

96695

Ш-264  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

*На правах рукописи*

**ШАРОНОВ Вячеслав Николаевич**

УДК 535.3+681.7+778.4

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ  
ПО ДАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

*(05.13.16 — применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях)*

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна — 1991

Работа выполнена в Университете дружбы народов имени Патриса Лумумбы.

Научный руководитель —

кандидат физико-математических наук В. Б. Губин.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук И. И. Духопел,

доктор физико-математических наук И. М. Иванченко.

Ведущая организация — Институт космических исследований АН СССР, Москва.

Защита диссертации состоится « 7 » *ИЮНЯ* 1991 г. в 10 час. 30 мин. на заседании специализированного совета Д 047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований по адресу: город Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « 5 » *МАЯ* 1991 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета Д 047.01.04  
кандидат физико-математических наук

З. М. ИВАНЧЕНКО

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для современного оптического производства характерно увеличение ассортимента, типов и размеров поверхностей, требующих прецизионной обработки, что вызывает необходимость совершенствования известных и разработки новых способов их контроля. В многочисленных обзорных работах (например, [1,2,3,4]), обобщающих последние достижения в области изготовления и измерения поверхностей и оценивающих пути и перспективы развития оптического контроля, важная роль в повышении его точности и производительности отводится уточнению математических моделей оптических систем и оптимизации математического аппарата обработки данных контроля.

Одним из самых мощных, универсальных и широко используемых методов контроля формы оптических поверхностей является интерференционный. Он позволяет получать весьма точные количественные оценки деформаций поверхностей. Однако в настоящее время в связи с переходом к широкому изготовлению сложных оптических поверхностей с точностью порядка 0.01 длины волны оказалось необходимым дальнейшее развитие математических методов аттестации поверхностей по интерферограммам.

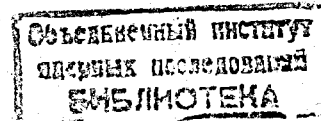
Цель работы состоит в разработке алгоритмов восстановления формы поверхностей по данным ее интерферометрических измерений методами

- радиального сдвига,
- сравнения с эталонной поверхностью (при контроле сферических и цилиндрических поверхностей),
- абсолютной калибровки трех поверхностей по четырем интерферограммам (метод "трех") для плоских и сферических поверхностей,

уменьшающих погрешности аттестации, вызванные присутствием во входных данных случайных ошибок и эффектов настройки измерительных схем, и в выработке рекомендаций по выбору параметров измерений.

Научная новизна.

- 1) Уточнены математические модели интерферограмм как



функций деформаций и взаимных положений сферических и цилиндрических поверхностей и разработаны алгоритмы восстановления поверхностей, ослабляющие требования к настройке системы контроля. Для обработки интерферограмм от сферических зеркал построен ортогональный базис на части сферы, отсекаемой плоскостью.

2) Для метода радиального сдвига построено линейное преобразование, переводящее коэффициенты аппроксимации интерферограммы полиномами Цернике в коэффициенты Цернике аппроксимации контролируемой поверхности, что сокращает вычисления и повышает их устойчивость.

3) Разработан алгоритм обработки данных метода "трех", полностью использующий интерферометрическую информацию. Даны рекомендации по оптимальному выбору относительного угла поворота одной из пар зеркал в этом методе.

4) Изучено влияние шума в данных на точность восстановления поверхностей в разных методах контроля при различных значениях параметров измерений.

Практическая значимость. В результате уточнения и разработки новых алгоритмов восстановления поверхностей ослаблены требования к точности установки зеркал при измерениях и создана возможность для более полного использования информации, содержащейся в интерферометрических данных. Проведенные исследования влияния шума на погрешность восстановления позволяют более обоснованно выбирать способы и параметры контроля. Разработанные алгоритмы обеспечивают возможность построения программных комплексов обработки различных типов интерферограмм и их комбинаций по унифицированному модульному принципу.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных конференциях "Вычислительная физика и математическое моделирование" (Волгоград, 1988, 1989), на Всесоюзном семинаре "Методы контроля формы оптических поверхностей" (Москва, 1989), на научных конференциях факультета физико-математических и естественных наук Университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы и на научном семинаре по вычислительной и прикладной математике в ЛВТА ОИЯИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ,

перечень которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, включающих 16 параграфов, заключения, списка литературы из 77 наименований и приложения. Объем диссертации - 124 страницы (из них приложение - 6 страниц).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, очерчивается круг вопросов математической обработки интерферограмм, рассматриваемых в диссертации, определяются цели работы и пути их достижения. Дается распределение материала по главам.

В первой главе вводится понятие ошибки оптической поверхности, приводятся принципиальные схемы и математические модели рассматриваемых в диссертации интерферометрических измерений поверхности. Рассматриваются вопросы корректности задачи восстановления формы поверхности по интерферограммам. Обсуждаются недостатки известных методик обработки данных интерферометрических измерений и ставятся задачи по их устранению.

Уклонения поверхности, отсчитываемые по нормальям от ближайшей (в среднеквадратичном смысле) номинальной поверхности (плоской, сферической, цилиндрической и др.) называют деформациями или ошибками поверхности. Для описания ошибок оптических поверхностей наиболее удобны и практичны полиномы Цернике  $\{Z_j(x, y)\}$  [5], описывающие классические аберрации волновых фронтов. Их применение упрощает вычисление критериев качества оптических систем, выработку рекомендаций по их доводке, а в случае адаптивных систем - управление по модальному принципу [6].

Интерферограмма с точностью до константы регистрирует разности оптических длин путей, проходимых интерферирующими фронтами. При практически нормальном падении лучей на контролируемые поверхности и относительной малости ошибок поверхностей можно считать, что отраженные лучи возвращаются по траекториям падения. Эти допущения приводят к следующим математическим моделям интерферометрических измерений плоских поверх-

ностей:

1) сравнение с идеальным эталоном (в схеме интерферометра Физо)

$$d(x, y) - S(x, y) = H(x, y); \quad (1)$$

2) радиальный сдвиг

$$d(x, y) + S(x, y) - S(\rho x, \rho y) = H(x, y); \quad (\rho \neq 1) \quad (2)$$

3) абсолютная калибровка трех поверхностей по четырем интерферограммам (в схеме интерферометра Физо)

$$\begin{aligned} d_1(x, y) - S_1(x, y) - S_2(-x, y) &= H_1(x, y); \\ d_2(x, y) - S_1(x, y) - S_3(-x, y) &= H_2(x, y); \\ d_3(x, y) - S_2(x, y) - S_3(-x, y) &= H_3(x, y); \\ d_4(x, y) - (S_2(x, y))_{\text{rot } \rho} - S_3(-x, y) &= H_4(x, y); \end{aligned} \quad (3)$$

Функции  $S(x, y)$  описывают ошибки контролируемых поверхностей. Вклад  $d(x, y)$  характеризует настройку - конкретное взаимное расположение зеркал или волновых фронтов. Он является функцией известного вида с неизвестными параметрами. Значения функций  $H(x, y)$  с точностью до константы определяются в процессе оцифровки интерферограммы на некоторой сетке с ошибкой, имеющей случайный характер. Для интерферограмм с эталоном от сферических и цилиндрических поверхностей и для калибровки трех сферических зеркал структура соответствующих уравнений сохраняется.

Задачи математической обработки интерферограммы на этапе интерпретации результатов измерений заключаются в

- 1) аппроксимации данных на оцифровочных сетках;
- 2) определении вкладов, обусловленных собственно ошибками поверхностей;
- 3) восстановлении по ним ошибок измеряемых поверхностей соответственно типам интерферограммы и их комбинациям.

Эти задачи могут решаться в различной последовательности,

но наиболее распространенной является следующая схема. Данные аппроксимируются некоторой системой полиномов (полиномами Цернике, степенными одночленами и т. п.). Коэффициенты аппроксимации корректируются для удаления вклада, обусловленного настройкой. Затем с помощью некоторого линейного преобразования, зависящего от типа полиномов и метода контроля, по скорректированным коэффициентам аппроксимации интерферограммы вычисляются коэффициенты аппроксимации ошибок контролируемых поверхностей.

При контроле плоских поверхностей вклад настройки интерферограммы описывается линейной функцией

$$d(x, y) = k + ax + by \quad (4)$$

и автоматически выделяется при аппроксимации данных системой полиномов, содержащих в качестве своих элементов 1,  $x$ ,  $y$ .

Интерферограммы от сферических зеркал обрабатываются в известных алгоритмах подобно плоскому случаю: данные об отклонениях от сферы приближаются полиномами в переменных на апертуре в метрике плоскости. Для зеркал с небольшими апертурными углами такой подход оправдан. В этом случае вклад настройки интерферограммы достаточно точно описывается функцией

$$d(x, y) = k + ax + by + c(x^2 + y^2) \quad (5)$$

и убирается из аппроксимации интерферограммы полиномами Цернике обнулением коэффициентов, соответствующих первым четырем полиномам. С увеличением апертурного угла поверхность сферического зеркала все более отличается от плоской и эта процедура становится недостаточно адекватной. Кроме того, для высокоапертурных зеркал использование для функции настройки приближения (5) может вносить в аттестацию поверхности ошибку, превышающую 0.01 длины волны  $\lambda$ . Поэтому для того, чтобы собственно математическая обработка интерферограммы от высокоапертурных сферических зеркал была по точности аналогична математической обработке интерферограммы от плоских поверхностей, т. е.

не хуже  $0.001\lambda$ , необходимо, во-первых, уточнение математической модели интерференционной картины и, во-вторых, создание математического аппарата, обеспечивающего выделение настройки с указанной точностью. Аналогичные задачи возникают и при контроле цилиндрических зеркал по интерферограммам с эталоном.

Использование ортогонального базиса полнотел Чернике повышает устойчивость аппроксимации интерферограмм. Однако полиномы аппроксимации иногда ввиду недостаточной разработанности математических алгоритмов выбирают, исходя из возможности простым образом получить коэффициенты аппроксимации ошибок поверхности по коэффициентам аппроксимации интерферограммы. Так, для обработки интерферограмм радиального сдвига часто используется система функций [7,8]

$$\{r^n \cos m\varphi; r^n \sin m\varphi\}, \quad (6)$$

позволяющая легко переходить от аппроксимации интерферограммы к аппроксимации фронта, но не типичная для анализа деформаций и не ортогональная на круге, что снижает возможности восстановления. Для устранения этих дефектов а также для унификации алгоритмов восстановления была поставлена задача построить линейное преобразование, связывающее коэффициенты Чернике интерферограммы радиального сдвига с коэффициентами Чернике формы поверхности.

Способ пересчета коэффициентов Чернике четырех интерферограмм в коэффициенты Чернике трех поверхностей, предложенный в [9], не полностью использует имеющуюся избыточность данных для уменьшения ошибки аттестации, вызванной шумом в данных. Это снижает практическую точность метода. Работа [9] оставляла также открытым вопрос об оптимальном выборе относительного угла поворота  $\varphi_0$  одной из пар поверхностей, от которого существенно зависит точность контроля.

Во второй главе для интерферограммы радиального сдвига строится линейное преобразование, связывающее коэффициенты аппроксимации полиномами Чернике ошибок контролируемой поверхности с коэффициентами аппроксимации полиномами Черни-

ке интерферограммы. Это преобразование реализуется с помощью двух верхнетреугольных матриц  $\bar{Z}_\rho^+$  и  $\bar{Z}_\rho^-$ , первая из которых соответствует полиномам четной азимутальной частоты, а вторая - нечетной. Коэффициенты Чернике поверхности  $\{s_i\}$ , соответствующие полиномам одной четности и одной азимутальной частоты  $m$ , могут быть определены по коэффициентам Чернике интерферограммы  $\{h_i\}$  при полиномах тех же азимутальной частоты и четности решением систем линейных уравнений

$$\bar{Z}_\rho^+ s^{(m+)} = h^{(m+)}, \quad \bar{Z}_\rho^- s^{(m-)} = h^{(m-)},$$

где  $s^{(m+)}$  ( $s^{(m-)}$ ) - вектор коэффициентов при четных (нечетных) полиномах азимутальной частоты  $m$ , аналогично для  $h^{(m+)}$  и  $h^{(m-)}$ ; матрица  $\bar{Z}_\rho^+$  размерности  $[(L-m)/2]+1$  (здесь  $L$  - степень аппроксимирующего полинома,  $[ ]$  обозначает целую часть числа) получается из матрицы  $Z_\rho^{m-}$  вычеркиванием первой строки и первого столбца,  $Z_\rho^+ = \bar{Z}_\rho^+$ ,  $Z_\rho^- = \bar{Z}_\rho^-$ .

Во втором параграфе второй главы для метода абсолютной калибровки выведены матричные связи между коэффициентами Чернике трех контролируемых поверхностей и коэффициентами четырех интерферограмм. Для каждой пары полиномов одной ненулевой азимутальной частоты и одной радиальной степени 4 уравнения (3) дают систему из 8 линейных алгебраических уравнений относительно 6 неизвестных коэффициентов, соответствующих данной паре полиномов Чернике в разложениях ошибок трех поверхностей. Системы следует решать методом наименьших квадратов.

Из анализа определителей систем нормальных уравнений для соответствующих задач наименьших квадратов определены те значения относительного угла поворота  $\varphi_0$  двух поверхностей, при которых нет однозначного восстановления ошибок поверхностей.

В третьей главе уточняется уравнение интерференционной картины, полученной сравнением в схеме интерферометра физо двух сферических зеркал. При взаимных децентрациях  $a, b, c \ll 10\lambda$  (по  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$  соответственно) зеркал, радиусы кото-

рых  $\lambda$  10 см, с точностью, не худшей 0.001 $\lambda$ , в естественной для единичной сферы системе координат  $(\theta, \varphi)$  интерферограмма регистрирует следующую зависимость между ошибками  $S_i(\theta, \varphi)$  ( $i=1,2$ ) двух сферических зеркал, их децентровками  $a, b$  и  $c$  и расстояниями  $H(\theta, \varphi)$  между зеркалами вдоль лучей  $(\theta, \varphi)$  (известными с точностью до константы)

$$k + a \sin \theta \cos \varphi + b \sin \theta \sin \varphi + c \cos \theta - S_1(\theta, \pi - \varphi) - S_2(\theta, \pi + \varphi) = H(\theta, \varphi)$$

На поверхности сферического зеркала с полураствором  $\theta_0$  заменой радиальной переменной  $r$  полиномов Цернике на  $\sin(\theta/2)/\sin(\theta_0/2)$  строится ортогональный базис

$$Z_j^{\theta_0}(\theta, \varphi) \equiv Z_j \left[ \frac{\sin(\theta/2)}{\sin(\theta_0/2)}, \varphi \right],$$

который и используется в алгоритмах восстановления деформаций сферических поверхностей.

Задача разделения вкладов в коэффициенты аппроксимации интерферограммы полиномами  $\{Z_j^{\theta_0}(\theta, \varphi)\}$  ее настройки и собственно ошибок измеряемых поверхностей решается определением аналитической зависимости взаимных децентровок сферических зеркал  $a, b$  и  $c$  от коэффициентов аппроксимации интерферограммы  $(h_j)$

$$a = g \sum_{j_0} h_{j_0} c_{j_0}, \quad b = g \sum_{j_1} h_{j_1} c_{j_1}, \quad c = \sqrt{3} h_4 / \sin^2 \theta_0,$$

где

$$g = \frac{12 \sin^2 \theta_0}{2 - 3 \cos \theta_0 + \cos^3 \theta_0}.$$

$c_{j_0}$  и  $c_{j_1}$  - коэффициенты разложения по  $\{Z_j^{\theta_0}\}$  функций  $\sin \theta \cos \varphi$  и  $\sin \theta \sin \varphi$  соответственно. Чтобы перейти от аппроксимации интерферограммы к аппроксимации суммы ошибок двух сфер

$$S_1(\theta, \pi - \varphi) + S_2(\theta, \pi + \varphi) = \sum_j f_j Z_j^{\theta_0}(\theta, \varphi)$$

следует положить

$$f_j = \begin{cases} 0, & j=1,4; \\ a c_{j_0} - h_{j_0}, & m=1, \quad j - \text{четно}; \\ b s_{j_1} - h_{j_1}, & m=1 \quad j - \text{нечетно}; \\ -h_j, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Использование в качестве базиса аналогов полиномов Цернике позволяет без существенных изменений перенести способ обработки данных измерений, проведенных по методу "трех", разработанный во второй главе для плоскостей, на контроль сферических поверхностей.

Для аттестации цилиндрической поверхности  $((x, \theta): -x_0 \leq x \leq x_0, -\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0)$  строится математическая модель интерферограммы с цилиндрическим эталоном в схеме интерферометра Физо

$$(bx+b)\sin\theta + (\gamma x+c)\cos\theta - S_1(x, \theta) - S_2(x, -\theta) = H(\theta, \varphi)$$

и алгоритм ее обработки, использующий для аппроксимации данных попарные произведения полиномов Лежандра. Получены выражения для определения параметров взаимного положения зеркала и эталона и коэффициентов аппроксимации ошибок поверхностей по коэффициентам аппроксимации интерферограммы.

Для сферических и цилиндрических зеркал с помощью процедуры ортогонализации Грама-Шмидта строятся ортогональные базисы, прямо включающие в качестве своих элементов составляющие функций настройки соответствующих типов интерферограмм. Использование этих базисов для аппроксимации интерферограммы обеспечивает автоматическое выделение вклада настройки в интерферограмму и особенно удобно при аттестации крупногабаритных зеркал с помощью эталонов меньшего размера.

В четвертой главе на основе полученных во второй главе матричных соотношений между коэффициентами Цернике ошибок

контролируемых поверхностей и коэффициентами Цернике интерферограмм методами линейного регрессионного анализа исследуется зависимость ошибки восстановления поверхности по зашумленным данным от числа полиномов аппроксимации и выбора параметров измерений при контроле поверхности методами сравнения с эталоном, радиального сдвига и абсолютной калибровки трех зеркал.

Если погрешность аппроксимации интерферограммы вызвана только случайными некоррелированными ошибками в данных с дисперсией  $\sigma^2$ , то среднеквадратичная ошибка аппроксимации интерферограммы  $\Delta_I$  может быть оценена через дисперсионную матрицу  $\Phi h$  коэффициентов аппроксимации:

$$\Delta_I = (\text{tr} \Phi h)^{\frac{1}{2}} = \sigma (\text{tr} (Z^T Z)^{-1})^{\frac{1}{2}}$$

Здесь матрица  $Z$  составлена из значений полиномов Цернике в точках оцифровочной сетки. Если коэффициенты аппроксимации формы поверхности являются результатом линейного преобразования коэффициентов интерферограммы

$$s = Ah,$$

то среднеквадратичная ошибка восстановления формы поверхности оценивается величиной

$$\Delta_S = (\text{tr} A \Phi h A^T)^{\frac{1}{2}} = \sigma (\text{tr} A (Z^T Z)^{-1} A^T)^{\frac{1}{2}}$$

В предположении, что на оцифровочной сетке полиномы ортогональны, ошибка восстановления поверхности определяется числом  $M$  точек сетки, величиной дисперсии  $\sigma^2$  и нормой матрицы  $A$  (полиномы нормированы на 1)

$$\Delta_S = \frac{\sigma}{\sqrt{M}} \|A\| = \sigma \left( \frac{1}{M} \text{tr} A A^T \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Последнее выражение позволяет сопоставить между собой интерферометрические методы контроля по точности при шуме в данных путем сравнения норм соответствующих матриц пересчета коэффициентов Цернике интерферограмм в коэффициенты Цернике поверхностей.

Для метода "трех" приводится аналитическое выражение для нормы матрицы  $A$  в зависимости от угла  $\rho_0$  и степени  $L$  аппроксимирующего полинома. Расчетами этого выражения были найдены значения угла  $\rho_0$ , минимизирующие ошибку восстановления поверхностей для различных  $L$ . Вычисления показали, что при оптимальных значениях  $\rho_0$  погрешность восстановления поверхностей методом "трех" практически равна погрешности восстановления поверхностей по интерферограммам с идеальным эталоном.

Для метода радиального сдвига получена формула, выражающая норму соответствующей матрицы  $A$  через элементы матриц обратных к  $\bar{Z}_\rho^+$  и  $\bar{Z}_\rho^-$ . Вычислением нормы  $A$  для различных значений  $L$  степени аппроксимирующего полинома и величины радиального сдвига  $\rho$  проведено сравнение точности метода радиального сдвига с точностью контроля по интерферограмме с эталоном.

Полученные теоретические оценки сопоставлены с результатами модельных вычислительных экспериментов. Расчеты, в частности показали, что если точки оцифровочной сетки достаточно равномерно распределены по поверхности и их число  $M$  в 4 и более раз превосходит число  $N$  полиномов аппроксимации, для оценки точности восстановления поверхности можно пользоваться выражением (8), используя для дисперсии несмещенную оценку:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{M-N} \sum_{i=1}^M [h(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^N h_j z_j(x_i, y_i)]^2$$

Для методов радиального сдвига и абсолютной калибровки трех поверхностей на модельных данных показывается лучшая устойчивость к измерительному шуму методик обработки интерферограмм, предложенных в диссертации, по сравнению с ранее известными алгоритмами.

В заключении перечислены основные оригинальные результаты, содержащиеся в диссертации.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Уточнены математические модели интерферограмм для сферических и цилиндрических поверхностей. Разработаны алгоритмы обработки интерферограмм для этих типов поверхностей, точнее, чем прежде существовавшие, отделяющие эффекты, вызванные ошибками зеркал, от эффектов, вызванных их взаимным расположением. Это ослабляет требования к настройке в реальном эксперименте.

2) Разработан алгоритм обработки интерферограмм радиального сдвига с использованием полиномов Цернике, ускоряющий счет и повышающий устойчивость результатов аттестации.

3) Улучшен алгоритм калибровки трех плоских зеркал по четырем интерферограммам, что позволило увеличить практическую точность метода. Даны рекомендации по выбору параметра  $\rho_0$  измерений. Показано, что ошибка восстановления поверхностей в этом методе по зашумленным данным при оптимальном значении параметра  $\rho_0$  практически равна ошибке восстановления по интерферограмме с идеальным эталоном.

Разработан аналогичный алгоритм для аттестации трех сферических зеркал.

4) Теоретически и в вычислительных экспериментах в широкой области условий изучено влияние случайного шума в данных на точность восстановления поверхностей в разных методах аттестации, что позволяет обоснованно выбирать способы контроля и параметры измерений.

5) На основе построенных алгоритмов создан программный комплекс DEFORM для восстановления формы плоских и сферических оптических поверхностей по интерферометрическим измерениям различных типов. Этот комплекс внедрен в Государственном оптическом институте им. С.И.Вавилова и во Всесоюзном научно-исследовательском институте мер и стандартов, где используется для аттестации эталонных поверхностей.

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в следующих работах.

1. Губин В.Б., Шаронов В.Н. Алгоритм обработки интерферограмм радиального сдвига // Оптико-механическая промышленность. - 1989. - № 6. - С. 4-6.

2. Губин В.Б., Шаронов В.Н. Комплекс программ для обработки интерферограмм // Сборник тезисов докладов Всесоюзного семинара "Методы контроля формы оптических поверхностей". - Л.: Изд-во ГОИ, 1989. - С. 29-30.

3. Губин В.Б., Микулич А.В., Шаронов В.Н. Об алгоритме восстановления оптических поверхностей и определения вкладов аберраций // Сборник тезисов докладов Всесоюзного семинара "Методы контроля формы оптических поверхностей". - Л.: Изд-во ГОИ, 1989. - С. 31-33.

4. Губин В.Б., Шаронов В.Н. О методах абсолютной калибровки оптических поверхностей / Всесоюзная конф. "Вычислительная физика и математическое моделирование". Волгоград, 12-18 сентября 1988 г. Тезисы докладов. - М.: Изд-во УДН, 1989. - С. 25-26.

5. Губин В.Б., Шаронов В.Н. Алгоритм восстановления формы оптических поверхностей по результатам экспериментальных данных // Оптико-механическая промышленность. - 1990. - № 3. - С. 19-21.

6. Губин В.Б., Шаронов В.Н. О точности восстановления оптических поверхностей по интерферометрическим данным / Тезисы докладов XXV научной конференции факультета физико-математических и естественных наук. 15-20 мая 1989 г. - М.: Изд-во УДН, 1989. - С. 22.

7. Губин В.Б., Шаронов В.Н. Полиномы Цернике на части сферы, отсекаемой плоскостью / II Всесоюзная конференция "Вычислительная физика и математическое моделирование". Волгоград, 11-14 сентября 1989 г. Тезисы докладов. - М.: Изд-во УДН, 1990. С. 23.

8. Губин В.Б., Шаронов В.Н. Определение ошибок сферических поверхностей при интерферометрии со сферическим пучком //



Оптико-механическая промышленность. - 1990 - № 8. - С. 32-35.

9. Губин В.В., Шаронов В.Н. Абсолютная калибровка сферических поверхностей // Оптико-механическая промышленность. - 1990. - № 9. - С. 41-42.

10. Шаронов В.Н. О выделении настройки в интерферограммах от сферических зеркал // Деп. ВИНТИ 08.05.90, № 24666-В90.

11. Губин В.В., Шаронов В.Н. О выделении параметров ближайшей поверхности в интерферограммах от цилиндрических зеркал // Деп. ВИНТИ 08.05.90, № 24665-В90.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Оптический производственный контроль. / Под ред. Д. Малакари. - М.: Машиностроение, 1985. - 400 с.

2. Smythe R.A., Sobitsky J.A., Truax B.E. Recent advances in interferometry at Zygo // SPIE -1987. -Vol. 816, P. 93-103.

3. Грамматин А.П., Ган М.А. Математическое моделирование оптических систем на стадиях разработки и изготовления // Оптико-механическая промышленность. - 1989. - № 1. - С. 9-12.

4. Витриченко Э.А., Лукин В.П., Пушной Л.А., Тартаковский В.А. Проблемы оптического контроля. - Новосибирск: Наука, 1990. - 350 с.

5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1970. - 856 с.

6. Wang J.Y., Markey J.K. // J. Opt. Soc. Am. - 1978. -Vol. 68, No 1. - P. 78-87.

7. Малакара Д. Интерферометры радиального, поворотного и реверсивного сдвига // Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакари. - М.: Машиностроение, 1985. - С. 119-139.

8. Hariharan P., Oreb B.F., Zhou Wanzhi. Measurement of aspheric surfaces using a microcomputer-controlled digital radial-shear interferometer // Optica Acta. - 1984. - Vol. 31, No 9. - P. 989-999.

9. Fritz B.S. Absolute calibration of an optical flat // Opt. Eng. - 1984. - Vol. 23, No 4. - P. 379-383.