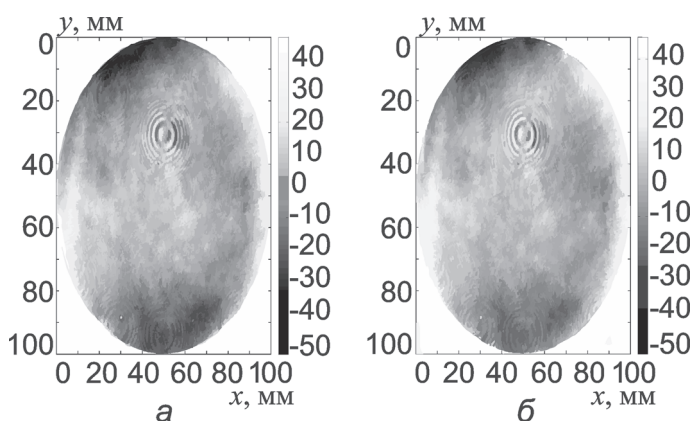


Рис. 3. Исходная (а) и восстановленная (б) поверхности ХОУ

Заключение. В статье проанализирована возможность применения метода абсолютной калибровки двух плоскостей для восстановления профиля оптических поверхностей в широком диапазоне пространственных частот. Разработан алгоритм абсолютной калибровки оптической поверхности по методу двух плоскостей, создано оригинальное программное обеспечение. Приведены численные и экспериментальные результаты оценки погрешности восстановления профиля исследуемой поверхности, полученные с помощью разработанного программного обеспечения. Исследования показали, что восстановление профиля поверхности с необходимой точностью возможно в диапазоне $1,67 \cdot 10^{-1}—1,67 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$, что соответствует пространственному масштабу неоднородностей диапазонов частот I, II и III. Погрешность восстановления реального профиля поверхности с помощью алгоритма абсолютной калибровки составила менее 5 % для линейной и менее 20 % для квадратичной погрешностей. Скорость реализации алгоритма позволяет использовать его в задачах контроля качества оптики в реальном масштабе времени. Результаты исследований показали возможность применения метода абсолютной ка-

либровки для задач контроля качества крупногабаритных оптических поверхностей. Разработанный алгоритм планируется применять для экспериментов с перемещением исследуемой детали, а также исследований по обоснованию выбора диапазона перемещений.

Л и т е р а т у р а

1. Carruthers T. F., Reitze D. H. LIGO: Finally Poised to Catch Elusive Gravitational Waves? // Opt. Photonics News. 2015. V. 26. N. 3. P. 44—51.
2. Udry S., Lovis C., Bouchy F., Cameron A. C., Henning T., Mayor M. Exoplanet Science with the European Extremely Large Telescope. The Case for Visible and Near-IR Spectroscopy at High Resolution // arXiv preprint: 1412.1048, 2014.
3. Spaeth M. L., Manes K. R., Widmayer C. C., Williams W. H., Whitman P. K., Henesian M. A. National Ignition Facility wavefront requirements and optical architecture // Opt. Eng. 2004. V. 43. N. 12. P. 2854—2865.
4. Nosov P. A., Shirankov A. F., Grigoryants A. G., Tretyakov R. S. Investigation of the spatial structure of a high-power fiber laser beam // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 584. N. 1. P. 012006.
5. Ширанков А. Ф., Носов П. А., Григорьянц А. Г., Третьяков Р. С., Самарин П. Е. Разработка оптических систем для лазерной обработки на основе теории лазерной оптики // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 5. С. 37—48.
6. Bray M., Liard A., Chabassier G. Laser megajoule optics: I. New methods of optical specification // Proc. SPIE. 1999. V. 3739. P. 449—460.

7. Abdulkadyrov M. A., Semenov A. P., Sharov Y. A., Baryshnikov N. V., Denisov D. G., Zhivotovskii I. V., Karasik V. E. An unequal-arm Twyman-Green IR interferometer for monitoring the shape and quality of the surfaces of large optical items at the grinding stage // J. Opt. Technol. 2010. V. 77. N. 10. P. 621—627.
8. Chen J., Song D., Zhu R., Wang Q., Chen L., Chen D. Large-aperture high-accuracy phase-shifting digital flat interferometer // Opt. Eng. 1996. V. 35. N. 7. P. 1936—1942.
9. Schulz G., Schwider J. Precise measurement of planeness // Appl. Opt. 1967. V. 6. N. 6. P. 1077—1084.
10. Fritz B. S. Absolute calibration of an optical flat // Opt. Eng. 1984. V. 23. N. 4. P. 379—383.
11. Ai C., Wyant J. C. Absolute testing of flats decomposed to even and odd functions // Proc. SPIE. 1992. V. 1776. P. 73—83.
12. Küchel M. F. A new approach to solve the three flat problem // Opt. Int. J. Light and Electron Optics. 2001. V. 112. N. 9. P. 381—391.
13. Vannoni M., Molesini G. Three-flat test with plates in horizontal posture // Appl. Opt. 2008. V. 47. N. 12. P. 2133—2145.
14. Morin F., Bouillet S. Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat // Proc. SPIE. 2007. N. 6616. P. 66164G.
15. Gladysheva Y. V., Zhivotovsky I. V., Denisov D. G., Baryshnikov N. V., Karasik V. E., Rees P. The absolute calibration of high-precision optical flats across a wide range of spatial frequencies // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 584. N. 1. P. 012020.
16. Барышников Н. В., Гладышева Я. В., Денисов Д. Г., Животовский И. В. Методы контроля формы и качества поверхностей крупногабаритных высокоточных оптических элементов // Радиотехника. 2014. № 4. С. 48—51.

Дата принятия 28.09.2015 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

536.5

Неопределённость восстановления нестационарных тепловых потоков с помощью тепломеров тонкого диска

Н. В. ПИЛИПЕНКО, А. С. ПРИДАЧИН

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, С.-Петербург, Россия, e-mail: pilipenko38@mail.ru

Предложен метод оценки неопределённости восстановления нестационарных тепловых потоков с помощью тепломеров тонкого диска, возникающей из-за оттока тепла по центральному электроду термопары. Приведены результаты модельных экспериментов при различных значениях длины, диаметра и коэффициентов теплоотдачи электрода.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, нестационарный тепловой поток, неопределённость, оптимальные оценки, фильтр Калмана.

The method of determination of the uncertainty for non-steady heat flows recovery by means of the circular foil heat meters, resulting from the heat reflux through the central electrode is suggested. The results of simulation experiments at different values of electrode length, diameter and heat transfer coefficients are presented.

Key words: parametrical identification, time-dependend heat flow, optimal estimations, Calman filter, uncertainty.

Определение поверхностной плотности нестационарно-го теплового потока на границе исследуемого тела актуально для различных областей науки и техники (авиационной, ракетно-космической, энергетической и др.), в частности, для

вычислений основных характеристик тепловой защиты летательных аппаратов, исследования теплового состояния лопаток и других элементов газотурбинных двигателей, обеспечения заданных тепловых режимов различных приборов