

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Гавлина Александра Евгеньевна

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ВЫПУКЛЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА,
ОСНОВАННЫЙ НА СХЕМЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ

Специальность: 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Батшев Владислав Игоревич

Москва – 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1	11
Существующие методы контроля асферических поверхностей	11
1.1. Контактные методы контроля оптических поверхностей	14
1.2. Метод Гартмана	18
1.3. Метод пробных стекол	19
1.4. Метод анаберрационных точек	20
1.5. Метод Хиндла	21
1.6. Метод Хиндла-Симпсона	23
1.7. Модификация метода Хиндла-Симпсона	24
1.8. Контроль выпуклых гиперболических поверхностей по частям методом Хиндла	25
1.9. Компенсационный метод контроля	26
1.10. Контроль выпуклых зеркал с использованием компьютерной голограммы	27
1.11. Дефлектометрия	28
1.12. Метод контроля на просвет	29
1.13. Метод ортогональных лучей	30
1.13.1. Метод Гартмана на базе схемы ортогональных лучей	31
1.13.2. Неинтерференционный метод контроля на базе схемы ортогональных лучей	32
1.13.3. Интерференционный метод контроля на базе схемы ортогональных лучей	34
1.14. Выводы по главе 1	35
Глава 2	36
Интерференционный метод на основе схемы ортогональных лучей	36
2.1. Теоретические основы метода	36
2.2. Метод математической обработки результатов измерения с использованием огибающей семейства парабол	40
2.2.1. Сущность метода обработки	40
2.3. Численное моделирование разрабатываемого метода	44

2.3.1.Прямая задача восстановления профиля КП (случай без погрешностей формы).....	44
2.3.2.Прямая задача восстановления профиля КП (случай с местной ошибкой формы).....	47
2.3.3.Обратная задача восстановления профиля КП (случай без погрешности формы).....	49
2.3.4.Обратная задача восстановления профиля КП (случай с погрешностью формы).....	52
2.4.Оценка погрешности алгоритма определения координат КП.....	55
2.5.Влияние пропуска интерференционной полосы на погрешность вычисления.....	59
2.6. Выводы по главе 2.....	61
Глава 3	62
Практическая реализация интерференционного метода контроля.....	62
3.1. Апробация метода математической обработки данных с использованием огибающей семейства парабол	62
3.2. Разработанный макет интерферометр.....	67
3.3.Оценка диапазона параметров поверхностей, которые можно проконтролировать на интерферометре	69
3.4. Метод математической обработки данных для разработанной системы регистрации.....	73
3.5. Выводы по главе 3.....	76
Глава 4	77
Юстировка макета интерферометра на основе схемы ортогональных лучей	77
4.1.Блок регистрации интерферограммы.....	78
4.2.Юстировка блока поворотного стола и системы регистрации.....	78
4.3.Юстировка КП.....	82
4.4.Оценка влияния погрешности установки КП в макете интерферометра на точность измерения.....	83
4.5.Выводы по главе 4.....	87
Заключение	88
Приложение 1	90
Приложение 2	92
Приложение 3	94

Приложение 4	95
Приложение 5	96
Приложение 6	97
Приложение 7	98
Литература	99

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АП – асферическая поверхность

КП – контролируемая поверхность

ОС – оптическая система

ПА – плоскость анализа

ПИ – приемник излучения

λ – длина волны электромагнитного излучения

ВВЕДЕНИЕ

Асферические поверхности (АП) используют во многих приборах для уменьшения их габаритов и компенсации aberrаций изображения. Однако их изготовление и контроль, в частности контроль выпуклых асферических деталей, являются сложными научными и техническими задачами [1-3].

Применение традиционных методов контроля выпуклых асферических деталей сопряжено с изготовлением вспомогательных прецизионных оптических компонентов размерами большими, чем размеры контролируемых деталей.

Особенно актуальна эта проблема в последнее время в связи со строительством экстремально больших телескопов, диаметры главных зеркал которых превышают 10 метров [4-11], а диаметры вторичных выпуклых зеркал – более 2 м. К таким системам относятся, например, телескопы *E-ELT* [6-8], *TMT* [9] и другие (табл. 1).

Таблица 1.

Параметры выпуклых вторичных зеркал крупных телескопов

Телескоп	Диаметр апертуры, м	Форма вторичного зеркала	Диаметр вторичного зеркала, м
<i>VISTA</i>	4,1	Выпуклое гиперболическое	1,2
<i>TMT</i>	30,0	Выпуклое гиперболическое	3,0
<i>ELT</i>	42,0	Выпуклое гиперболическое	4,2

Большинство используемых в этих телескопах вторичных зеркал являются выпуклыми асферическими, причем они обладают различными формами (эллиптические, гиперболические, поверхности высших порядков и др.) и различными геометрическими параметрами. Каждое крупногабаритное зеркало

является уникальным. И для контроля каждого конкретного зеркала приходится изготавливать вспомогательное прецизионное оптическое устройство (компенсатор), которое не может быть применено для контроля другого зеркала. Все это существенно удорожает и усложняет изготовление выпуклых астрономических зеркал.

В этой связи разработка универсального метода для контроля формы выпуклых асферических зеркал, не требующих применения крупногабаритных вспомогательных оптических элементов, является актуальной научно-технической задачей.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и исследовании нового метода контроля формы выпуклых сферических и асферических оптических поверхностей, не требующего применения вспомогательных оптических деталей диаметром большим диаметра контролируемой поверхности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих методов контроля формы выпуклых асферических оптических поверхностей вращения.
2. Предложен, разработан и апробирован интерференционный метод контроля выпуклых сферических и асферических оптических поверхностей вращения, использующий схему ортогональных лучей, в которой контролируемая поверхность (КП) освещается перпендикулярным её оси симметрии коллимированным пучком монохроматического излучения.
3. Разработан алгоритм математической обработки полученной предложенным методом интерферограммы, позволяющий определить форму КП, без априорной информации о её геометрических параметрах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан интерференционный метод, позволяющий контролировать форму выпуклых сферических и АП; причем для любых сочетаний геометрических

параметров контролируемых поверхностей используется одна и та же оптическая система интерферометра без каких-либо сменных оптических элементов.

2. Предложен математический алгоритм обработки данных, полученных разработанным интерференционным методом, основанный на нахождении огибающей семейства виртуальных парабол и позволяющий определять координаты точек, принадлежащих исследуемой контролируемой поверхности.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Стоимость контроля выпуклых поверхностей крупногабаритных оптических деталей разработанным интерференционным методом существенно (в несколько раз) ниже по сравнению с применяемыми в настоящее время методами за счет того, что:

- разработанный метод не требует применения дополнительных высококачественных оптических деталей диаметром большим диаметра КП;
- разработанный метод является универсальным и может применяться для контроля формы выпуклых АП различных форм без изменения оптической системы интерферометра.

2. Разработанный метод математической обработки данных интерферограммы, полученной интерференционным методом на базе схемы ортогональных лучей, позволяет не только контролировать качество выпуклой оптической поверхности, но и определять ее геометрические параметры.

Достоверность выводов диссертационной работы подтверждена как математическим моделированием, которое выполнялось на различных стадиях исследования, так и хорошим соответствием расчетных и экспериментально полученных результатов.

Реализация и внедрение результатов работы. Предложенный интерференционный метод контроля выпуклых контролируемых поверхностей реализован в НТЦ УП РАН в 2018 г. в виде макета интерферометра. Результаты

работы внедрены в институте ФГУП ВНИИМС, где на базе созданного макета интерферометра в 2021 г. реализован эталон для контроля выпуклых АП. Акт внедрения представлен в Приложении 7.

На защиту выносятся следующие положения

1. В интерферометре, построенном по схеме ортогональных лучей, размер участка интерференционной картины, содержащего необходимую информацию о форме контролируемой поверхности, определяются не диаметром этой поверхности, а ее угловой апертурой, что позволяет контролировать поверхности с угловой апертурой до $22,5^\circ$ без использования вспомогательных оптических деталей с размером, большим диаметра контролируемой поверхности.

2. Метод математической обработки интерферограммы, основанный на поиске огибающей семейства виртуальных парабол, параметры которых вычисляются из координат интерференционных полос, позволяет вычислять координаты точек на меридиональных профилях контролируемых оптических поверхностей вращения без априорной информации о геометрических параметрах поверхностей с погрешностью не более 10 нм для зон поверхностей с диаметром D , большим $1/40$ радиуса R кривизны при вершине ($D/R > 1:40$), при условии, что координаты интерференционных полос определены без погрешностей.

3. Разработанная методика юстировки для интерферометра, построенного по схеме ортогональных лучей, обеспечивает возможность контроля формы выпуклых зеркал с погрешностью не более 60 нм.

Апробация работы и публикации результатов.

Материалы диссертационной работы докладывались на:

1) 10-ой, 11-ой и 12-ой Международных конференциях «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» ARMIMP (Суздаль, 2017; Суздаль, 2018; Москва, 2019).

- 2) XXIV, XXV Международных Симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2018; Новосибирск, 2019).
- 3) XV, XVI Международных научно-технических конференциях «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2019; Москва, 2021).
- 4) 2-ая Международной молодежной конференции «Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения» (Астрахань, 2018).
- 5) Международной конференции SPIE Optical Metrology (Мюнхен, 2019).
- 6) Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов на предприятии ОРИОН (Москва, 2020).

По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 1 патент РФ, 6 статей в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, 7 статей в других изданиях и тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 89 наименований цитируемых источников. Диссертация изложена на 108 страницах машинописного текста и содержит 56 рисунков и 18 таблиц.

ГЛАВА 1

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Понятие оптическая поверхность (ОП) подразумевает собой границу раздела двух сред с разными показателями преломления. К ОП относят, как поверхности оптических деталей, граничащих с воздухом (линз, призм, зеркал), так и склейки линз, имеющие разные показатели преломления. В этой работе будут рассматриваться полированные поверхности – то есть те поверхности, которые имеют микронеровности значительно меньше длины волны. Действие ОП сводится к изменению падающего на нее волнового фронта. Очевидно, что качество изображения оптического прибора в основном зависит от качества изготовления ОП. Под качеством ОП понимают соответствие ее теоретическому виду. Для качественного изготовления ОП в свою очередь необходимо использовать точные методы контроля формы этой поверхности.

В современных оптических приборах широко используют асферические поверхности (АП), благодаря которым обеспечивается уменьшение массы и габаритов прибора, а также улучшение качества изображения – компенсация aberrаций изображения. Данная работа посвящена контролю АП, поскольку, несмотря на широкое применение АП их контроль в настоящее время остается актуальной задачей.

Рассмотрим классификацию АП, у которых форма поверхности – тело вращения (в большинстве случаев в приборах используют именно такие АП). В таком случае, чтобы задать уравнение поверхности можно ограничиться заданием меридионального профиля поверхности.

Уравнение меридионального профиля АП в общем случае имеет вид:

$$y^2 = a_1z + a_2z^2 + \dots + a_nz^n, \quad (1.1)$$

где $a_1 \dots a_n$ – коэффициенты асферики.

Из всех видов АП поверхности второго порядка обособляют в одну группу. Это связано с тем, что АП второго порядка имеют ряд полезных свойств, которые будут рассмотрены ниже. Поэтому все виды АП принято делить на поверхности второго и высших порядков. АП высших порядков – это такие поверхности, уравнение меридионального профиля которых содержит порядок выше второй степени.

Для всех поверхностей второго порядка уравнение имеет вид:

$$y^2 = 2r_0z + (\varepsilon^2 - 1)z^2, \quad (1.2)$$

где ε – эксцентриситет кривой второго порядка.

Поверхности второго порядка можно разделить на две группы [12].

В первую группу объединяют поверхности, которые имеют пару анаберрационных точек, являющихся геометрическими фокусами кривых второго порядка (свойства таких поверхностей мы рассмотрим позже). В зависимости от численного промежутка, в котором находится эксцентриситет ε , поверхности второго порядка этой группы разделяют на сферические ($\varepsilon=0$), параболические ($\varepsilon=1$), гиперболические ($\varepsilon>1$) поверхности и эллиптические ($0<\varepsilon<1$) поверхности, образованные вращением эллипса вокруг большой оси.

Во вторую группу объединяют цилиндрические поверхности, конические и сплюснутые эллипсоиды (поверхности, которые образованы вращением эллипса вокруг малой оси).

Поверхности высших порядков делят на поверхности монотонной и немонотонной меридианной кривой. К монотонным поверхностям относятся торические поверхности, бочкообразные. К поверхностям немонотонной меридианной кривой относятся поверхности, типа поверхности Шмидта.

На сегодняшний день существует множество контактных и бесконтактных методов контроля формы АП, используемых на производстве [13-24]. Контактные методы чаще всего используют при контроле формы, шлифованных АП, и к ним относятся такие средства контроля, как профильные шаблоны, сферометры, асферометры, а также различные измерительные машины. Традиционные

бесконтактные методы контроля обычно сводятся к анализу отраженного от контролируемой поверхности (КП) волнового фронта различными способами. Способы анализа разнообразны и основываются на различных законах оптики, как, например, метод Гартмана или интерференционный метод. В случае контроля формы выпуклых зеркал отраженный волновой фронт всегда будет расходящимся, поэтому для его анализа требуются вспомогательные элементы диаметра большего, чем сама КП. Использование таких вспомогательных элементов, как усложняет контроль, так и повышает стоимость изготовления зеркал. Эта проблема является очень актуальной особенно сейчас, когда идет активное строительство телескопов, диаметр зеркал которых составляет десятки метров.

Еще одним недостатком традиционных методов контроля является то, что эти методы не являются универсальными, поскольку для контроля выпуклых АП различной формы необходимо вносить изменения в измерительную оптическую систему. Так, например, для контроля КП компенсационным методом для каждой конкретной формы КП с определенными параметрами изготавливают новый компенсатор.

Телескопические системы-рефлекторы, как правило, построены по схеме Кассегрена, Мерсенна или Ричи-Кретьена [25-28]. Эти схемы содержат вторичное выпуклое зеркало асферической формы: гиперболоид для классического Кассегрена и Ричи Кретьена, параболоид для Мерсенна.

Разрешение телескопических систем, как и любых оптических систем ограничивается дифракционным пределом. Угловые размеры дифракционного пятна или диска Эйри определяется формулой $d = 1,22 \cdot \lambda / D$, где D – диаметр апертурной диафрагмы оптической системы. Поэтому в погоне за лучшим изображением апертура телескопических систем возрастает, что усложняет контроль оптических компонентов таких систем.

В настоящее время идут разработки новых методов контроля выпуклых асферических зеркал, в которых отсутствуют существующие трудности традиционных методов контроля. Например, одним из таких методов контроля,

который уже вводится в использование, является дефлектометрия [29-30]. Еще одним таким примером служит ряд методов контроля формы выпуклых асферических зеркал, основанный на схеме ортогональных лучей [31-36].

Настоящая работа посвящена контролю формы выпуклых АП второго и высших порядков. Рассмотрим подробнее традиционные методы контроля выпуклых АП, используемые на производстве.

1.1. Контактные методы контроля оптических поверхностей

Главное достоинство контактных методов заключается в том, что их можно использовать при контроле формы шлифованных поверхностей, а также их можно использовать в цеховых условиях. Контактные методы контроля, как правило, имеют невысокую точность и относятся к дискретным методам – т.е. могут проконтролировать поверхность в отдельных точках или зонах, а также при контакте с измерительным инструментом есть риск повреждения КП. Эти методы, несмотря на недостатки, применяют, как на стадии формообразования, так и при контроле полированных поверхностей [37-39]. Это объясняется тем, что на сегодняшний день отсутствуют приемлемые бесконтактные методы контроля некоторых выпуклых поверхностей

Контактные методы контроля формы выпуклых АП используют профильные шаблоны, сферометры, асферометры, а также различные измерительные машины.

Профильный шаблон – это специальная пластинка, которая используется для контроля АП. Такая пластина вырезается из конуса (выпуклого или вогнутого), наклонное сечение которого дает необходимую кривую 2-ого порядка [40-41].

Для количественной оценки погрешности формы, шлифованной АП используют различные сферометры.

Накладной индикаторный сферометр рис. 1.1 состоит из следующих основных частей: корпуса 2 с установочным кольцом и измерительного стержня-

индикатора 3. Такой сферометр производит измерение относительно эталонной сферы в диапазоне около 60 мкм. После настройки сферометра по эталонной сфере, радиус кривизны которой незначительно отличается от радиуса кривизны, контролируемой АП, он устанавливается на контролируемую поверхность 1. Отклонение стрелки показывает отличие радиуса контролируемой поверхности от эталонной сферической. Это значение сравнивают с теоретическим. Погрешность контроля такими сферометрами-индикаторами для АП обычно составляет 5-10 мкм.

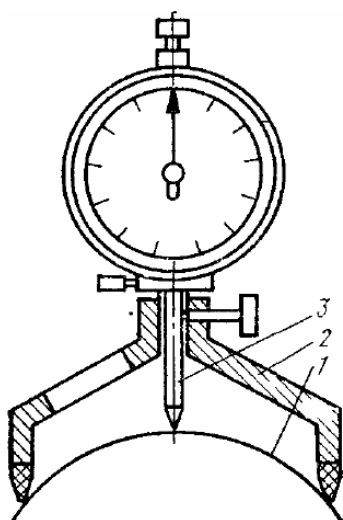


Рис. 1.1. Индикаторный сферометр

Если контролируемую оптическую деталь можно снимать со станка, то измерения можно производить на сферометрах ИЗС-7, который представлен на рис. 1.2.

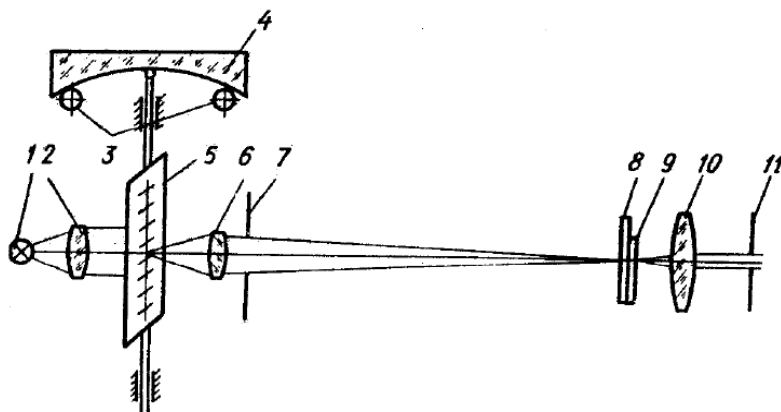


Рис. 1.2. Оптическая схема сферометра ИЗС-7

Три шарика одинакового диаметра, расположенные относительно друг друга под углом 120° , вставлены в измерительное кольцо этого прибора. При помощи микроскопа по шкале снимают отсчеты (поз. 6-11). Измерения на данном сферометре проводятся также, как на индикаторном, однако точность этого прибора выше [42]. Сферометр позволяет контролировать АП с погрешностью 1-2 мкм.

Для контроля величины стрелки прогиба оптических АП применяют асферометр [43]. Его механизм работы такой же, как и у сферометра ИЗС-7, но если в сферометре ИЗС-7 встроен индикатор, то асферометр содержит в себе измерительную головку. Прибор обеспечивает точность 0,1-0,2 мкм. При использовании асферометра существует опасность искажения результатов, в случае, если одна из опор асферометра установлена на участок с местной ошибкой. Такой метод контроля применяется, как на стадии формообразования детали, так и при контроле полированных поверхностей.

Также контроль АП может быть выполнен с помощью полярного компаратора [44-47], представленного на рис. 1.3.

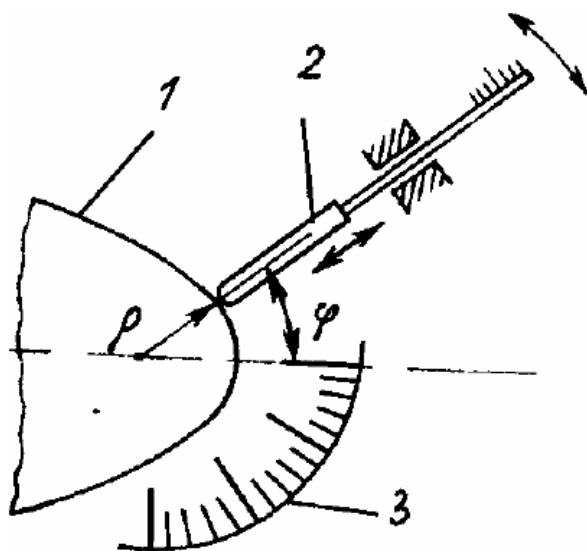


Рис. 1.3. Полярный компаратор

Принцип действия такого компаратора основан на измерении приращения $d\rho$ радиуса ρ АП при изменении угла наклона φ . Такие компараторы применяют для

сравнения контролируемого профиля АП с идеальным теоретическим профилем. Компаратор выводит среднеквадратичное отклонение от теоретической кривой. Полученные данные могут передаваться на управляющий механизм станка. В настоящее время имеются компараторы с чувствительностью измерительной головки в 10-20 нм. Полярные компараторы могут контролировать поверхности диаметром до 120 мм.

Для измерений, крупногабаритных шлифованных АП, применяют накладные сферометры [48-49], которые имеют три контактные опоры, как показано на рис. 1.4.

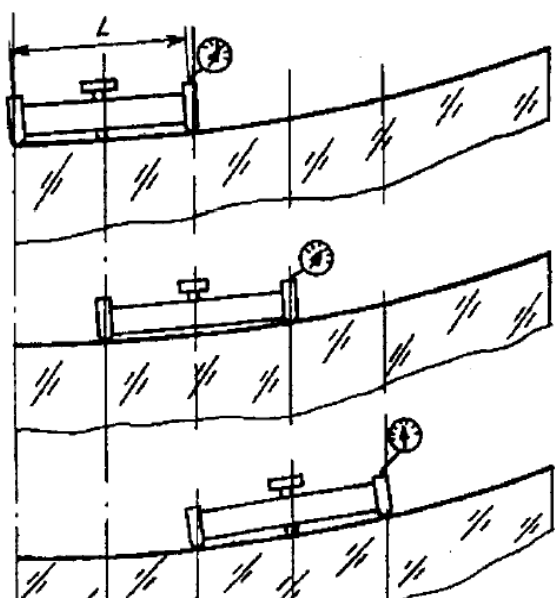


Рис. 1.4. Накладной сферометр

Одна из крайних опор неподвижна, средняя опора содержит в себе измерительный винт, а вторая крайняя опора представляет собой высокочувствительный щуп, с помощью которого определяется момент его касания с КП. Методика измерения состоит в следующем: для начала сферометр устанавливается в такое положение, когда его средняя опора совпадает с вершиной КП и измеряют стрелку прогиба на зоне между крайними опорными точками сферометра. Потом последовательно перемещают прибор на шаг, равный половине длины его базы, как показано на рис. 1.4. Стрелка прогиба КП измеряется при каждом таком перемещении. Таким образом обходится весь профиль КП. Далее

используют графоаналитический метод для нахождения точек исследуемого профиля КП. Погрешность такого метода измерения зависит от качества используемого сферометра, а также от количества шагов при измерении, и в общем случае составляет 0.3-0.5мкм.

1.2.Метод Гартмана

В методе Гартмана используются экраны с различным расположением отверстий [50-53]. Данный метод применяется для контроля зеркальных поверхностей больших размеров. Раньше самый распространенный тип экранов имел радиальные отверстия. Такой тип экрана впервые применил Гартман рис.1.5.

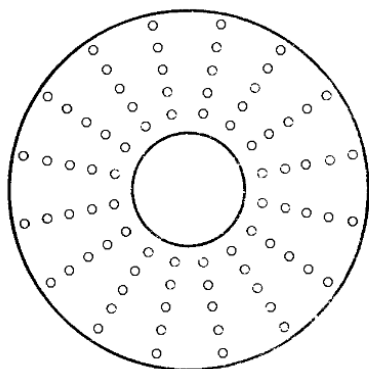


Рис. 1.5. Классический экран Гартмана

Суть метода заключается в следующем: экран с множеством отверстий устанавливают вблизи КП, после чего регистрируют два снимка звезды. Один из снимков регистрируют, когда приемник расположен за фокальной плоскостью, а другой снимок регистрируют, когда приемник расположен перед фокальной плоскостью. При этом необходимо точно измерить расстояние между этими двумя положениями. Лучи, прошедшие через отверстия экрана, оставят на приемнике ряд точек. Сравнивая координаты этих точек с теоретическими значениями можно определить ошибки поверхности.

Применение такого метода имеет ряд недостатков. Площадь поверхности контролируемого зеркала, на которую падает свет из отверстия экрана, меняется в зависимости от координаты отверстия, в результате чего разные участки контролируются с разной надежностью. А также ошибки поверхности тех участков зеркала, которые находятся между отверстиями, не могут быть проконтролированы.

1.3.Метод пробных стекол

Контроль формы выпуклых полированных АП можно осуществить пробными стеклами [54-57]. При этом контроль пробным сферическим стеклом осуществляется только в случае АП с малым отступлением от сферы (порядка нескольких микрометров). Подобные отклонения можно рассматривать, как «запланированные погрешности» формы. Фиксируется пробное стекло с помощью шариков пластилина, которые устанавливают на краю воздушного зазора. При наложении пробного стекла на КП возникает интерференция света, с помощью которой определяют форму АП. По координатам интерференционного кольца y и ширине воздушного промежутка t между КП и пробным сферическим стеклом, можно построить зависимость $t = f(y)$, зная при этом, что при переходе к соседнему кольцу ширина зазора изменяется на величину $\frac{\lambda}{2}$. Затем эту зависимость сравнивают с рассчитанной теоретической. Для надежного контроля ширина интерференционной полосы должна быть не менее 0,05 мм. Точность контроля зависит как от правильности наложения пробного стекла, так и от контрастности интерференционной картины.

Для контроля деталей диаметром до 250 мм также применяют асферические пробные стекла. Методика контроля аналогична методике, которая используется при контроле сферическим пробным стеклом, только оси пробного стекла и КП нужно очень точно совместить. Сами пробные асферические стекла

контролируется методом наложения пробных стекол. В качестве эталонных поверхностей используют сферические поверхности или плоскости.

В общем случае контроль АП с помощью пробных стекол является трудоемким процессом и не позволяет обеспечить точность, необходимую для создания прецизионных оптических деталей.

1.4. Метод анаберрационных точек

Для контроля АП второго порядка применяют метод анаберрационных точек. Поверхности, которые образованы вращением кривых 2-го порядка обладают парой анаберрационных точек, которые являются геометрическими фокусами этих кривых [12, 58]. Если расположить точечный источник в одной из точек, то волновой фронт, отраженный от КП, будет являться сферическим, с центром кривизны во втором геометрическом фокусе. Методы контроля на основе анаберрационных точек, как правило, сводятся к анализу этого отраженного волнового фронта.

На этом принципе работает интерферометр ИКП-1, который предназначен для контроля местных ошибок АП 2-го порядка рис. 1.6. Важная особенность конструкции состоит в том, что рабочая ветвь имеет вертикальное положение. Благодаря этому отсутствуют зажимные приспособления и специальные оправы, а в следствии и пережатие детали.

В рабочей ветви интерферометра реализована автоколлимационная схема контроля выпуклой гиперболической поверхности 8. Волновой фронт, выходящий из рабочей ветви, интерферирует с эталонным волновым фронтом. По интерференционной картине судят о погрешностях КП. Лупа, состоящая из элементов 10, 11, 12 предназначена для наблюдения интерференционной картины. Элементы 8 и 9 устанавливаются на каретках, расстояние между которыми может варьироваться в пределах от 90 до 250 мм. Автоколлимационное зеркало 9 имеет

центральное отверстие для прохождения пучка лучей, которые идут из объектива 7, что не позволяет контролировать центральный участок КП. Размер этого участка зависит от вида КП и его конструктивных параметров. Этот участок может достигать большой величины для эллиптических и параболических выпуклых поверхностей, поэтому целесообразность применения данного интерферометра для контроля таких поверхностей должна решаться отдельно в каждом конкретном случае с помощью расчета диаметра неконтролируемого участка. На интерферометре ИКП-1 возможен контроль всех видов асферических поверхностей 2-го порядка. Так как лучи света отражаются от КП дважды, то чувствительность метода к погрешностям КП увеличивается в 4 раза.

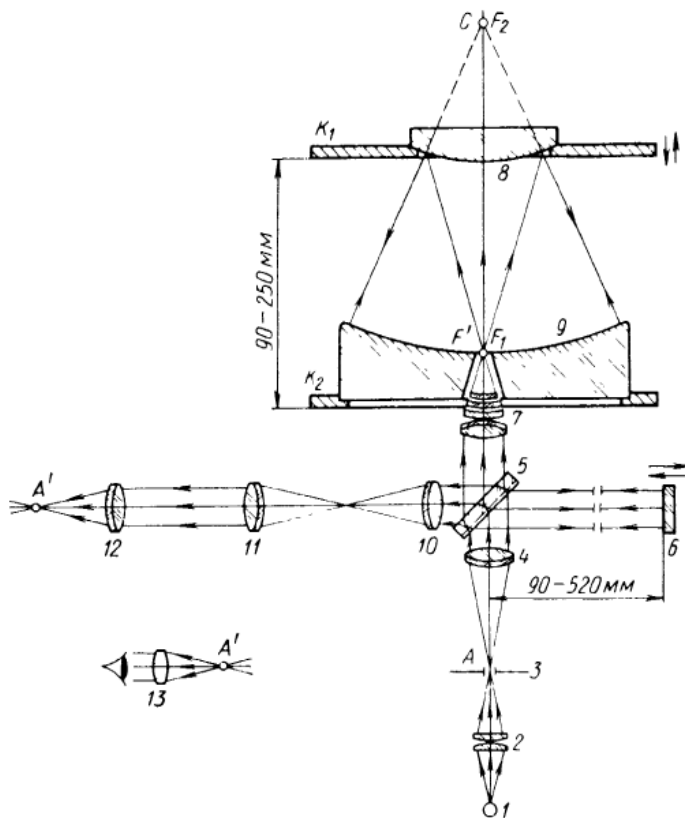


Рис. 1.6. Оптическая схема интерферометра ИКП-1

1.5. Метод Хиндла

Частным случаем метода анаберрационных точек является метод Хиндла для контроля выпуклых гиперболических зеркал [59].

Он представлен на рис. 1.7. Пучок лучей, идущий из действительного геометрического фокуса F_1 гиперболической КП 1, отражается от КП и направляется на вогнутое сферическое зеркало 2. Мнимый геометрический фокус КП F_2 совмещен с центром кривизны сферического зеркала C , так образуется автоколлимационная оптическая система. Видно, что в схеме применяется вспомогательное зеркало значительно большего диаметра, чем КП.

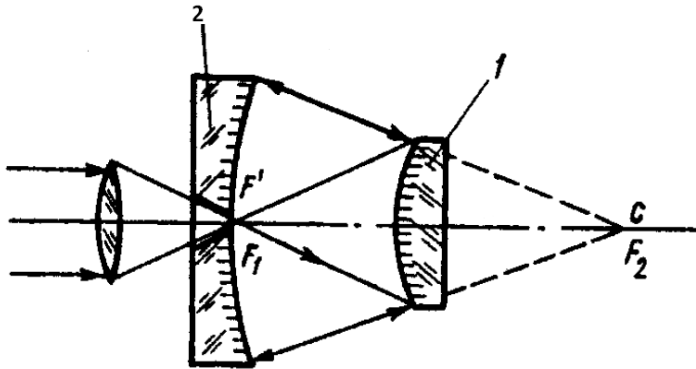


Рис. 1.7. Схема Хиндла

В табл. 2 представлены вторичные зеркала телескопов, которые контролировались при помощи сферы Хиндла.

Таблица 2.

Параметры выпуклых вторичных зеркал крупных телескопов

Название телескопа	<i>TTL</i>	<i>NOA</i>	<i>VST</i>	<i>VISTA</i>	<i>DOT</i>
Диаметр вторичного зеркала	645	753	938	1241	980

Поскольку увеличение диаметра сферы Хиндла усложняет ее изготовление и стоимость, для контроля выпуклых гиперболических зеркал проектов *NOA*, *VST*, *TTL* и *VISTA* на практике использовали две сферы Хиндла меньшего диаметра [60-65]. Одна из сфер служила для контроля центральной зоны выпуклого гиперболического зеркала, а вторая – периферийной зоны. Чтобы сшить результаты контроля этих зон в единую топографическую карту, контролируемые зоны должны перекрываться. При контроле выпуклых гиперболических зеркал телескопов *NOA*, *VST*, *TTL* и *VISTA* зона перекрытия была не менее 200 мм.

Сферы Хиндла, служащие для контроля периферийных зон, всегда устанавливались вблизи контролируемого зеркала, что позволило значительно уменьшить их диаметры.

1.6. Метод Хиндла-Симпсона

Усовершенствованный метод Хиндла представлен на рис. 1.8. В этом методе используются два вспомогательных оптических компонента. Оба имеют сферические поверхности. Один компонент – линзовый мениск, который выполняет функции зеркальной сферы Хиндла. Мениск покрыт отражающей поверхностью с рабочей стороны. Второй вспомогательный компонент – вогнутое калибровочное зеркало. По сравнению с классическим методом Хиндла нет центральной нерабочей зоны. Метод был предложен в Ф.А. Симпсоном в 1974 году [66].

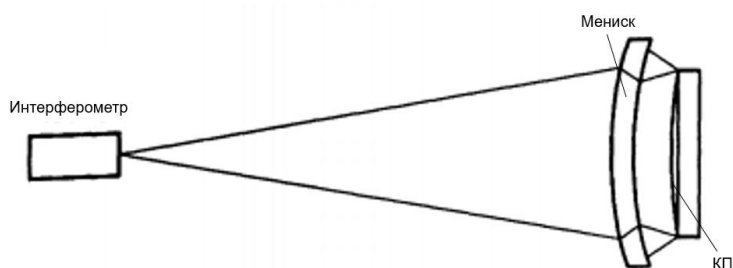


Рис. 1.8. Схема метода Хиндла-Симпсона

Преимущество этого метода в том, что если для одного и того же телескопа имеется несколько вторичных зеркал с различными параметрами, то для всех из них будет работать один и тот же мениск, рассчитанный на наибольшее вторичное зеркало. Также эта схема легко юстируется. Недостатки этого метода в том, что крупногабаритный мениск может деформироваться при креплении, а также трудно изготовить мениск большого диаметра с требуемой однородностью материала.

Этим методом, например, контролировались вторичные зеркала с апертурой до 750 мм на предприятии *Contraves* [67].

1.7. Модификация метода Хиндла-Симпсона

Предприятие *Contraves* использовала модификацию стандартного метода Хиндла–Симпсона для контроля вторичного зеркала *Coudé Auxiliary Telescope* [67].

На рис. 1.9 показана схема контроля, использовавшаяся для вторичного зеркала телескопа *3,5-meter Starfire telescope*. В этой схеме содержалась сфера, которая уменьшила длину оптического пути излучения с 60 метров до 7 метров.

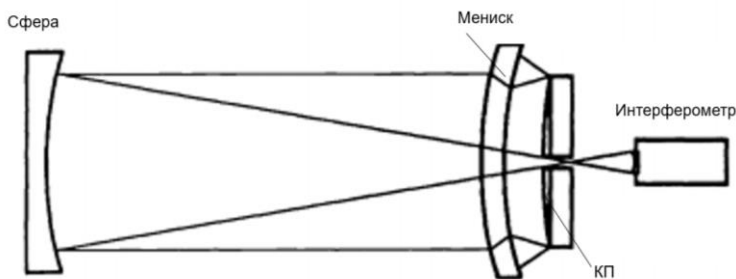


Рис. 1.9. Схема модификации метода Хиндла-Симпсона

На рис. 1.10 представлена еще одна модификация метода Хиндла-Симпсона используемая на производстве, в которой значительно сокращен оптический путь за счет использования дополнительной линзы.

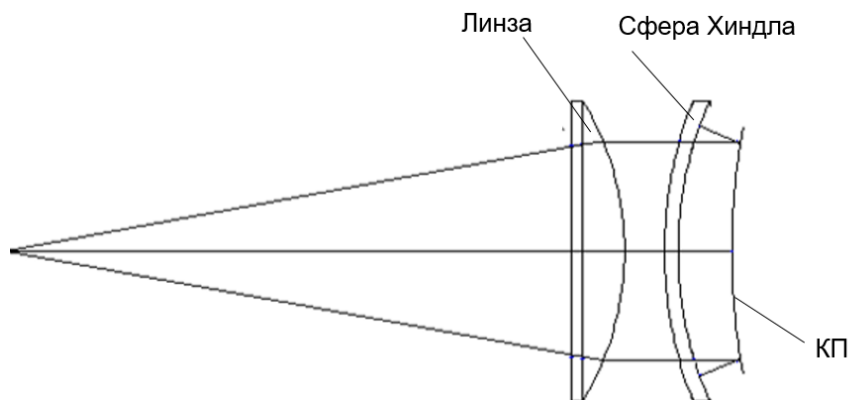


Рис. 1.10. Схема контроля методом Хиндла-Симпсона

1.8. Контроль выпуклых гиперболических поверхностей по частям методом Хиндла

Разработанный метод, с использованием сферы Хиндла рис. 1.11, перекрывающей только часть диаметра КП, позволяет снизить общую стоимость контроля.

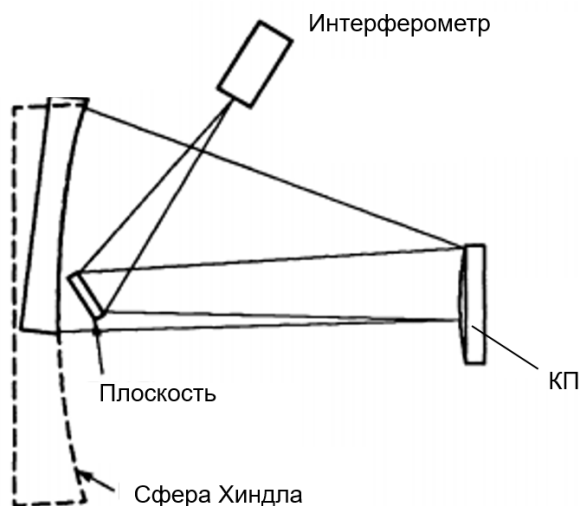


Рис. 1.11. Схема контроля методом Хиндла по частям

Для этого метода вторичное зеркало вращается вокруг своей оптической оси. Для точного объединения данных требуется достаточное перекрытие интерферограмм. Компьютерное программное обеспечение было разработано на предприятии *Contraves*. Затем этот метод был успешно использован для подтверждения точности изготовления вторичного зеркала *WIYN*. Однако, время, необходимое для сбора интерферометрических данных при шести углах поворота привели к увеличению времени контроля. А также существуют трудности в механическом креплении установки [68].

1.9. Компенсационный метод контроля

Существует компенсационный метод контроля АП [69-72]. Его сущность заключается в том, что КП дополняется оптической системой – компенсатором – которая устраняет aberrацию нормалей КП. Таким образом, в системе «компенсатор + КП» создается автоколлимационный ход лучей. Качество отраженного от КП пучка обычно контролируют на интерферометре. В настоящее время компенсационный метод является основным для контроля вогнутых АП. Однако для контроля выпуклых зеркал неизбежно возникает необходимость применения компенсаторов, размеры которых больше размера КП.

Во избежание необходимости создания крупногабаритных линзовых элементов существуют интерферометры со вспомогательным сферическим зеркалом, как показано на рис. 1.12. Однако и в этой схеме вспомогательное зеркало превосходит по диаметру КП.

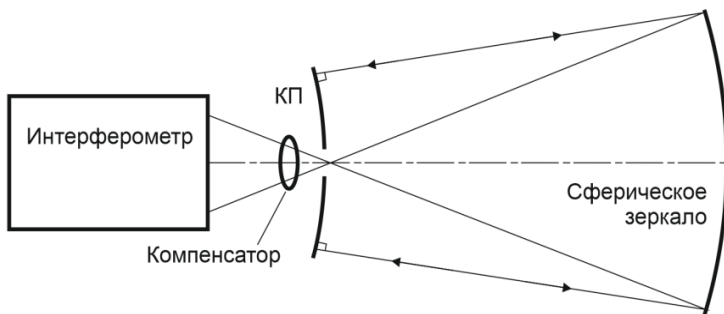


Рис. 1.12. Компенсационная схема контроля с зеркальным объективом

Частным случаем компенсационного метода является контроль зеркал с голографическим компенсатором.

1.10. Контроль выпуклых зеркал с использованием компьютерной голограммы

Выпуклые сферические поверхности обычно измеряются с помощью интерферометров, которые построены так, что на контролируемую поверхность падает сферический волновой фронт (созданный эталонной сферической вогнутой поверхностью), центр которого совмещен с центром кривизны контролируемой поверхности. Поэтому лучи, отраженные от контролируемой поверхности, возвращаются обратно в интерферометр. Интерференционная картина показывает различие формы эталонной сферы и КП. Аналогичным образом выпуклые АП могут быть проконтролированы с использованием соответствующих вогнутых асферических эталонных поверхностей. Сложность этого метода заключается в том, что для каждой контролируемой АП необходимо изготовить и измерить вогнутую эталонную асферическую. Голографический контроль упрощает реализацию такого метода контроля благодаря использованию в оптической схеме эталонной вогнутой сферической поверхности, которую легко изготовить и измерить. Для создания же асферического волнового фронта теоретической формы контролируемой поверхности на вогнутую сферическую поверхность наносят голограмму (или зонные пластины), которая представляет собой металлические кольца (рис. 1.13).

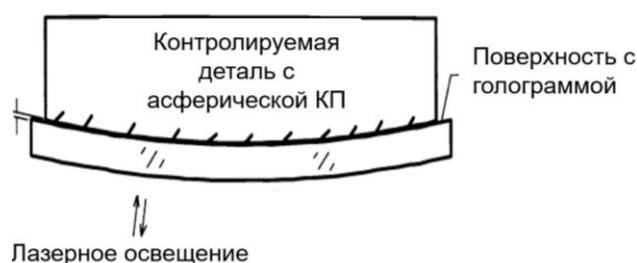


Рис. 1.13. Схема голографического метода контроля

Этот метод был проведен для вторичных зеркал диаметром до 1,2 м с погрешностью измерения поверхности не более 4 нм [73-74].

В табл. 3 представлены вторичные асферические выпуклые зеркала телескопов, контроль формы которых был выполнен с помощью компьютерных синтезированных голограмм. Зеркала телескопа *MMT*, представленные в таблице, изготовлены до реконструкции обсерватории 1998 года.

Таблица 3.

Параметры вторичных выпуклых зеркал

Название телескопа	<i>ARC</i>	<i>Sloan</i>	<i>MMT</i>	<i>LBT</i>
Диаметр, мм	838	1143	620	1170

Диаметры прецизионных компьютерных голограмм технологически ограничены и, как правило, не превышают 150 мм. В настоящее время контроль АП особо крупного диаметра при помощи голограмм осуществляют по частям [75].

Преимущество голографического метода – маленький воздушный зазор между контролируемым зеркалом и подложкой с голограммой, что уменьшает влияние вибраций, воздушных потоков и температурной неоднородности воздуха на результаты.

1.11. Дефлектометрия

Дефлектометрия – это относительно новый способ измерения различных зеркальных поверхностей, впервые упомянутый в 2013 году [29-30]. С помощью этого метода можно контролировать зеркала диаметром от нескольких миллиметров до нескольких метров различной формы и кривизны, не используя при этом дополнительные дорогостоящие оптические элементы.

Принцип измерения выпуклых асферических зеркал заключается в том, что камера регистрирует изображение отраженной от КП синусоидальной решетки, генерируемой на экране рис. 1.14. По деформации этого изображения может быть оценена форма КП.

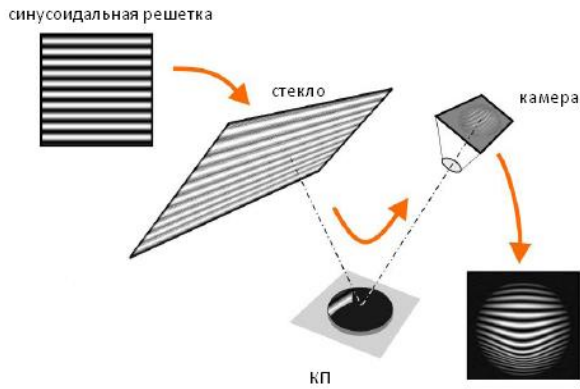


Рис. 1.14. Схема метода дефлектометрии

Преимуществами дефлектометрии является невысокая стоимость и малое время измерения, которое составляет десятки минут.

Несмотря на отмеченные выше достоинства дефлектометрии, точность этого метода на практике составляет единицы микрометров, в то время как необходимая точность зеркал телескопов составляет несколько нанометров. Дефлектометрия не используется при контроле крупногабаритных выпуклых элементов. К примеру, для контроля выпуклого зеркала 300 мм диаметром модуля *MAORY ELT*-телескопа смоделирована система дефлектометрии в которой требуется экран 2,5 метра и 5 камер для записи отраженного синусоидального изображения.

1.12. Метод контроля на просвет

Метод подходит только для контроля прозрачных оптических деталей, схема метода представлена на рис. 1.15. Метод был использован в *Lick Observatory* для контроля вторичных зеркал телескопа *Keck* диаметром 0,53 метра и 1,4 метра [67]. Также метод использовался для контроля выпуклых параболоидных вторичных зеркал диаметром 120 мм интерферометра обсерватории на хребте Магдалены [67].

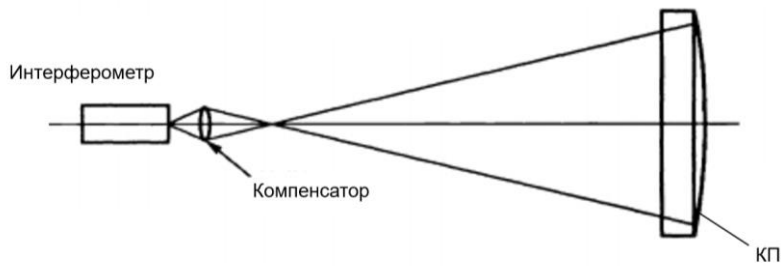


Рис. 1.15. Схема контроля оптических деталей на просвет

1.13. Метод ортогональных лучей

Рассмотрим методы контроля формы выпуклых асферических зеркал в основе которых положена базовая схема ортогональных лучей. Данная схема предложена профессором Пуряевым Д.Т. в 1982 г. рис. 1.16 [75].

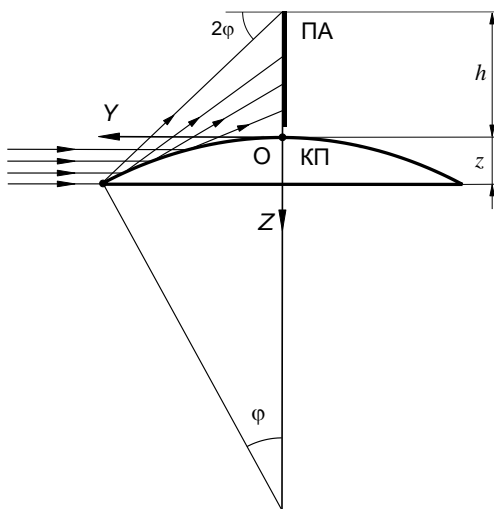


Рис. 1.16.Схема ортогональных лучей

Схема ортогональных лучей - это схема освещения КП параллельным пучком лучей, направленным перпендикулярно оси симметрии КП. Анализируя структуру отраженного от КП луча тем или иным методом, можно определить форму профиля КП. Вращение КП вокруг оси симметрии позволяет выполнить контроль множества профилей и восстановить топографическую карту отклонений КП.

В схеме ортогональных лучей лучи, отраженные от КП, отклоняются на угол 2φ от первоначального направления. Угол φ – это угол наклона нормали в точке падения луча на КП. Высота h отраженного луча в плоскости анализа определяется в первую очередь этим углом, а не диаметром КП. Поэтому размер анализируемого волнового фронта зависит от угла наклона крайней нормали φ исследуемой детали, а не от ее диаметра.

Рассмотрим методы контроля на базе схемы ортогональных лучей.

1.13.1. Метод Гартмана на базе схемы ортогональных лучей

Модифицированный метод Гартмана в схеме ортогонального освещения контролируемой поверхности [76-78] рис. 1.17.

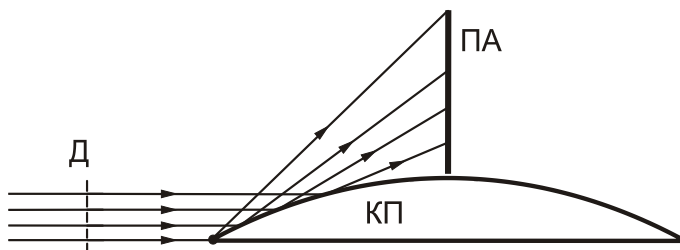


Рис. 1.17. Модифицированный метод Гартмана

В пучке коллимированных лучей устанавливается диафрагма $Д$ с отверстиями. Прошедшие через отверстия диафрагмы пучки лучей отражаются от КП и направляются в плоскость анализа (ПА), где образуется ряд световых пятен. Зная геометрические параметры схемы, по координатам центров световых пятен, можно определить отклонение формы контролируемой поверхности от идеальной теоретической. Перемещая диафрагму вдоль оси OZ можно сканировать весь профиль КП.

Метод пограничной кривой в схеме ортогонального освещения КП заключается в том, что в световой пучок, падающий на КП, вводят непрозрачный экран с острым краем - так называемый «нож Фуко» (рис. 1.18).

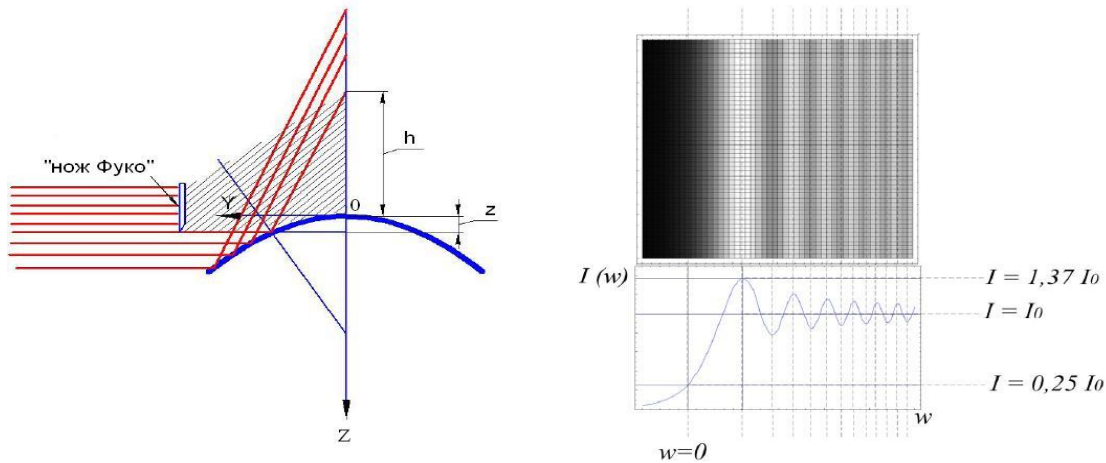


Рис. 1.18. Метод пограничной кривой

«Нож Фуко» создает границу светотени в плоскости, перпендикулярной меридиональному сечению. Смещение его вдоль оси OZ , приводит к смещению границы светотени в ПА. Зная геометрические параметры схемы, а также измерив координаты ножа и границы светотени, можно определить отклонение формы профиля КП от идеального теоретического. На границе светотени при использовании монохроматического источника света можно наблюдать дифракцию. Геометрическая граница светотени соответствует четверти интенсивности излучения.

1.13.2. Неинтерференционный метод контроля на базе схемы ортогональных лучей

Рассмотрим неинтерференционный метод контроля формы поверхности выпуклых асферических зеркал [79] в схеме ортогонального освещения рис. 1.19. Линзовый растр из N элементов располагается в отраженных от контролируемой поверхности лучах предметного пучка 2, а также освещается опорным пучком лучей 1. Центр входного зрачка i -го элемента обозначен P_i . Так как элемент растра представляет собой плоско-выпуклую линзу, центр кривизны которой совпадает с

плоской поверхностью, то главный луч каждого пучка, сфокусированного линзой, является энергетическим и геометрическим центром соответствующего пучка.

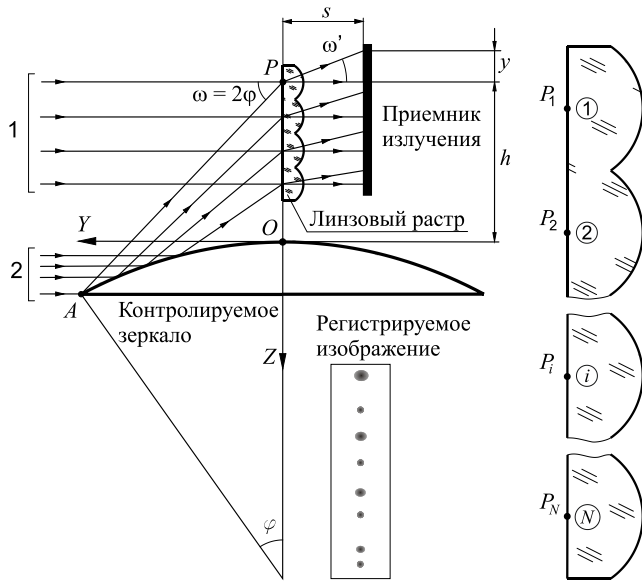


Рис. 1.19. Неинтерференционный метод контроля

Лучи опорного 1 и предметного 2 пучков фокусируются линзовым растром в плоскости приемника в виде пятен рис. 1.20. Расстояние между точками пересечения H_{1i} и H_{2i} главных лучей с плоскостью приемника обозначено, как y_i . Таким образом, суть этого метода заключается в том, что измеряя расстояние y_i , а также расстояние h_i от вершины контролируемой детали до входного зрачка i -го элемента растра, можно найти уравнение профиля контролируемой поверхности.

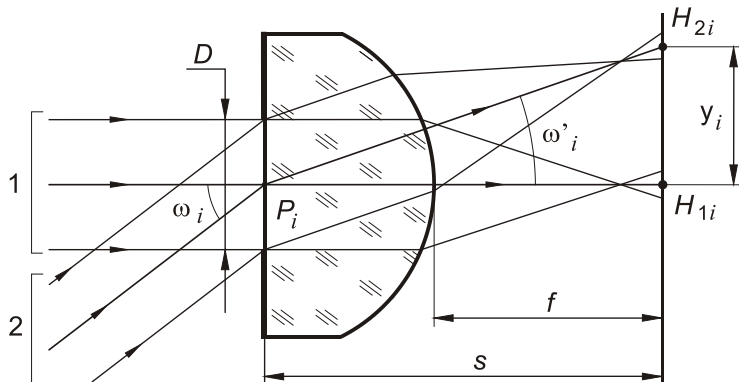


Рис. 1.20. Элемент линзового растра

1.13.3. Интерференционный метод контроля на базе схемы ортогональных лучей

Рассмотрим интерференционный метод контроля на базе схемы ортогональных лучей, предложенный Д.Т. Пуряевым [31].

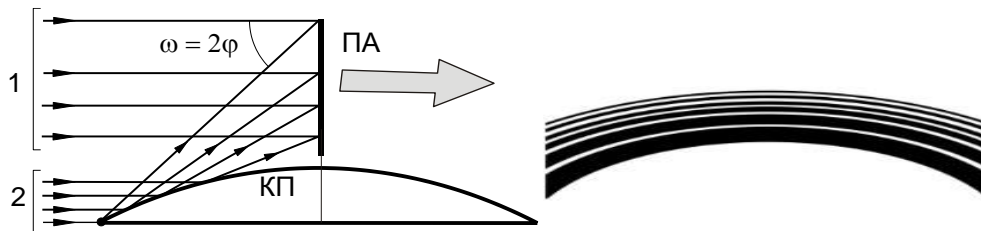


Рис. 1.21. Схема интерференционного метода контроля

Согласно предложенному методу КП освещается параллельным монохроматическим пучком лучей, направленным перпендикулярно оси симметрии контролируемой детали, как показано на рис. 1.21. Часть пучка – опорный пучок 1 – проходит над контролируемой поверхностью, а другая часть – предметный пучок 2 – отражается от нее.

Предметный и опорный пучки интерферируют в плоскости регистрации. Поскольку форма первого максимума интерференционной картины – является кривой, эквидистантной сагиттальному профилю контролируемой поверхности, то ее анализ позволяет судить о форме профиля контролируемой поверхности в сагиттальном сечении. Таким образом, метод позволяет контролировать выпуклые асферические и сферические поверхности различной формы без использования крупногабаритных прецизионных вспомогательных компонентов. Однако при контроле выпуклых поверхностей большого диаметра регистрировать интерференционный максимум крайне трудно из-за его большой длины и значительной стрелки прогиба – приходится сканировать полосу вдоль криволинейной траектории. Поэтому описанный метод контроля применим для деталей маленького диаметра.

1.14. Выводы по главе 1

Проанализированы существующие методы контроля выпуклых асферических зеркал и выявлены следующие основные проблемы контроля.

1. Для контроля выпуклых крупногабаритных АП существующими методами необходимо изготавливать вспомогательные крупногабаритные прецизионные оптические детали, диаметром большим, чем КП. При этом, изготовленные вспомогательные оптические детали подходят для контроля выпуклых АП конкретной формы и, как правило, используются один раз.

2. Существующие методы контроля являются не универсальными, т.е. для контроля асферических выпуклых деталей с различными формами требуется частичное изменение оптической системы прибора контроля.

Проанализированы разрабатываемые методы контроля, такие как дефлектометрия, а также методы на основе ортогональных лучей. Описанные методы не пригодны для контроля крупногабаритных астрономических зеркал.

Схема освещения ортогональных лучей является перспективной для разработки нового интерференционного метода контроля, универсального для контроля формы выпуклых крупногабаритных АП различной формы, работающего без использования оптических деталей диаметра большего, чем диаметр КП.

ГЛАВА 2

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ

Анализ существующих методов, представленный в первой главе показал, что в основе нового интерференционного метода контроля выпуклых крупногабаритных зеркал целесообразно положить схему ортогональных лучей, предложенную профессором Пуряевым. Схема ортогональных лучей – это схема освещения КП параллельным пучком лучей, который направлен по нормали к оси симметрии детали. Однако, в отличие от интерференционного метода контроля на базе схемы ортогональных лучей, предложенного профессором Пуряевым, целесообразно анализировать не первый максимум интерференционной картины, а интенсивность интерференционной картины в меридиональном сечении.

2.1. Теоретические основы метода

Автором предложен и разработан новый интерференционный метод контроля выпуклых оптических поверхностей на базе схемы ортогональных лучей. В отличие от метода, предложенного профессором Пуряевым, анализируется не первый максимум интерферограммы, лежащий в сагиттальном сечении, а распределение интенсивности в меридиональном сечении интерферограммы-

Информация о меридиональном профиле КП содержится в координатах интерференционных полос в меридиональном сечении. При этом размер вспомогательных оптических элементов, необходимых для формирования плоского волнового фронта, зависит не от диаметра КП, а от ее крутизны (угла φ наклона крайней нормали). Из элементарных геометрических соображений (рис. 2.1) следует, что когда крутизна зеркала не превышает $22,5^\circ$ ($2\varphi = 45^\circ$), а ПА расположена на расстоянии $s = D/2$ от оси КП, диаметр пучка лучей D_k ,

требующийся для освещения КП, меньше диаметра D этой поверхности. У большинства крупногабаритных зеркал в разрабатываемых телескопах этот угол существенно меньше $22,5^\circ$.

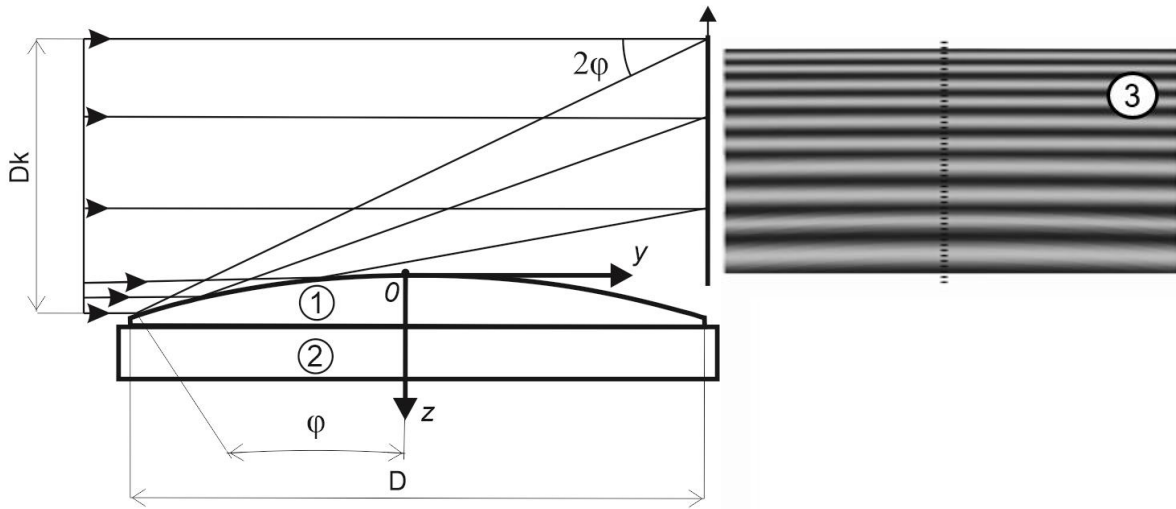


Рис.2.1. Интерференционная схема контроля: 1 – КП, 2 – поворотный стол, 3 – интерференционная картина

В табл. 4 приведены углы φ выпуклых поверхностей асферических зеркал в разрабатываемых телескопах и рассчитанные требуемые диаметры D_k вспомогательных оптических элементов, необходимые для освещения КП.

Таблица 4.

Параметры крутизны выпуклых астрономических зеркал

Телескоп	Диаметр выпуклого зеркала D , м	Угол наклона крайней нормали $\varphi_{кр}, ^\circ$	Диаметр коллимированного пучка лучей, м
<i>E-ELT</i>	4,25	11	0,9
<i>LSST</i>	3,42	15	1,0
<i>TMT</i>	3,04	14	0,8
<i>VISTA</i>	1,24	8	0,2
<i>MMT</i>	1,20	9	0,2
<i>VLT</i>	1,12	7	0,2

Рассмотрим разработанный метод контроля на базе схемы ортогональных лучей. Согласно ему, отраженный от КП волновой фронт интерферирует с опорным пучком, проходящим над КП, как показано на рис. 2.1.

Анализ распределения интенсивности в меридиональном сечении интерферограммы $З$ позволяет судить о качестве меридионального профиля КП. Для получения топографии, состоящей из множества профилей КП, деталь необходимо вращать вокруг ее оси симметрии на поворотном столе $З$.

Уравнение меридионального профиля поверхности в декартовой системе координат имеет вид:

$$z(y) = \frac{y^2}{R \cdot \left(1 + \sqrt{1 - (k + 1) \frac{y^2}{R^2}}\right)} + a_3 \cdot y^3 + \dots + a_n \cdot y^n, \quad (2.1)$$

где R – радиус кривизны при вершине КП, k – коническая константа, a_i – коэффициенты асферики.

В данном случае начало координат 0 лежит в вершине зеркала, а ось z совпадает с осью вращения зеркала и направлена вниз.

Отраженные от поверхности лучи отклоняются на угол 2φ от своего первоначального направления, где φ – угол наклона нормали к поверхности.

Угол наклона нормали φ к поверхности в зависимости от координаты y может быть определен выражением (из определения касательной):

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{dz(y)}{dy}. \quad (2.2)$$

Ширина полос интерференционной картины зависит от угла наклона отраженных от КП лучей и описывается уравнением (2.3):

$$b = \frac{\lambda}{\sin 2\varphi}, \quad (2.3)$$

где λ – длина волны интерферирующего монохроматического излучения.

Высота интерференционных полос в плоскости регистрации описывается выражением:

$$h = z \cdot \operatorname{tg} 2\varphi. \quad (2.4)$$

Поскольку угол наклона нормали φ меняется в зависимости от координаты КП, интерференционная картина, соответствующая меридиональному профилю выпуклой КП, имеет переменный шаг, причем ширина полос интерференционной картины уменьшается от вершины КП к ее краю. Каждая конкретная форма меридионального профиля КП имеет уникальное распределение $b(h)$ интерференционной картины в плоскости регистрации, которое несет информацию о форме исследуемого профиля. Анализируя зарегистрированную интерференционную картину можно судить о качестве КП.

На рис. 2.2 показан пример кривых $b(h)$ от КП с одинаковым радиусом кривизны при вершине R и разными коническими константами k .

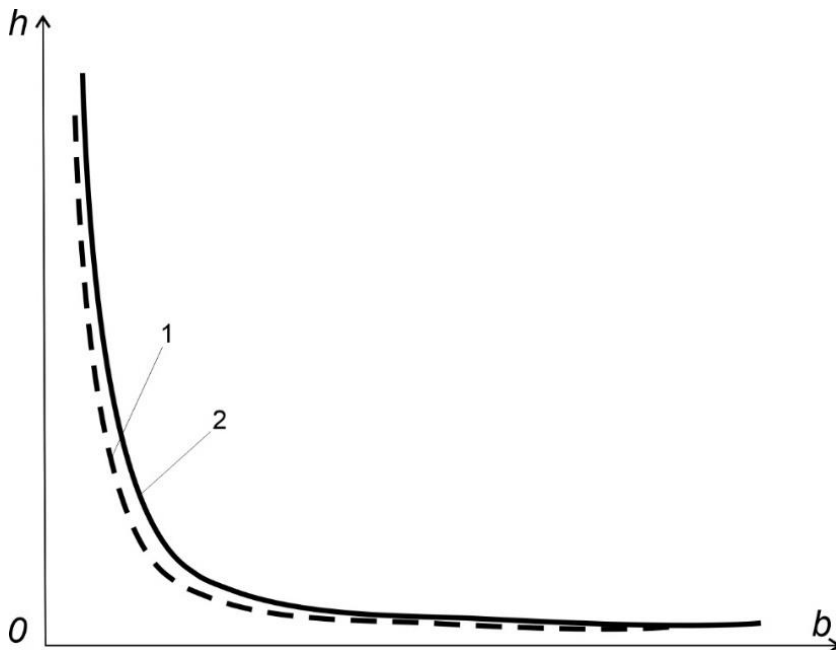


Рис.2.2. Пример кривой $b(h)$ гиперболической поверхности 1, сферической поверхности 2 с одинаковым радиусом кривизны при вершине R

Таким образом, схема ортогональных лучей в предложенной оригинальной модификации позволяет контролировать профиль выпуклого зеркала крутизной угла φ до $22,5^\circ$ без применения вспомогательных оптических деталей размером большим, чем контролируемое зеркало.

2.2. Метод математической обработки результатов измерения с использованием огибающей семейства парабол

Для обработки интерферограмм, полученных разработанным методом, и вычисления отклонения формы КП требуется специальный математический алгоритм, т.к. существующие стандартные алгоритмы предназначены для обработки интерфорграмм в виде полос равной ширины, в которых измерительная информация содержится в локальных изменениях этой ширины. В нашем случае, информация содержится в законе изменения ширины интерференционных полос.

Для обработки таких интерферограмм могут быть предложены различные подходы. В данной диссертационной работе разработан алгоритм, работающий без априорной информации о форме КП и позволяющий не только построить карту отклонений, но и вычислить геометрические параметры КП, что представляет особый практический интерес.

Рассмотрим принцип работы разработанного метода математической обработки интерференционной картины, результатом которого являются координаты меридионального профиля КП и который не требует априорной информации о параметрах исследуемого зеркала.

2.2.1. Сущность метода обработки

Рассмотрим сущность предлагаемого метода математической обработки интерферограммы, получаемой при контроле выпуклой поверхности зеркала разработанным методом.

Рассмотрим рис. 2.3. Интерферограмма регистрируется в плоскости анализа ПА, и образуется при взаимодействии плоских пучков лучей, один из которых (пучок 2) распространяется над КП, не взаимодействуя с ней, а другой (пучок 1) отражается от поверхности. ПА расположена на расстоянии s от вершины КП.

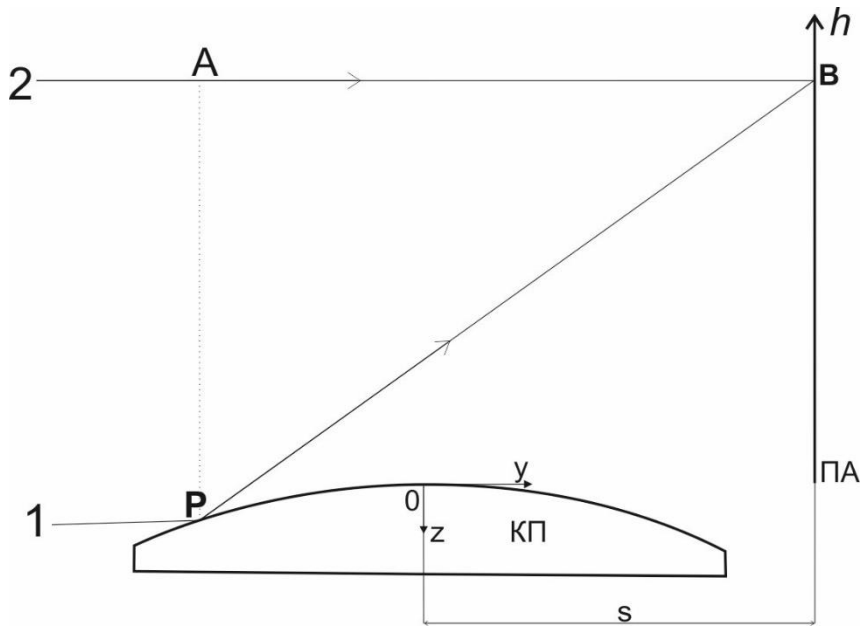


Рис. 2.3. Схема освещения детали параллельным пучком лучей

Результатом измерения являются координаты интерференционных полос. Каждая полоса соответствует изменению разности хода между интерферирующими пучками на одну длину волны, поэтому в результате измерения координат интерференционных полос можно определить распределение разности хода вдоль ПА, т.е. функцию $\Delta(h)$. Из рис. 2.3 видно, что разность хода в произвольной точке B в ПА равна

$$\Delta_B = PB - AB. \quad (2.5)$$

Координаты точки P неизвестны, и задача восстановления профиля КП заключается как раз в нахождении координат всех его точек. Однако про точку P известно, что она принадлежит кривой, для которой справедливо соотношение:

$$PB - AB = \text{const} = \Delta_B. \quad (2.6)$$

Геометрическое место точек P , удовлетворяющих (2), представляет собой параболу рис. 2.4, геометрический фокус которой совпадает с точкой B . Аналогичные рассуждения справедливы для любой другой точки КП. Поэтому профиль КП – огибающая семейства парабол, как показано на рис. 2.5.

Для определения уравнения КП необходимо записать уравнение параболы в системе координат xOz , проходящей через вершину КП. Для этого введем

вспомогательную систему координат $x'Oz'$ - локальную, проходящую через вершину параболы.

Каноническое уравнение параболы в локальной системе координат имеет вид:

$$y' = \frac{z'^2}{2p(h)}, \quad (2.7)$$

где p - параметр параболы, который равен расстоянию между фокусом B и директрисой параболы d и зависит от координаты h отраженного луча l в ПА.

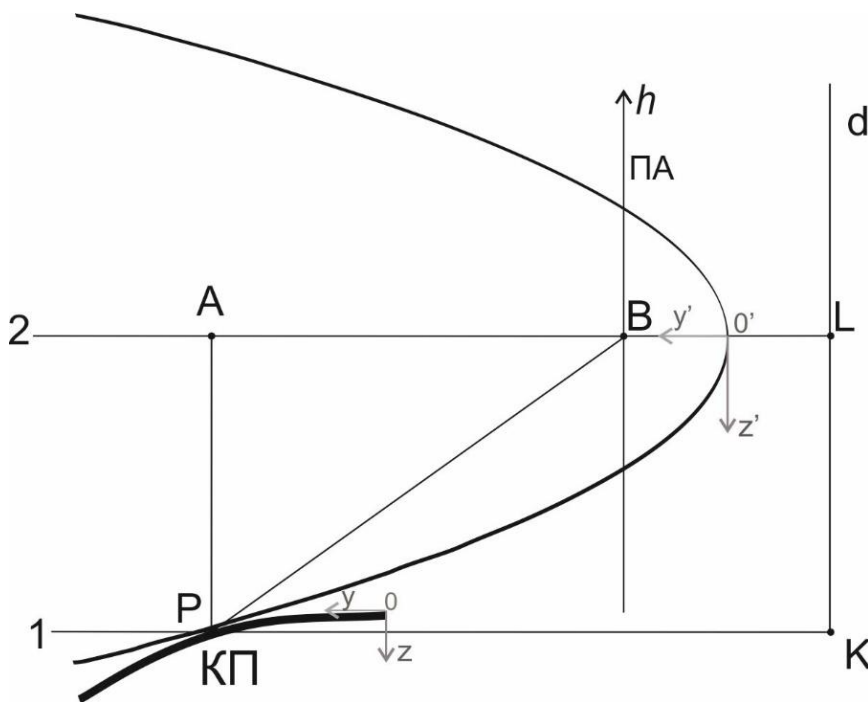


Рис. 2.4. К определению уравнения параболы

Перейдем из локальной системы координат $x'Oz'$ в систему yoZ . Тогда уравнение (2.7) примет вид:

$$y(z) = \left(\frac{-z - h}{2p(h)} \right) - \left(s + \frac{p(h)}{2} \right), \quad (2.8)$$

где h - высота отраженного луча в ПА, которая зависит от координаты z отражения луча l от КП.

Так как из определения параболы отрезки PB и PK равны, то разность хода $PB - AB = \Delta$ равна также $AL - AB = p$., следовательно, параметр параболы p равен разности хода лучей PB и AB : $p = \Delta$.

В результате реальных измерений получаются два массива данных: h и Δ , которые можно аппроксимировать функцией $h_a(\Delta)$. Тогда параметрическое уравнение i -ой параболы в системе координат, связанной с вершиной КП, можно записать как:

$$y_i(z) = \left(\frac{-z - h_a(\Delta_i)}{2\Delta_i} \right) - \left(s + \frac{\Delta_i}{2} \right), \quad (2.9)$$

где Δ_i – параметр, который является элементом массива Δ .

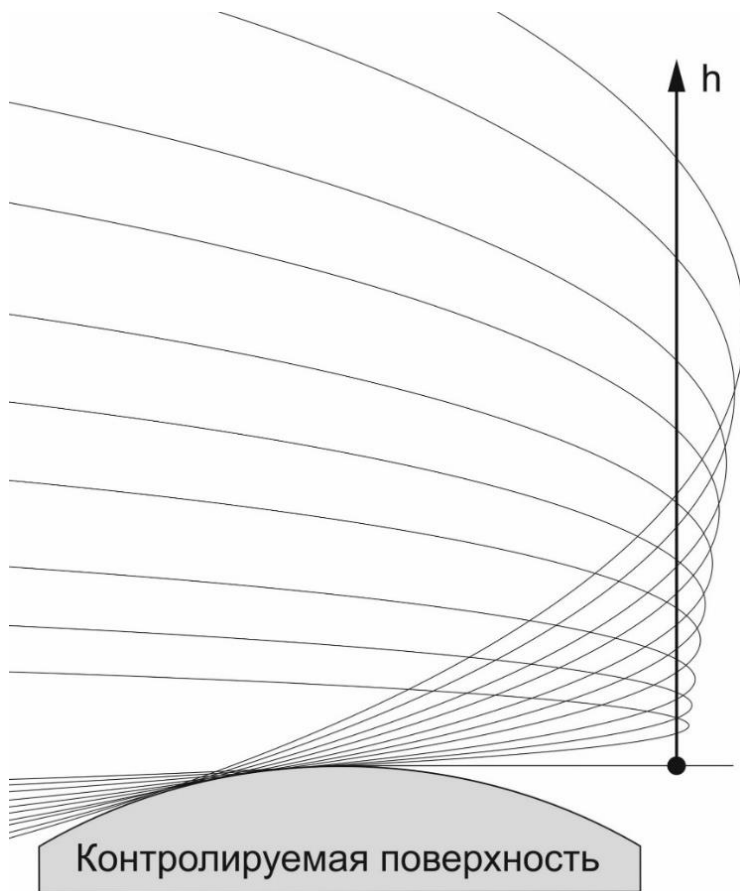


Рис. 2.5. КП, как огибающая семейства парабол

Для определения координат множества точек P , принадлежащих КП, необходимо найти огибающую семейства парабол. Чтобы найти координаты произвольной точки P_i , нужно решить систему уравнений:

$$\begin{aligned} F_i(y_i, z, \Delta_i) &= 0 \\ \frac{dF_i(y_i, z, \Delta_i)}{d\Delta_i} &= 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Таким образом, восстановление профиля КП сводится к решению систем уравнений (2.10).

2.3. Численное моделирование разрабатываемого метода

Исследуем разрабатываемый метод восстановления профиля КП огибающей семейства парабол на примерах с помощью численного моделирования для оценки точности данного метода и области его применения. Для наглядности рассмотрим прямую и обратную задачи восстановления профиля КП.

2.3.1. Прямая задача восстановления профиля КП (случай без погрешностей формы)

Прямая задача заключается в вычислении параметров (по координатам интерферограммы в схеме ортогональных лучей от заданной КП) такого семейства парабол, огибающая к которым является профилем заданной КП.

Рассмотрим нахождение параметров семейства парабол, являющихся касательными к профилю выпуклой осесимметричной КП.

Уравнение профиля КП без погрешности имеет вид:

$$y(z) = \sqrt{2 \cdot R \cdot z - (k + 1) \cdot z^2}, \quad (2.11)$$

где y , z – координаты меридионального профиля КП; R , k – параметры контролируемой поверхности, а именно радиус при вершине КП и коническая константа.

Чтобы найти уравнение семейства парабол необходимо знать параметр этого уравнения, который равняется расстоянию между фокусом и директрисой

параболы. Физически это расстояние равно разности хода между интерферирующими лучами в схеме освещения ортогональных лучей рис. 2.6.

Зная уравнение КП (2.11) из геометрических соображений получим уравнение для разности хода интерферирующих лучей:

$$\Delta(z) = \frac{y(z)+s}{\cos\left(2 \cdot \arctg\left[\frac{dz}{dy}\right]\right)} - (y(z) + s). \quad (2.12)$$

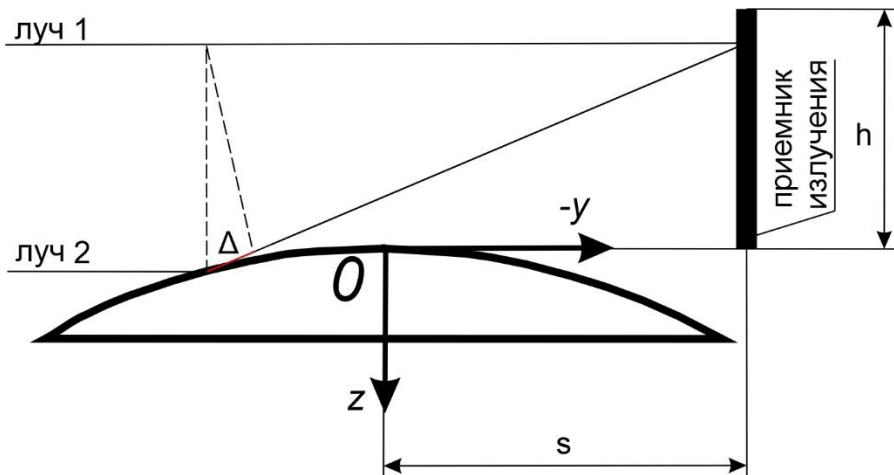


Рис. 2.6. К определению разности хода

Каждой конкретной форме КП соответствует уникальное распределение разности хода вдоль ПА, т.е. функция $\Delta(h)$. Для нахождения функции $\Delta(h)$, соответствующей профилю выпуклой поверхности с заданным уравнением, определим координаты интерференционной картины в плоскости анализа и соответствующие разности хода интерферирующих лучей. Уравнение высоты интерферирующих лучей в плоскости анализа имеет вид:

$$h(z) = \operatorname{tg} \left[2 \cdot \arctg \left(\frac{dz}{dy} \right) \right] \cdot (y(z) + s) - z. \quad (2.13)$$

Для примера вычислим семейство парабол, огибающая которых является профилем выпуклой КП с радиусом кривизны при вершине $R=500$ мм, конической константой $k=0$ (сферическая поверхность), контролируемого в схеме ортогональных лучей, в которой ПА расположена на расстоянии $s=200$ мм от вершины КП. Рассмотрим случай, когда исследуемая поверхность имеет идеальную форму. Параметры КП для удобства также представлены в табл. 5.

Параметры КП

Радиус кривизны КП, мм	500
Диаметр КП, мм	180
Форма КП	сферическая
Погрешность формы КП	без погрешности

Уравнение КП примет вид:

$$y(z) = \sqrt{1000 \cdot z - z^2}. \quad (2.14)$$

Для этой КП численно найдено распределение разности хода интерферирующих лучей в плоскости анализа (см. Приложение 1). Определены высоты h_i , соответствующие разностям хода Δ_i . Полученные массивы данных Δ_i и h_i подставим в параметрическое уравнение параболы:

$$y_p(z) = \frac{1}{2 \cdot \Delta(z)} \cdot (z + h(z))^2 - s - \frac{\Delta(z)}{2}. \quad (2.15)$$

На рис. 2.7 представлен профиль выпуклой поверхности (а), описываемый уравнением (2.14), параметры которого заданы выше. А также вычисленные параболы. В Приложении 1 представлен рисунок в другом масштабе, где более наглядно представлены вычисленные параболы.

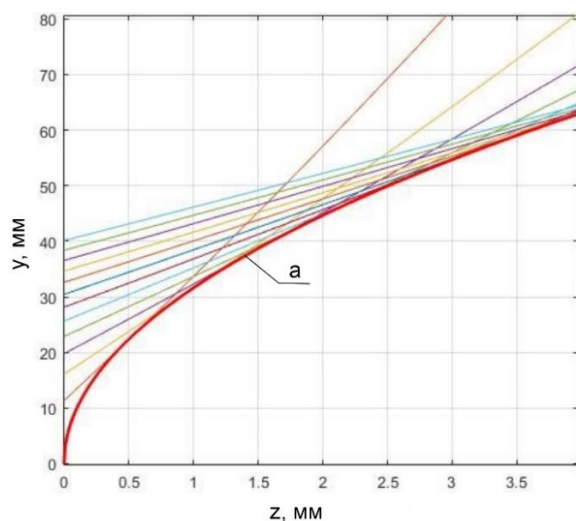


Рис. 2.7. Семейство парабол, касательных к КП без погрешностей; а – фрагмент профиля КП

В Приложении 1 представлен расчёт параметров искомым парабол. Также в Приложении 1 представлен расчет координат общих точек КП с вычисленными параболом. Координаты точек в миллиметрах совпадают до 13-го знака после запятой, что говорит о том, что вычисленные параболы являются касательными к КП.

Таким образом, по координатам интерферограммы от заданной КП, найдены параболы, являющиеся касательными к КП.

2.3.2. Прямая задача восстановления профиля КП (случай с местной ошибкой формы)

Рассмотрим прямую задачу нахождения параметров семейства парабол касательных к профилю выпуклой осесимметричной КП, по координатам ее интерференционной картины, полученной в схеме ортогональных лучей, в том случае, когда КП имеет местную погрешность формы в виде Гауссоиды. Уравнение местной погрешности задается в виде:

$$y_{\text{п}}(z) = A \cdot e^{\left(\frac{-(z-z_0)^2}{W}\right)}, \quad (2.16)$$

где A – амплитуда Гауссоиды, z_0 – центр Гауссоиды, W – ширина по уровню 0,5.

Тогда уравнение поверхности с местной ошибкой имеет вид:

$$y(z) = \sqrt{2 \cdot R \cdot z - (k + 1) \cdot z^2} + A \cdot e^{\left(\frac{-(z-z_0)^2}{W}\right)}. \quad (2.17)$$

Определим параметры семейства парабол, огибающая которых представляет собой КП с местной ошибкой формы в виде Гауссоиды, которая имеет амплитуду $A=0,001$ мм, ширину $W=2$ мм и центр в точке $z_0=2$ мм исследуемой поверхности. Параметры КП также представлены в табл.6.

Подставив параметры местной ошибки и параметры формы контролируемой поверхности, уравнение принимает вид:

$$y(z) = \sqrt{1000 \cdot z - z^2} + 0,001 \cdot e^{\left(\frac{-(z-2)^2}{2}\right)}. \quad (2.18)$$

Параметры КП

Радиус кривизны КП, мм	500
Диаметр КП, мм	180
Форма КП	Сферическая
Погрешность формы КП	местная ошибка в виде Гауссоиды амплитудой 1 мкм

Численно найдено распределение разности хода интерферирующих лучей вдоль плоскости анализа, соответствующее профилю выпуклой поверхности, описываемого уравнением (2.18), в виде массивов данных Δ и h (Приложение 2). По найденным массивам данных вычислены параметры семейства парабол, касательных к профилю исследуемой поверхности.

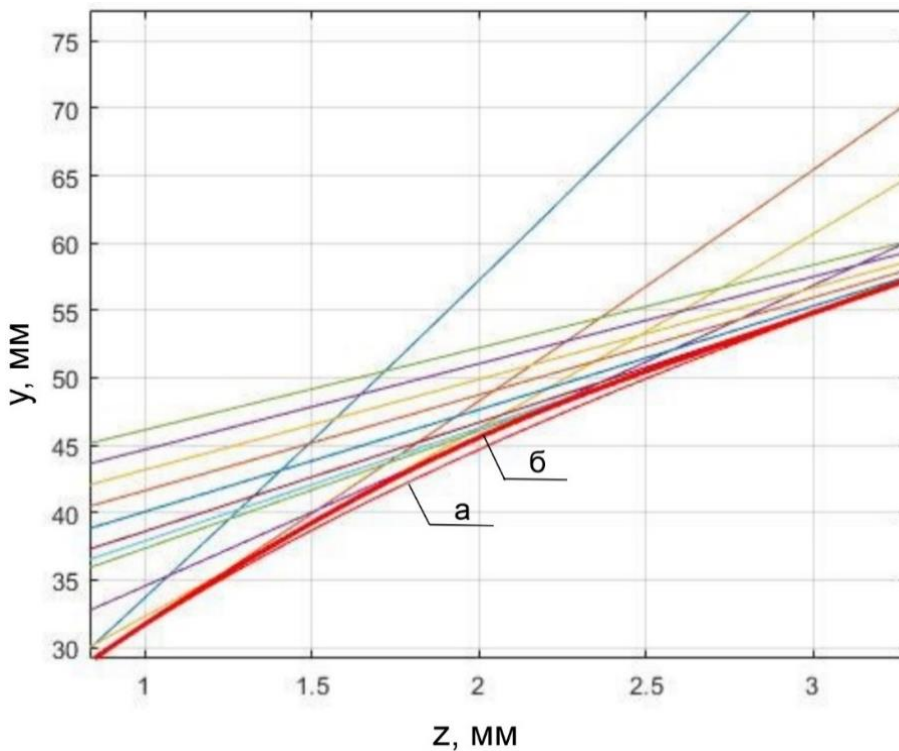


Рис. 2.8. Семейство парабол, касательных к КП с погрешностью; а – фрагмент идеального профиля КП; б – фрагмент заданного профиля КП с местной ошибкой формы

На рис. 2.8 представлен профиль выпуклой поверхности с местной ошибкой формы (кривая b), описываемый уравнением (2.18), а также профиль поверхности имеющий идеальную форму (кривая a), описываемый уравнением (2.14). Также на графике представлены найденные параболы. В Приложении 2 также представлен рисунок в другом масштабе, где более наглядно представлены вычисленные параболы.

Расчет параметров парабол представлен в Приложении 2. Также в Приложении 2 представлен расчет координат общих точек КП с вычисленными параболой. Координаты точек в миллиметрах совпадают до 12-го знака после запятой, что говорит о том, что вычисленные при помощи координат интерферограммы параболы являются касательными к заданной КП с местной ошибкой формы.

2.3.3. Обратная задача восстановления профиля КП (случай без погрешности формы)

В реальной задаче контроля поверхности уравнение его формы известно с погрешностью, поскольку существует допуск на параметры формы, а именно радиус кривизны при вершине поверхности, коническую константу и коэффициенты асферики. Поэтому актуальным является решение обратной задачи – восстановление формы поверхности по параметрам интерференционной картины.

В предложенном методе восстановления профиля КП необходима и достаточна информация о координатах лучей, интерферирующих в плоскости анализа и их разности хода, по которой можно определить координаты профиля КП. В реальной задаче исследования формы КП невозможно с достаточной точностью определить промежуточную между максимумами и минимумами разность фаз интерференционной картины, поэтому в качестве обратной задачи

восстановления профиля КП рассмотрим случай, когда известны только координаты максимумов интенсивности интерферограммы в плоскости анализа. Тогда разность хода между интерферирующими лучами будет пропорциональна порядковому номеру интерференционной полосы и будет равняться $\Delta_i = (i+1) \cdot \lambda/2$.

В качестве исходных данных используем рассчитанные в Приложении 3 параметры интерференционной картины, а именно распределение разности хода Δ по высоте h . В отличие от предыдущих разделов (2.3.1, 2.3.2) параметры рассчитываются только в тех точках, которые соответствуют максимумам интерферограммы, что более приближено к экспериментальным условиям. Параметры интерференционной картины рассчитаны для КП уравнение которой задано в разделе 2.3.1. Параметры КП представлены в табл. 7.

Таблица 7.

Параметры КП

Радиус кривизны КП, мм	500
Диаметр КП, мм	180
Форма КП	сферическая
Погрешность формы КП	без погрешности

Найдем параметрическое уравнение семейства парабол по формуле (2.15), подставив в нее вектора Δ и h .

Параметрическое уравнение, определяющее огибающую семейства парабол примет вид:

$$\begin{cases} y_i = \frac{2}{\Delta_i} \cdot (z_i + h_i)^2 - s - \frac{\Delta_i}{2} = 0 \\ dy_i = \frac{2}{\Delta_i} \cdot (z_i + h_i) + (z_i + h_i)^2 \cdot \left(\frac{-1}{\Delta_i^2}\right) \cdot d\Delta_i - \frac{d\Delta_i}{4} = 0 \end{cases}, \quad (2.19)$$

где $d\Delta_i = \frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{h_{i+1} - h_i}$ по определению производной.

Каждой i -й интерференционной полосе соответствует касательная парабола со своими параметрами Δ_i и h_i .

Решением параметрического уравнения являются координаты (y, z) точек, касательных к параболам:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_i = \frac{\left(-\frac{\Delta_i}{\Delta_i^2} + \frac{2 \cdot h_i \cdot \frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i^2}}{\Delta_i^2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta_i} - \frac{h_i \cdot d \Delta_i}{2 \Delta_i^2} \right)^2 + \frac{d \Delta_i}{\Delta_i^2} \cdot \left(\frac{h_i}{\Delta_i} - \frac{h_i^2}{4 \Delta_i^2} \right) - \frac{d \Delta_i}{4}}{-2 \cdot d \Delta_i / \Delta_i^2} \\ y_i = \frac{2}{\Delta(z_i)} \cdot \left(\frac{\left(-\frac{2 \Delta_i}{\Delta_i^2} + \frac{2 \cdot h_i \cdot d \Delta_i}{\Delta_i^2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta_i} - \frac{h_i \cdot d \Delta_i}{2 \Delta_i^2} \right)^2 + \frac{d \Delta_i}{\Delta_i^2} \cdot \left(\frac{h_i}{\Delta_i} - \frac{h_i^2}{4 \Delta_i^2} \right) - \frac{d \Delta_i}{4}}{-2 \cdot d \Delta_i / \Delta_i^2} + h(z_i) \right)^2 - s - \frac{\Delta(z_i)}{2} \end{array} \right. , \quad (2.20)$$

где i – номер параболы.

В Приложении 3 представлен текст программы для расчета координат точек кривой, огибающей семейство парабол. Параметры парабол вычислены по параметрам интерферограммы исследуемой КП. На рис. 2.9 показан фрагмент полученного профиля: символами «+» представлены координаты вычисленных точек, а символами «o» представлены точки изначально заданного профиля КП. Несколько вычисленных точек определены с высокой погрешностью, они соответствуют вершине КП.

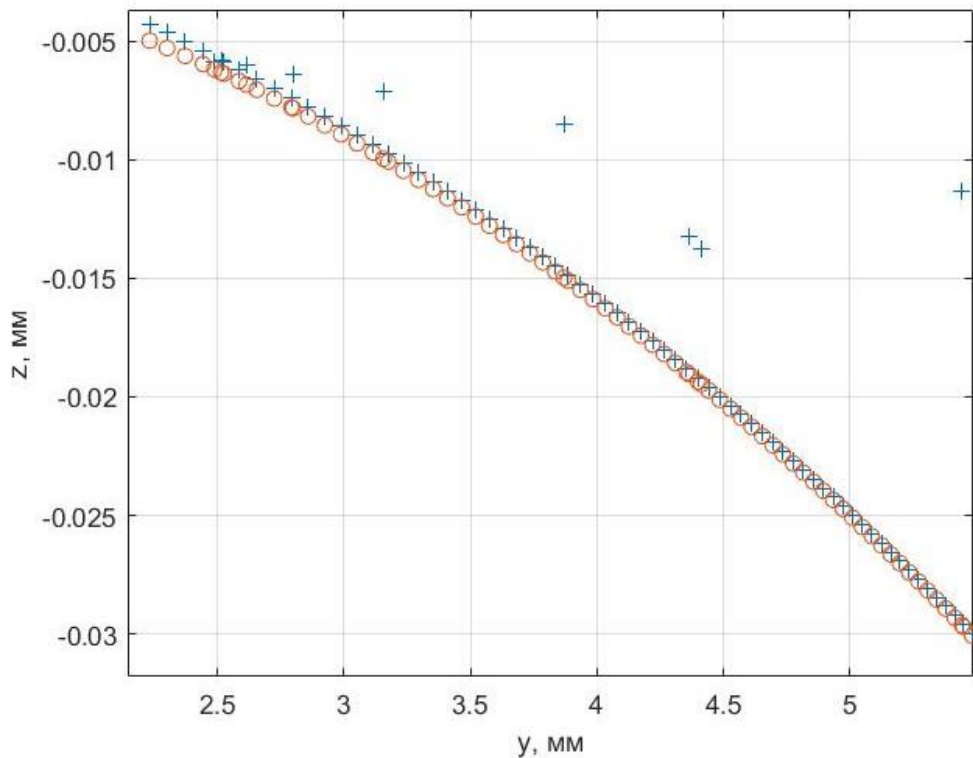


Рис. 2.9. Огибающая семейства парабол; «o» - фрагмент заданного профиля КП, «+» - огибающая семейства парабол

В табл. 8 представлена погрешность – несовпадение координат КП с координатами огибающей.

Таблица 8.

Погрешность определения координат для разных зон КП

Координата КП y , мм	0..1	2	5	10	20..90
Погрешность определения координат Δz , нм	>800	800	100	10	<10

Таким образом, математический алгоритм позволяет вычислять координаты КП, при этом погрешность вычисления зависит от дискретности (от ширины полос), потому меняется в различных зонах КП.

2.3.4. Обратная задача восстановления профиля КП (случай с погрешностью формы)

Поскольку в реальности не существует идеальных поверхностей рассмотрим пример восстановления профиля КП с местной ошибкой формы при помощи огибающей семейства парабол, который имеет наибольшую практическую значимость. Моделировалась интерферограмма от КП с местной ошибкой формы в виде Гауссоиды. Геометрические параметры КП представлены в табл. 9. Местная ошибка формы в виде Гауссоиды задана уравнением:

$$y(z) = A_1 \cdot e^{\left(\frac{-(z-z_1)^2}{W}\right)}, \quad (2.21)$$

где $A_1 = 0,05$ мм – амплитуда Гауссоиды, $W = 0.001$ мм – ширина Гауссоиды, z_1 – координата центра Гауссоиды на КП, которая равна 0,2 мм.

В Приложении 5 представлен текст программы, в которой были рассчитаны параметры интерференционной картины заданной поверхности, а именно

распределение разности хода Δ по высоте h поверхности. Параметры рассчитываются только в тех точках, которые соответствуют максимумам интерферограммы.

Таблица 9.

Параметры КП

Радиус кривизны КП, мм	500
Диаметр КП, мм	70
Форма КП	Сферическая
Погрешность формы КП	местные ошибки в виде Гауссоиды

На рис. 2.10 показан фрагмент профиля КП с местной ошибкой формы b , а также профиль поверхности, имеющий идеальную форму a .

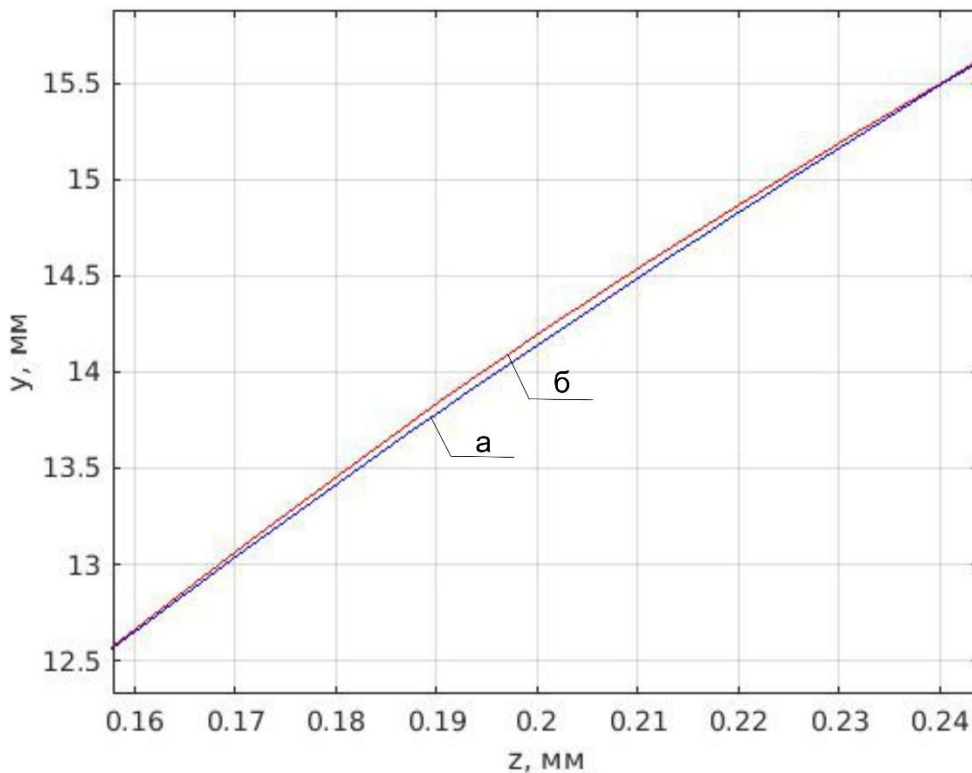


Рис. 2.10. Фрагмент заданного профиля КП с местной ошибкой формы; а – фрагмент профиля КП идеальной формы, б – фрагмент заданного профиля КП с местной ошибкой формы

На рис. 2.11 показан фрагмент профиля КП, в котором моделировалась местная ошибка формы в виде Гауссоиды: символами «+» представлены координаты точек, вычисленных при помощи огибающей семейства парабол, заданный профиль КП с местной ошибкой формы b , профиль поверхности, имеющий идеальную форму a .

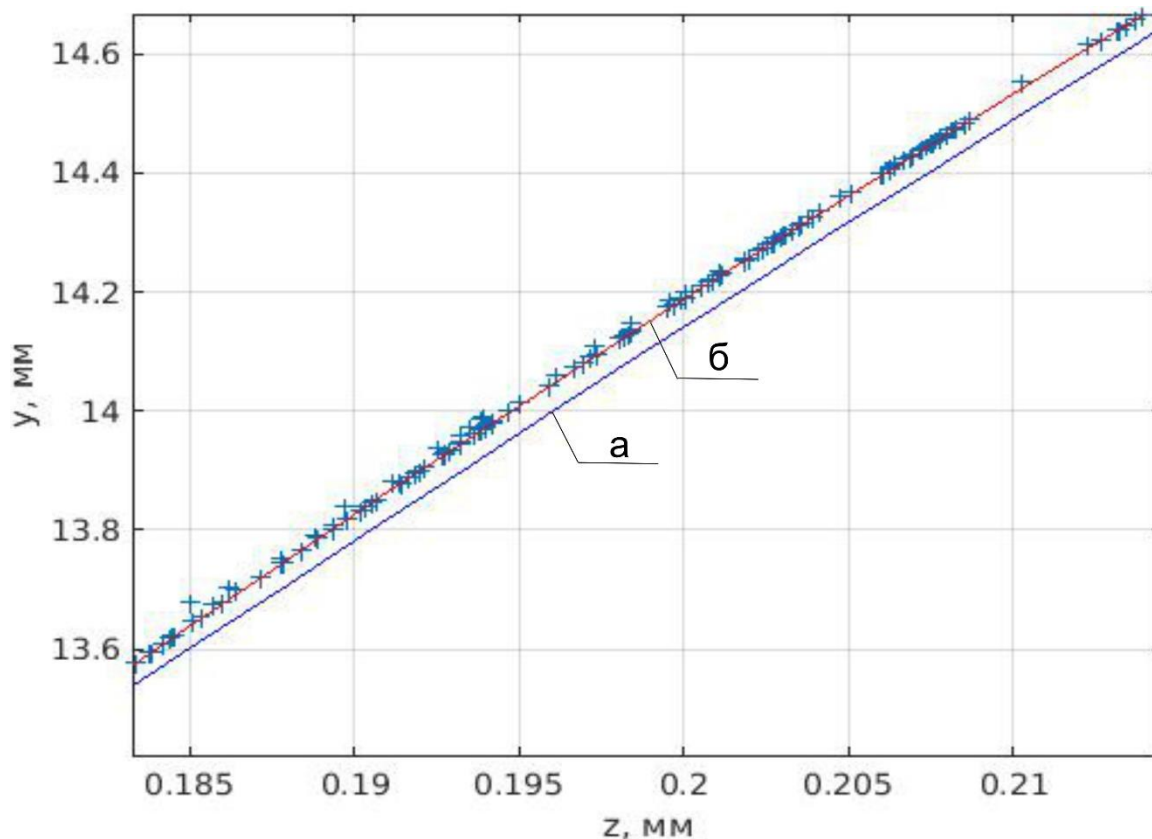


Рис. 2.11. Результаты восстановления профиля с местной ошибкой формы; а – фрагмент профиля КП идеальной формы, б – фрагмент заданного профиля КП с местной ошибкой формы

Как видно из рисунка метод чувствителен к местным ошибкам формы КП.

Метод огибающей семейства парабол позволяет определять координаты КП в зонах с местной ошибкой формы. Оценка погрешности определения координат для разных зон КП будет представлена в следующем разделе.

2.4. Оценка погрешности алгоритма определения координат КП

Измерительной информацией при реализации разработанного метода являются координаты интерференционных максимумов или минимумов. Определение координат промежуточных (не минимальных и не максимальных) значений интенсивности не представляется возможным из-за высокой погрешности таких измерений. По этой причине в результате измерений получается дискретный набор данных. Это обуславливает погрешность вычисления координат точек КП. Кроме того, вблизи вершины КП ширина интерференционных полос выше, чем на краю, т.е. шаг дискретизации и как следствие погрешность вычислений координат КП у ее вершины выше.

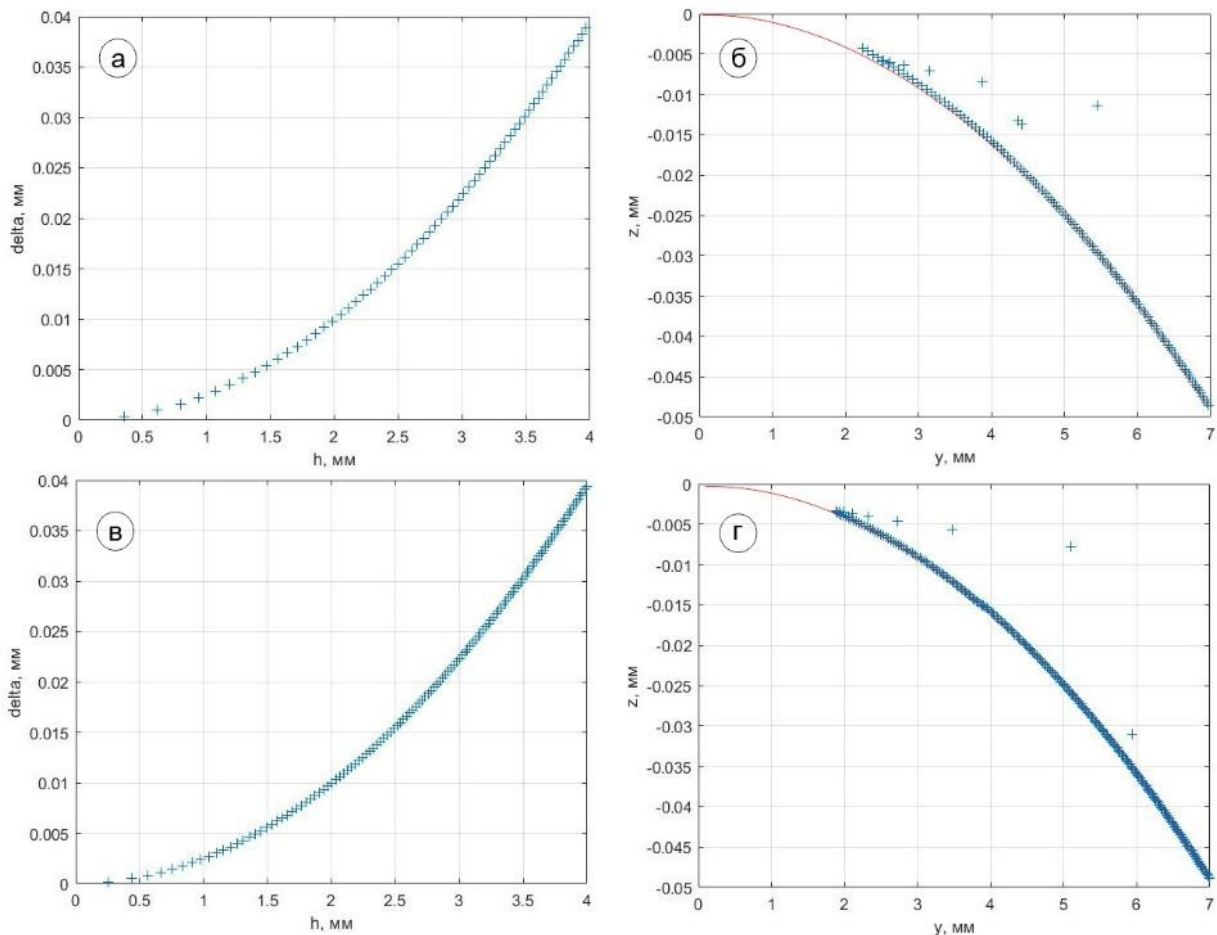


Рис. 2.12. Дискретные кривые $\Delta(h)$ – а, в; восстановленные профили КП – б, г

Это поясняется на рис. 2.12, на котором символом «+» показаны кривые $\Delta(h)$ (рис.2.12а, рис.2.12в), символом «+» - соответствующие найденный профили КП (рис.2.12б, рис.2.12г), сплошной линией – заданный профиль КП (рис.2.12б, рис.2.12г).

На рисунке показаны дискретные отсчеты на кривой $\Delta(h)$ (координаты максимумов интерферограммы) и восстановленные по этим дискретным отсчетам координаты КП. Рисунки (рис.2.12а, рис.2.12б) соответствуют длине волны 633 нм, а рисунки (рис.2.12в, рис.2.12г) соответствуют длине волны 300 нм. Видно, что уменьшение длины волны приводит к уменьшению шага дискретизации, и как следствие к уменьшению «слепой зоны» контроля – зоны, в которой точки определены с большой погрешностью (рис.2.12в, рис.2.12г). Для наглядности сплошной линией на рисунке также представлен заданный профиль КП.

Поскольку в интерферометрии чаще всего используется *He Ne* лазер, то дальнейший анализ выполнен для длины волны 633 нм.

Проанализируем, как влияют конструктивные параметры КП на погрешность определения координат на этой длине волны. Для анализа ограничим область значений геометрических параметров КП следующим образом. Диаметр КП $D \geq 100$ мм, радиус кривизны КП при вершине $R \geq 300$ мм, поскольку такие поверхности соответствуют крутизне $\varphi \leq 22,5^\circ$. Диаметр R выбран 100 мм, поскольку КП с меньшим диаметром удобно проконтролировать стандартными методами, например, при помощи пробных стекол.

На рис. 2.13 представлены графики погрешности вычисления координат КП в зависимости от величины D/R (от зоны КП). Анализировались поверхности второго порядка с разными радиусами кривизны R при вершине и коническими константами k . На рисунке синим цветом представлена группа поверхностей с радиусом кривизны при вершине $R=300$ мм (сферическая, гиперболическая, эллиптическая, параболическая), зеленым цветом представлена группа поверхностей с радиусом кривизны при вершине $R=500$ мм, красным цветом представлена группа поверхностей с радиусом кривизны при вершине $R=1000$ мм.

Оранжевым представлена сферическая поверхность с радиусом кривизны $R=10\,000$ мм.

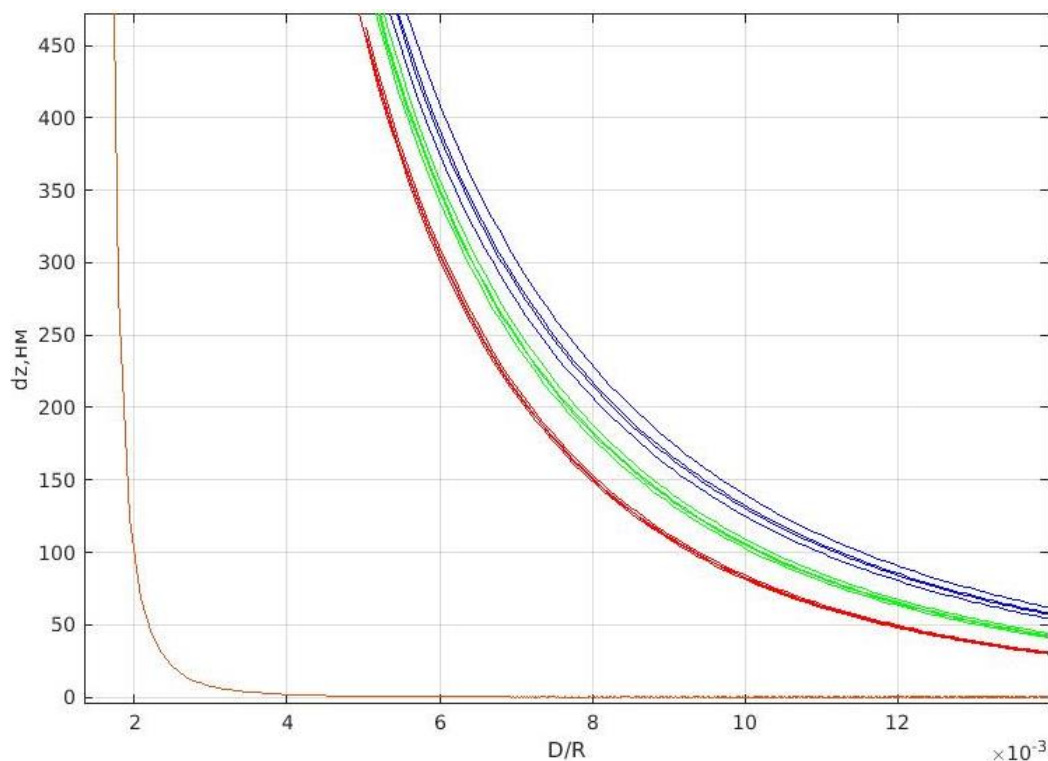


Рис. 2.13. График зависимости погрешности определения координат КП от величины D/R (от зоны КП)

По рис. 2.13 видно, что:

- 1) в разных зонах КП (при разных диаметрах D) разная погрешность определения координат из-за разной дискретности отсчетов (разной ширины полос интерферограммы);
- 2) для разных форм КП при одинаковых радиусах кривизны погрешность примерно одинаковая;
- 3) при увеличении радиуса кривизны R КП уменьшается величина D/R , определяющая «неконтролируемый» участок КП – участок, в пределах которого большая погрешность определения координат.

Примем здесь, что допустимая погрешность вычисления координат КП составляет 10 нм, т.к. при этом с учетом других факторов общая погрешность контроля не превосходит 60 нм. В табл. 10 приведены диаметры

«неконтролируемых» участков КП, т.е. участков, в которых погрешность вычисления координат больше 10 нм.

Таблица 10.

Параметры КП

R , мм	Диаметр «неконтролируемого» участка, мм	Параметр D/R , соответствующий границе «неконтролируемого» участка
300	7.8	0.025
500	11.0	0.022
800	16.0	0.020
1000	19.0	0.019
2500	38.0	0.015
5000	50.0	0.010
10000	95.0	0.009
50000	195.0	0.003
100000	285.0	0.002

Видно, что величина «неконтролируемой» области зависит от радиуса кривизны R при вершине КП. Причем, как следует из рис. 2.13, для поверхностей с одним радиусом кривизны R , но разными формами (с разными коническими константами k) эта величина примерно одинаковая.

Предельное значение параметра D/R , при котором можно проконтролировать поверхности радиусом $R > 300$ мм с погрешностью не более 10 нм на длине волны 633 нм, составляет 0,025. То есть для зон контролируемых поверхностей с диаметром D , большим $1/40$ радиуса R кривизны при вершине ($D/R > 1:40$) погрешность вычисления координат не более 10 нм.

2.5. Влияние пропуска интерференционной полосы на погрешность вычисления

В предыдущем разделе оценивалась точность алгоритма определения координат КП с учетом того, что все номера полос интерференционной картины определены верно. Это возможно, когда вся интерферограмма регистрируется одним ПИ. Если же размер интерферограммы больше длины матрицы ПИ, то ее можно, например, зарегистрировать по частям. Однако при этом есть риск неточной сшивки этих частей и как следствие неточного определения номеров интерференционных полос.

Рассмотрим влияние погрешности в определении интерференционной полосы на работу предложенного метода огибающей семейства парабол. Моделировалась интерференционная картина крупногабаритной сферической детали с конструктивными параметрами, представленными в табл. 11.

Таблица 11.

Параметры КП

Радиус кривизны КП, мм	400,055
Диаметр КП, мм	180
Форма КП	сферическая
Погрешность формы КП	без погрешности

Моделировалось распределение разности хода в зависимости координаты в плоскости анализа $\Delta(h)$ с учетом ошибки в определении номера интерференционной полосы. В данном примере намеренно была пропущена одна интерференционная полоса.

На рис. 2.14 представлен график зависимости разности хода от координаты в плоскости анализа $\Delta(h)$ с ошибкой символом «о», а также без ошибки – сплошной линией.

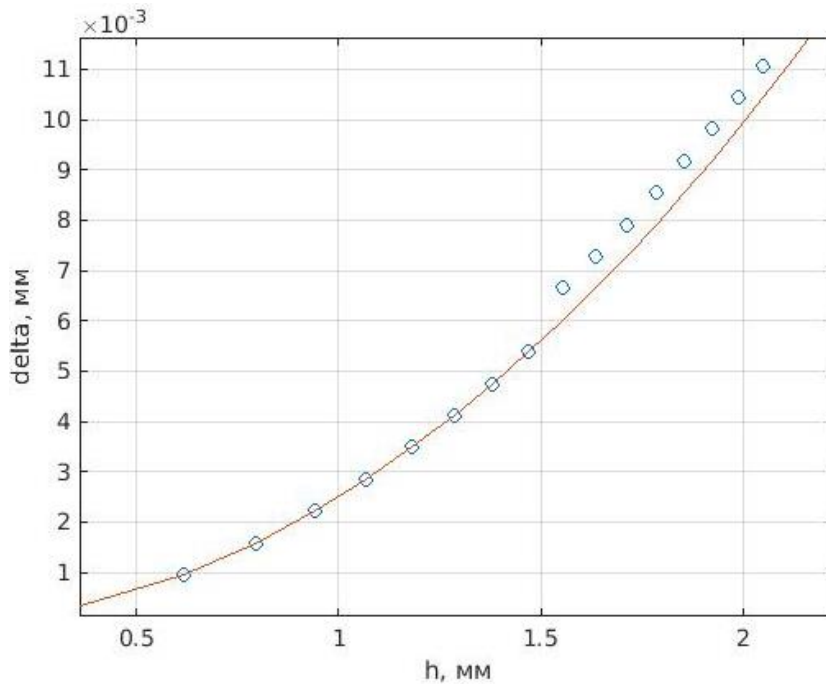


Рис. 2.14. График зависимости разности хода интерферирующих лучей от координаты в ПА; сплошной линией – зависимость разности хода от координаты в плоскости анализа $\Delta(h)$ без ошибки, символом «о» - зависимость разности хода от координаты в плоскости анализа $\Delta(h)$ с ошибкой (пропуском одной полосы)

По смоделированному распределению $\Delta(h)$ с помощью метода огибающей семейства парабол были определены координаты КП.

На рис. 2.15 представлены координаты КП без ошибки сплошной линией, а также координаты КП символом «о», которые были найдены по распределению $\Delta(h)$ с ошибкой в одну интерференционную полосу.

Пропуск одной интерференционной полосы в распределении $\Delta(h)$ приводит к ошибке определения координат КП приблизительно в 1 мкм.

Как видно из рис. 2.15, пропуск даже одной интерференционной полосы критичен для предложенного математического алгоритма. Поэтому данный алгоритм применим только для контроля КП интерференционная картина которых полностью уместается на приемник излучения.

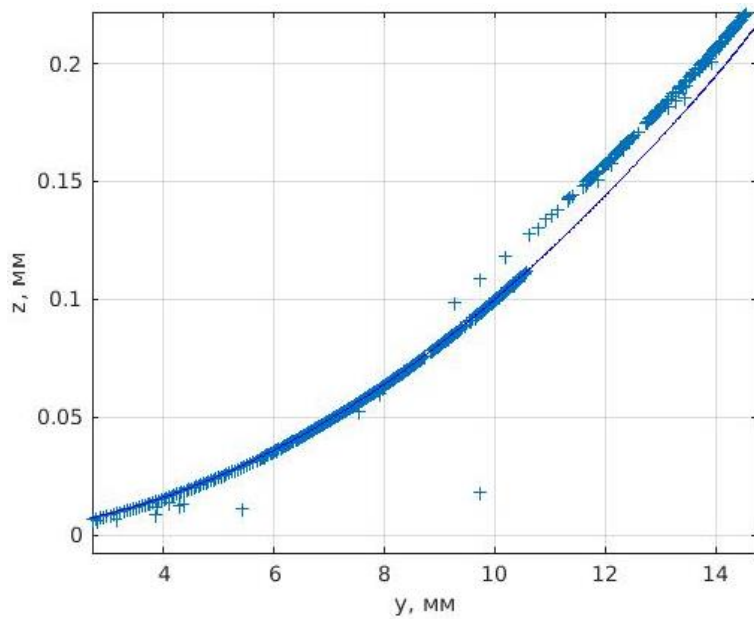


Рис. 2.15. Фрагмент профиля КП; сплошной линией - теоретический вид профиля исследуемой поверхности, символом «+» - профиль, построенный по зарегистрированным фрагментам интерферограммы

2.6. Выводы по главе 2

Метод математической обработки интерферограммы позволяет вычислять координаты точек на меридиональном профиле контролируемой поверхности без априорной информации о его геометрических параметрах. Метод математической обработки огибающей семейства парабол позволяет вычислять координаты профиля КП, как с погрешностью формы, так и без погрешности формы. При контроле на длине волны 633 нм точность вычисления координат не хуже 10 нм для зон контролируемой поверхности диаметром D большим, чем $1/40$ радиусов R кривизны при ее вершине.

Метод огибающей семейства парабол требует точного определения номеров всех интерференционных полос. При контроле крупногабаритных КП это возможно при использовании, например, составного приемника излучения, который будет регистрировать интерферограмму без ее сканирования.

ГЛАВА 3

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

3.1. Апробация метода математической обработки данных с использованием огибающей семейства парабол

Проведена экспериментальная апробация метода математической обработки интерферограммы с использованием огибающей семейства парабол (далее по тексту – метод огибающей семейства парабол), полученной в схеме ортогональных лучей. Апробация проводилась на эталонной плоской поверхности пластины, допуск плоскостности которой не более 9 нм, как указано в ее паспорте.

Схема эксперимента представлена на рис. 3.1. Плоский волновой фронт частично отражается от КП пластины I , а частично проходит над ней. Прямые и отраженные лучи интерферируют в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения лучей. Интерференционная картина представляет собой интерференционные полосы равной толщины. Видеокамера регистрирует интерференционную картину, возникающую в плоскости регистрации Oh .

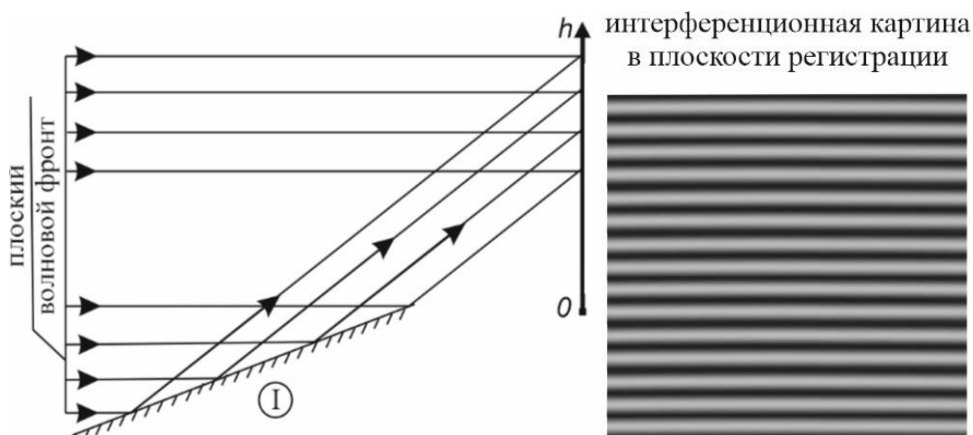


Рис. 3.1. Оптическая схема контроля сечения пластины

Интерферограммы регистрировалась при помощи видеокамеры *The Imaging Source DFK72BUC02*, параметры которой представлены в табл. 12.

Таблица 12.

Параметры видеокамеры

Размер фоточувствительной области, мм ²	3,7x4,3
Размер элемента (пикселя) матрицы, мкм	2,2

В результате эксперимента зарегистрирована интерферограмма, которая представлена на рис. 3.2а. Интерферограмма представляет собой полосы, эквидистантные профилю исследуемой поверхности. По этой интерферограмме при помощи метода огибающей семейства парабол вычислены точки, принадлежащие профилю [80] исследуемой поверхности (рис 3.2б). Вычисленное отступление от плоскостности исследуемого профиля составляет 60 нм. Таким образом, в реальном эксперименте дополнительная погрешность вносится за счет неточного определения координат центров максимумов интерферограммы.

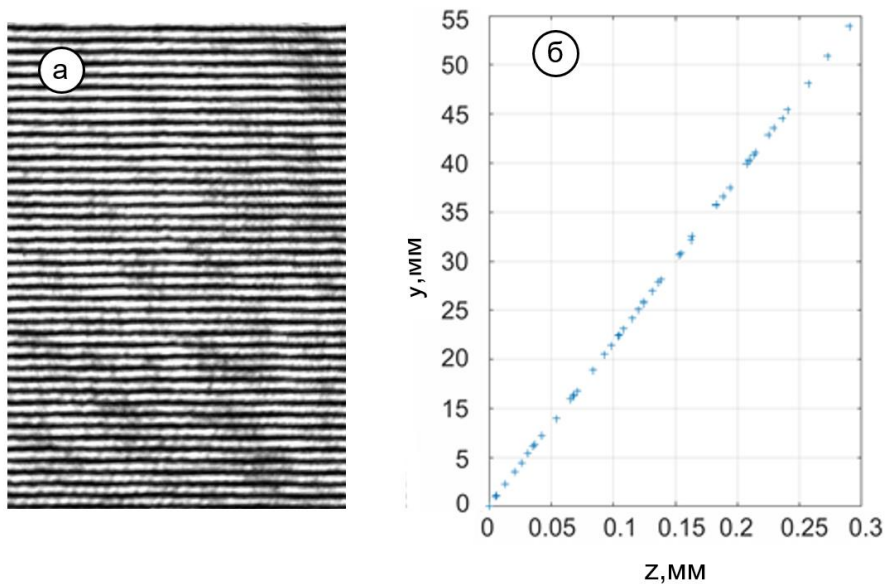


Рис. 3.2. Восстановленные координаты пластины [80]

Также апробация метода огибающей семейства парабол проводилась на выпуклой сферической поверхности линзы, параметры которой представлены в

табл. 13. О исследуемой КП известны только ее геометрические параметры, реальные отклонения формы не известны. Поэтому цель эксперимента - определить по интерферограмме геометрические параметры КП и сравнить их с известными.

Таблица 13.

Параметры КП

Радиус кривизны исследуемой поверхности, мм	725,0
Коническая константа	0,0
Форма исследуемой поверхности	Сферическая

Схема эксперимента представлена на рис. 3.3. Плоский волновой фронт частично отражается от КП линзы 1, а частично проходит над ней. Прямые и отраженные лучи интерферируют. Интерференционная картина *a*, наблюдаемая в плоскости 2, перпендикулярной направлению распространения лучей, представляет собой интерференционные полосы разной толщины. Видеокамера, параметры которой представлены в табл. 12, регистрирует интерференционную картину *a*, возникающую в плоскости регистрации 2.

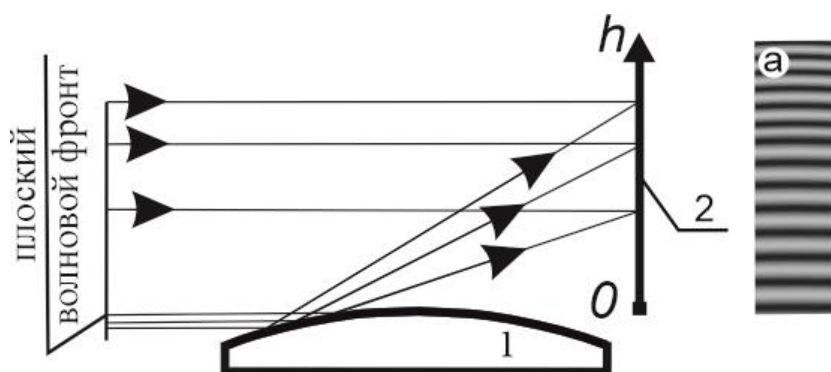


Рис. 3.3. Схема эксперимента

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.4.

В результате эксперимента зарегистрирована и обработана интерференционная картина, представленная на рис. 3.5.

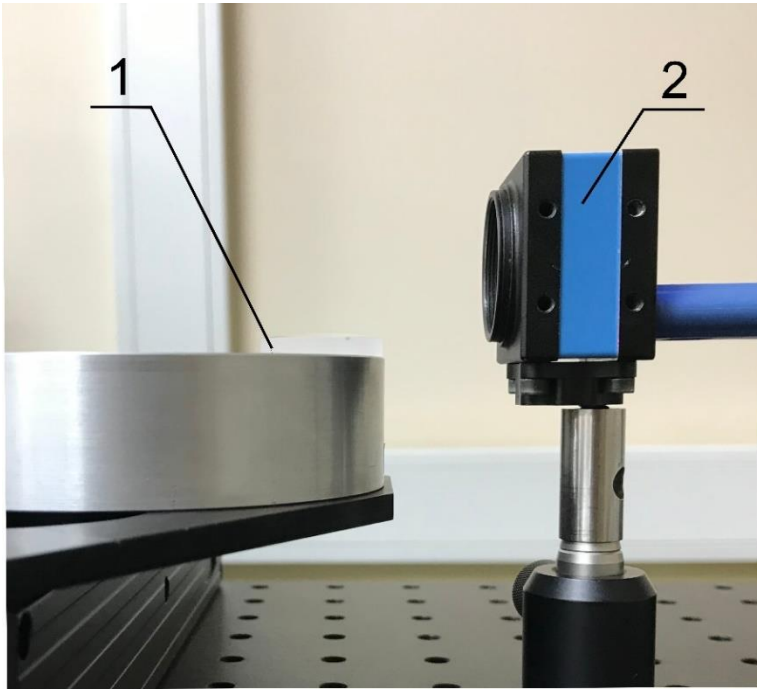


Рис. 3.4. Общий вид экспериментальной установки

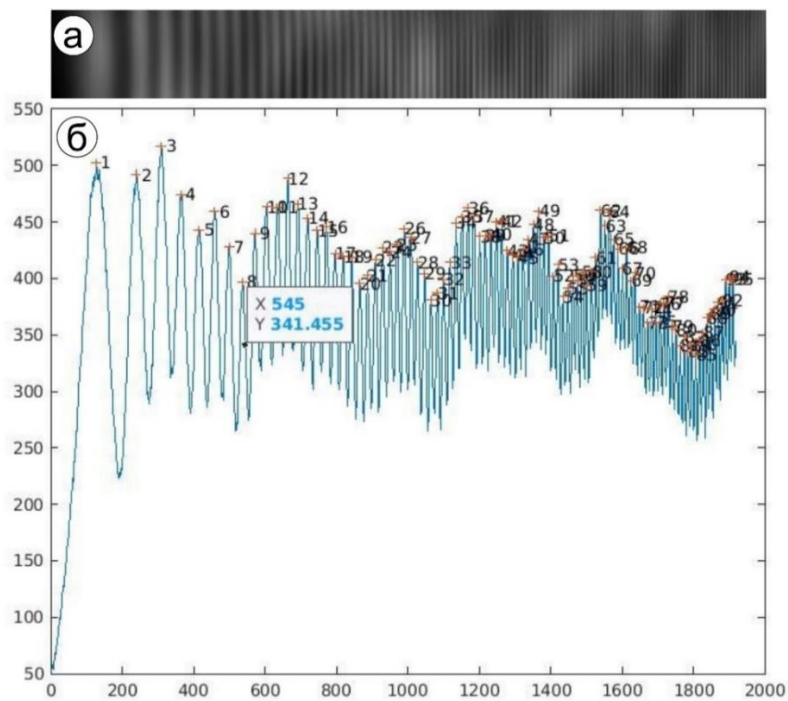


Рис. 3.5. Зарегистрированное изображение интерференционной картины (а), максимумы интерференционной картины (б)

По зарегистрированной и обработанной интерферограмме найдено распределение разности хода Δ в зависимости от высоты h в плоскости

регистрации. Экспериментально полученные вектора Δ и h являются параметрами семейства парабол, по которым вычислена их огибающая (рис. 3.6).

На рис. 3.6. символом «о» представлены вычисленные координаты огибающей семейства парабол. Сплошной линией представлена кривая, полученная аппроксимацией точек огибающей полиномом второго порядка с помощью метода наименьших квадратов. Радиус кривизны вычисленной аппроксимирующей кривой $R=724,95$, а коническая константа $k=-0,00166$. Вычисленные геометрические параметры кривой хорошо совпадают с параметрами, представленными в ее паспорте. При таких геометрических параметрах вычисленная форма КП отличается от реальной сферической (если считать, что у нее нет местных погрешностей) на 10 нм.

Текст программы для расчёта геометрических параметров кривой представлен в Приложении 6.

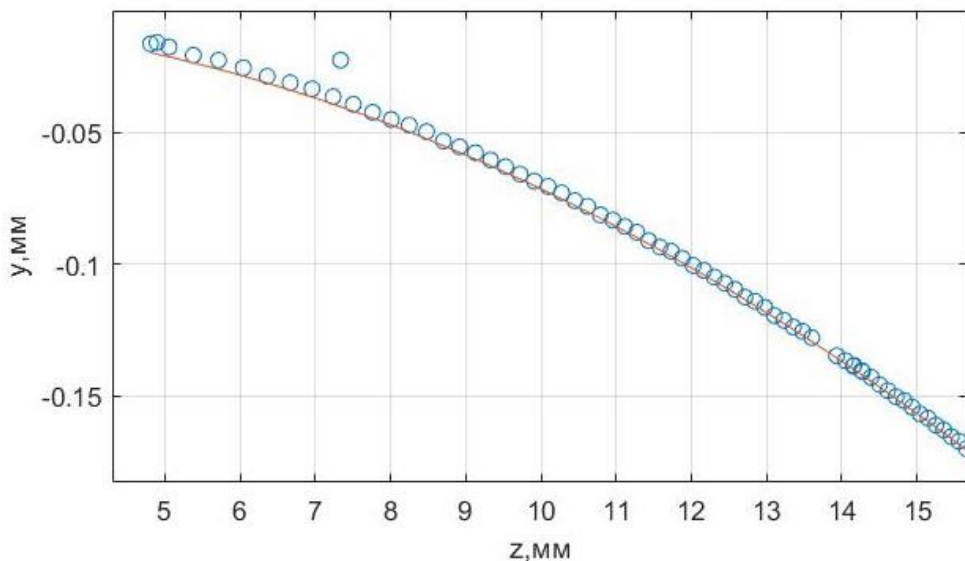


Рис. 3.6. Найденный профиль исследуемой выпуклой поверхности

Описанные эксперименты представлены для оптических деталей с такими параметрами, при которых интерференционная картина полностью уместается на ПЗС матрицу выбранной видеокамеры. Однако, практический интерес представляет метод контроля выпуклых оптических крупногабаритных деталей, длина анализируемой интерференционной картины которых существенно больше,

чем длина любой стандартной ПЗС матрицы. Для регистрации интерферограммы крупногабаритных деталей был разработан и сконструирован интерферометр, построенный по схеме ортогональных лучей, регистрирующий интерферограмму сканированием ее отдельных фрагментов.

3.2. Разработанный макет интерферометр

В НТЦ УП РАН в 2018 г. впервые на основе схемы ортогональных лучей создан макет интерферометра (далее по тексту – интерферометр) для контроля формы выпуклых сферических и асферических зеркал [81-87]. В настоящий момент интерферометр внедрен в состав государственного специального эталона единицы длины отклонений от плоскостности оптических поверхностей размером до 200 мм ГЭТ 183-2019 [88] для контроля формы выпуклых сферических и АП в институте метрологической службы ВНИИМС, что подтверждается актом внедрения (Приложение 7).

Оптическая схема макета интерферометра, реализующего предложенный интерференционный метод, представлена на рис. 3.7.

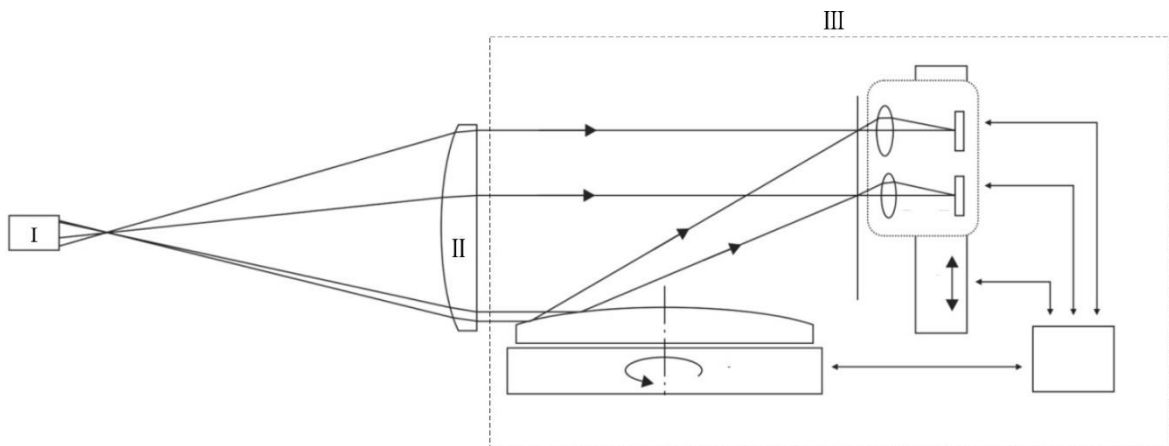


Рис. 3.7. Оптическая схема макета интерферометра

Макет состоит из блока осветителя *I*, блока расширителя пучка *II* и блока регистрации интерферограммы *III*. Общий вид макета интерферометра

представлен на рис. 3.8. Оптическая схема блока регистрации интерферограммы (рис. 3.7, III) представлена на рис. 3.9.

Блок осветителя (рис. 3.7, I) совместно с блоком расширителя пучка (рис. 3.7, II) формируют на выходе параллельный пучок лучей (рис. 3.7, I). Часть пучка лучей, отраженная от КП (рис. 3.9), и часть, проходящая над ней, интерферирует в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка.

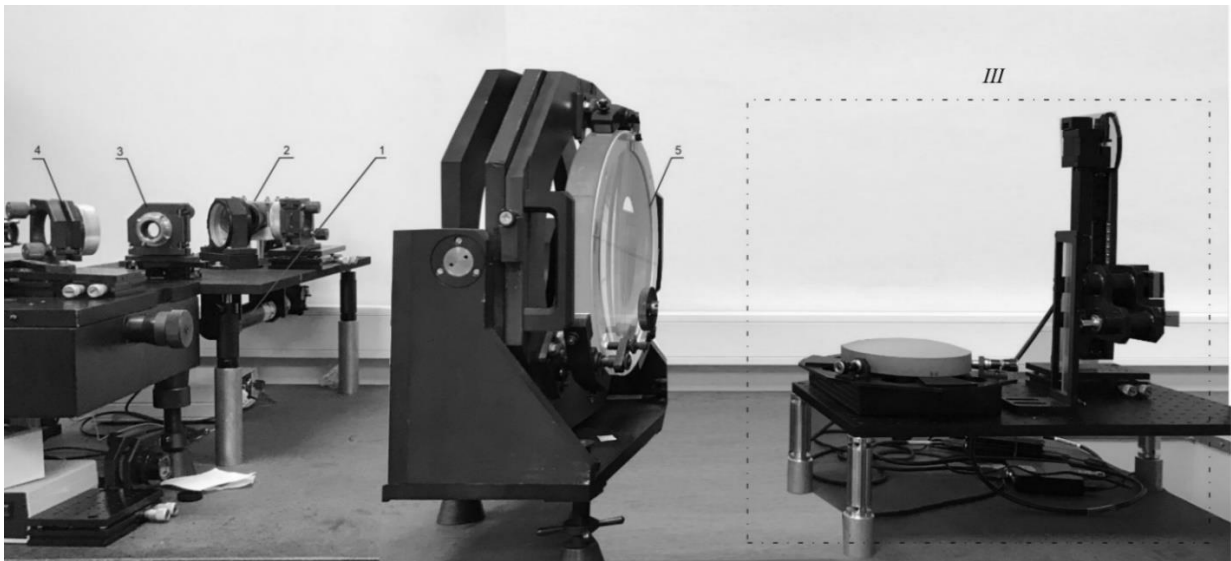


Рис. 3.8. Общий вид макета интерферометра; блок осветителя I (поз. 1-3), блок расширителя пучка II (поз. 4-5), блок регистрации интерферограммы III

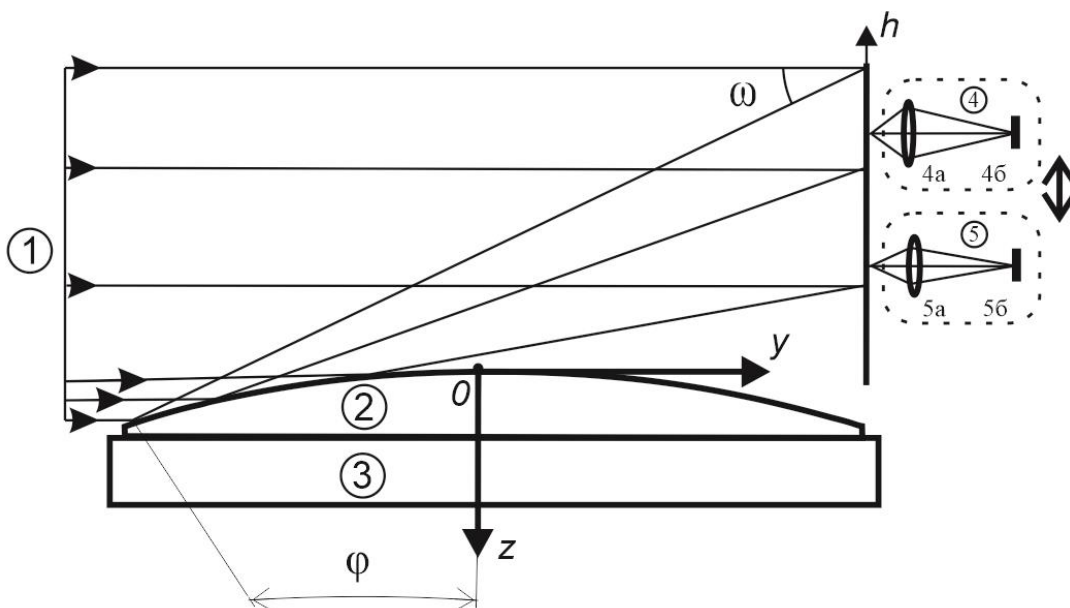


Рис. 3.9. Оптическая схема блока регистрации интерферограммы

На рис. 3.10 представлен пример зарегистрированных *а-б* и отфильтрованных *в-г* фрагментов интерференционной картины на разработанном макете интерферометра.

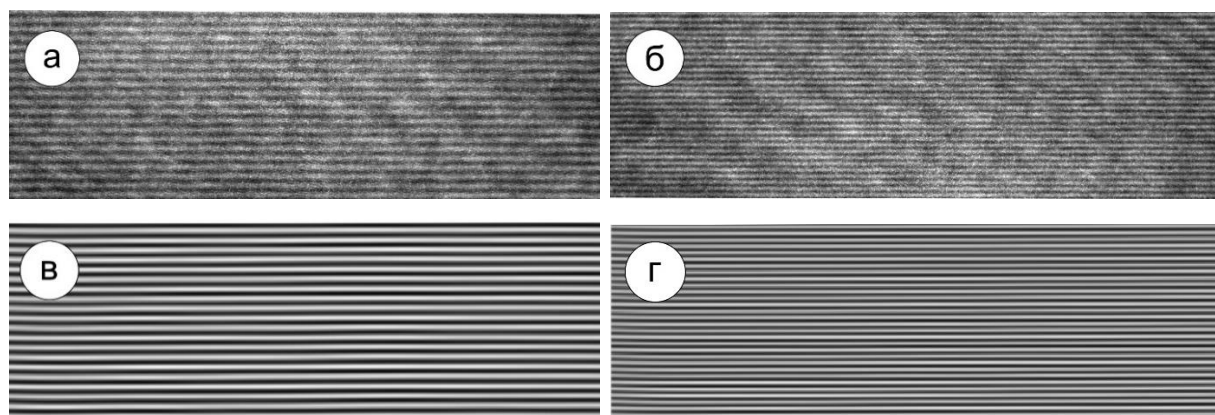


Рис. 3.10. а, б – зарегистрированные фрагменты интерференционной картины, в, г – отфильтрованные фрагменты интерференционной картины

3.3. Оценка диапазона параметров поверхностей, которые можно проконтролировать на интерферометре

Существует ограничение по параметрам поверхностей, которые можно измерить на разработанном интерферометре. Эти ограничения обусловлены, как разрешающей способностью микроскопов, так и размерами интерферометра.

Интерферометр создает параллельный пучок лучей, часть которого – предметный пучок – направляется в плоскость регистрации, отразившись от КП, а часть – опорный пучок – направляется в плоскость регистрации, минуя КП. В плоскости регистрации предметный и опорный пучки интерферируют. Интерферограмма образуется в предметной плоскости микрообъективов *4а*, *5а* (рис. 3.9). Изображения участков интерферограммы проецируются на МПИ *4б*, *5б*. Ширина полос интерферограммы в ПА на разных координатах h различна и зависит от угла ω между опорными и предметными пучками лучей. Поэтому схема содержит два микрообъектива с разными увеличениями. Параметры

микрообъективов приведены в табл. 14. Нумерация приведена в соответствии с рис.3.9.

Таблица 14.

Параметры микрообъективов

Поз.	Марка	Увеличение, крат	Апертура, A	Предел разрешения, δ мкм
4а	<i>Edmund Optics 40X DIN Semi-Plan</i>	40	0,65	0,5
5а	<i>Edmund Optics 10X DIN Semi-Plan</i>	10	0,25	1,2

Наиболее частые интерференционные полосы будут формироваться в верхней части интерферограммы, поэтому приемник 5б обладает наименьшим пределом разрешения. Параметры матричных приемников излучения (МПИ) представлены в табл. 15.

Таблица 15.

Параметры приемников излучения

Поз.	Марка	Размер сенсора, мм ²	Количество пикселей	Размер пиксела, мкм
4б	<i>The Imaging Source DFK AFU420-CCS</i>	8,8 x 6,6	7728 x 5368	1,12
5б	<i>The Imaging Source DMK 33UX250</i>	8,8 x 6,6	2448 x 2048	3,45

Наибольшие углы между опорными и предметными лучами будут соответствовать отражению опорного пучка от края зеркала, поэтому на краю интерференционной картины образуются самые частые интерференционные полосы. Крайним верхним выбран микрообъектив 4а с числовой апертурой $A=0,65$ и увеличением $\beta=40$ крат. Он обеспечивает разрешение в пространстве предметов, равное $\delta=\lambda/2A=0,5$ мкм. Т.е. этот микрообъектив позволяет строить изображения интерференционных полос шириной не менее $\delta=0,5$ мкм, при этом на МПИ

интерференционная картина будет формироваться с увеличением $\beta=40$ крат, т.е. расстояния между полосами, находящимися на пределе разрешения, будут составлять $\delta \cdot \beta=20$ мкм.

Тангенс угла наклона крайней нормали к КП φ не должен превосходить значения $A/2=0,32$. Длина МПИ составляет $t=8,8$ мм. Чтобы интерференционные полосы можно было детектировать, их должно быть не менее двух в поле зрения, т.е. максимальная ширина интерференционной полосы должна быть не более $t/2\beta=0,11$ мм. Эта ширина полосы соответствует лучам объектного пучка, отраженным от участка КП, нормаль к которому имеет угол наклона $\varphi=0,003$ рад.

Изображение интерференционных полос после данного объектива будет регистрировать видеокамера *The Imaging Source DFK AFU420-CCS* с размером пикселя 1,12 мкм и форматом 7728x5368. Размер изображения наименьшей интерференционной полосы, соответствующее краю зеркала, будет равен $b=\lambda \cdot \beta/\omega=40$ мкм. Значит, выбранная видеокамера позволит разрешить интерференционные полосы.

Таким образом, микрообъектив *4a* и камера *4б* могут быть использованы для регистрации интерференционной картины с шириной полос b от 0,5 мкм до 0,1 мм в пределах угла $\omega < 0,65$.

Второй объектив *5a* и камера *5б* могут использоваться для регистрации интерференционной картины с шириной полос b от 1,3 мкм до 0,4 мм в пределах угла $\omega < 0,25$.

Также ограничением в интерферометре является размер поворотного стола, диаметр которого 250 мм. Из представленных ниже требований можно вычислить предельные конструктивные параметры КП:

- угол наклона крайней нормали к КП не превосходит 0,32 рад;
- высота луча, отраженного от края КП, в плоскости регистрации интерферограммы не превосходит 300 мм.

Так, например, для КП 2-го порядка с диаметром 250 мм эти параметры приведены в табл.16. Диаметр 250 мм ограничивается размером используемого в установке поворотного стола.

Таблица 16.

Пределные параметры КП второго порядка

k , ед.	Наименование	D , мм	R_{\min} , мм
0...1	Эллипсоид	250	400...430
0	Сфера	250	450
-1...0	Эллипсоид	250	390...400
-1	Параболоид	250	390
-1...-2	Гиперболоид	250	370...390
-2...-4	Гиперболоид	250	320...370
-4...-8	Гиперболоид	250	200...320

Это значит, что сферические и АП второго порядка с приведенными выше параметрами могут быть измерены в разрабатываемом макете эталонной установки.

АП высших порядков также могут быть проконтролированы данным методом. Классифицировать их в виде аналогичной таблицы не представляется возможным в виду большого числа коэффициентов в их уравнении. Однако, как и для АП второго порядка, ограничивающими факторами являются:

- диаметр ($D \leq 250$ мм),
- угол наклона крайней нормали ($\varphi \leq 0,32$ рад),
- высота луча, отраженного от края КП, измеренная в плоскости регистрации интерферограммы ($h \leq 300$ мм).

3.4. Метод математической обработки данных для разработанной системы регистрации

Исследование метода огибающей парабол показало, что метод не позволяет определить координаты КП при регистрации сканированием ее фрагментов с последующей их сшивкой; при такой регистрации оказывается невозможным определить номер каждой интерференционной полосы безошибочно, что и является фактором, ограничивающим применение предложенного метода.

Таким образом, для реализации предложенного метода обработки огибающей семейства парабол необходимо использовать систему регистрации интерферограммы без сканирования, например составной ПИ.

Альтернативным решением этой проблемы является использование другого метода математической обработки интерферограммы, полученной в результате сшивки ее фрагментов.

В интерферометре был реализован альтернативный метод математической обработки интерферограммы, который позволяет определять погрешности формы исследуемой детали при сканирующей системе регистрации, поскольку ограничения в бюджете не позволили реализовать регистрацию интерферограммы составным ПИ.

В отличие от метода огибающей семейства парабол разработанный метод математической обработки применим для контроля исследуемых деталей, конструктивные параметры которых заранее известны.

В разработанном методе математической обработки интерферограммы зависимость ширины интерференционной полосы b от высоты центра максимума интерференционной полосы h интерферограммы содержит информацию о меридиональном профиле КП. Таким образом, процедура контроля сводится к измерению координат интерференционных максимумов, построением на основании измеренных данных зависимости $b(h)$ и сравнению этой зависимости с идеальной теоретической.

На рис. 3.11 представлен пример зарегистрированного фрагмента интерференционной картины (рис. 3.11а), отфильтрованное с помощью пространственного преобразования Фурье изображение этого же фрагмента (рис. 3.11б) и график распределения интенсивности в отфильтрованном изображении с наложенными на него координатами центров интерференционных максимумов в зависимости от координаты пикселя (рис. 3.11в).

На рис. 3.12, а сплошной линией представлен график зависимости $b(h)$, который получен по результатам обработки множества фрагментов интерференционной картины от выпуклого сферического зеркала.

Зависимость ширины интерференционной полосы от высоты центра максимума интерференционной полосы $b(h)$ содержит информацию о меридиональном профиле КП. Таким образом, процедура контроля сводится к измерению координат интерференционных максимумов, построением на основании измеренных данных зависимости $b(h)$ и сравнением ее с теоретической зависимостью.

Ширина интерференционной полосы b на произвольной высоте h определяется углом между интерферирующими пучками по формуле:

$$b = \frac{\lambda}{\sin 2\varphi}, \quad (3.1)$$

где φ – угол наклона нормали, восстановленной в точку падения луча. Погрешность формы КП приводит к погрешности угла наклона нормали $\Delta\varphi$, что вызывает отклонение ширины полосы b . Сравнивая теоретическое значение ширины полосы b_0 с измеренным b , можно получить $\Delta\varphi$, преобразовав и продифференцировав формулу:

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2b_0} \frac{b_0 - b}{\sqrt{b_0^2 - \lambda^2}}. \quad (3.1)$$

Отклонение реального профиля КП от теоретического, можно найти по формуле:

$$\Delta z(y) = \int_0^y \Delta\varphi(t) dt. \quad (3.1)$$

Использование поворотного стола, на который устанавливается контролируемая деталь, позволяет получить информацию о множестве профилей и построить топографическую карту отклонений, а также рассчитать максимальное и среднеквадратическое отклонение формы КП.

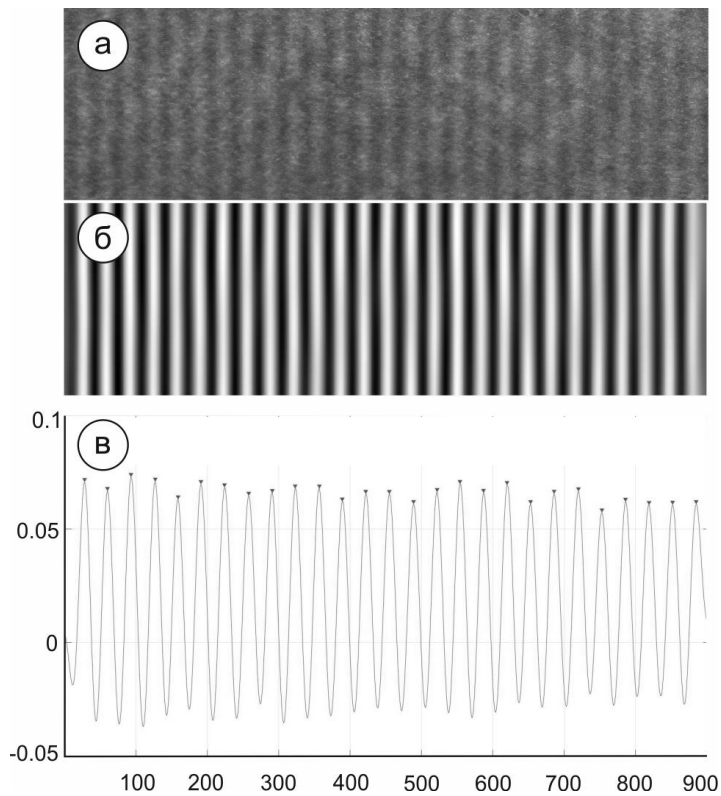


Рис. 3.11. Экспериментальные данные, полученные с помощью макета интерферометра

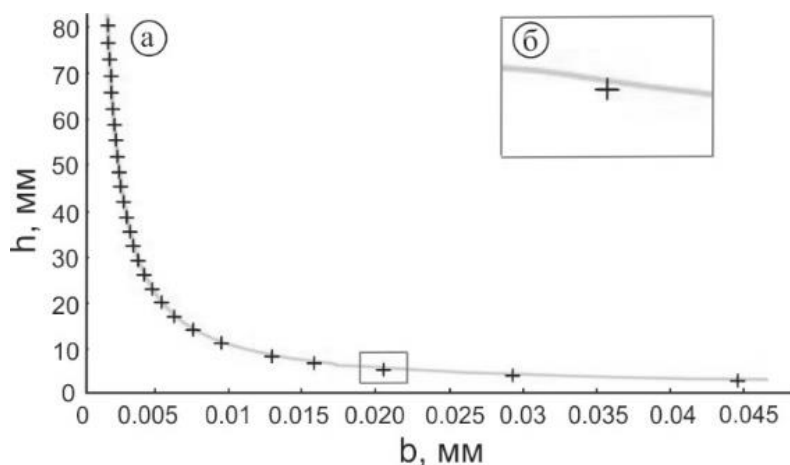


Рис. 3.12. График зависимости ширины интерференционной полосы от центра максимумов интерференционной полосы

Для наглядности на рис. 3.12 представлены некоторые точки теоретического графика зависимости $b(h)$, построенного по известным геометрическим параметрам зеркала. Несоответствие между теоретической и экспериментальной зависимостью, показанное на рис. 3.12, б, соответствует неточности формы зеркала величиной в одну длину волны.

3.5. Выводы по главе 3

Проведена апробация метода огибающей семейства парабол в схеме ортогональных лучей. Показано, что предложенный метод позволяет определять координаты выпуклых КП оптических деталей, интерферограмма от которых полностью уместается на приёмник излучения.

Представлена установка для контроля выпуклых сферических и АП на базе схемы ортогональных лучей. Разработана и сконструирована система регистрации интерферограммы для контроля выпуклых крупногабаритных АП, которая регистрирует фрагменты интерференционной картины с их последующей сшивкой.

ГЛАВА 4

ЮСТИРОВКА МАКЕТА ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ

В разработанном устройстве основными факторами, влияющими на точность контроля, являются:

- 1) погрешности, возникающие при цифровой обработке интерферограммы;
- 2) погрешности, обусловленные аппаратными средствами (нестабильность длины волны, aberrации оптической системы, погрешность определения координат линейного транслятора);
- 3) погрешности, обусловленные внешними факторами (вибрации, изменения температуры и давления и др);
- 4) погрешности, обусловленные неточностями юстировки интерферометра: неплоскостность волнового фронта, непараллельность оптической оси системы регистрации волновому фронту, несовпадение оси симметрии контролируемой детали с осью ее вращения.

Функционально макет состоит из стандартного интерферометра Физо и разработанного блока регистрации интерферограммы. Методика юстировки интерферометра известна и здесь не обсуждается. Будем считать, что погрешность юстировки такова, что формируемый интерферометром волновой фронт имеет остаточную aberrацию примерно в 1 длину волны. Эксперимент подтвердил это.

Глава посвящена юстировке разработанного макета интерферометра для контроля выпуклых асферических и сферических зеркал. Разработанная методика юстировки минимизирует вклад непараллельности оси системы регистрации волновому фронту, а также несовпадение оси симметрии контролируемой детали с осью ее вращения.

В главе рассмотрены основные ее этапы.

4.1. Блок регистрации интерферограммы

Общий вид блока регистрации представлен на рис. 4.1. Блок состоит из следующих составных частей: узел сканирования интерферограммы, узел штриховой меры, прецизионный поворотный стол, плита оптическая, опоры цилиндрические - виброгасящие стержни.

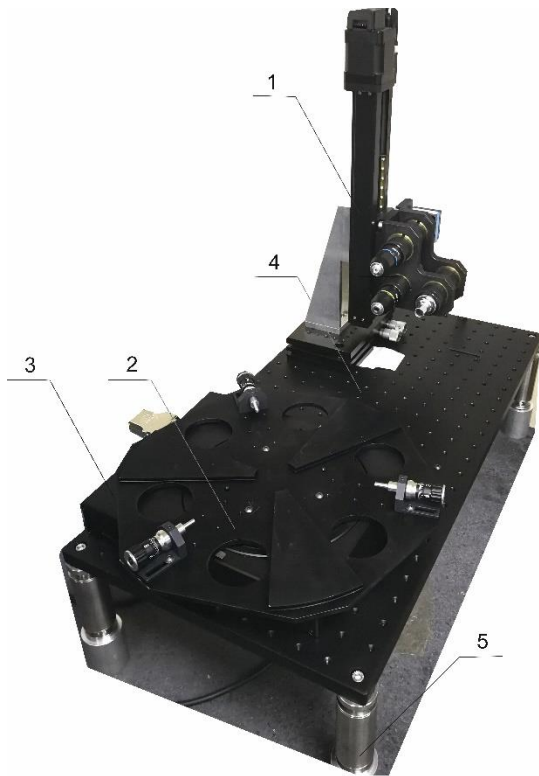


Рис. 4.1. Общий вид блока регистрации интерферограммы и его основные элементы и узлы. 1 - узел сканирования интерферограммы; 2 – плита поворотного стола; 3 - прецизионный поворотный стол; 4 - плита оптическая; 5 - опоры цилиндрические

4.2. Юстировка блока поворотного стола и системы регистрации

Юстировка блока поворотного стола и системы регистрации заключается в юстировке отдельных ее частей до получения параллельности оптической оси

юстируемого блока с оптической осью блока расширителя лазерного пучка. Ее предлагается выполнять в следующей последовательности.

Установить плоскость поворотного стола параллельно лучам установки меридиональным наклоном оптического стола.

Для этого необходимо установить эталонную пластину на поворотный стол (рис. 4, 3). При помощи вращения цилиндрических опор (рис. 4.2, 5) добиться параллельности плоскости поворотного стола лучам интерференционной установки; критерием этого является вертикальная ориентация полос интерференционной картины.

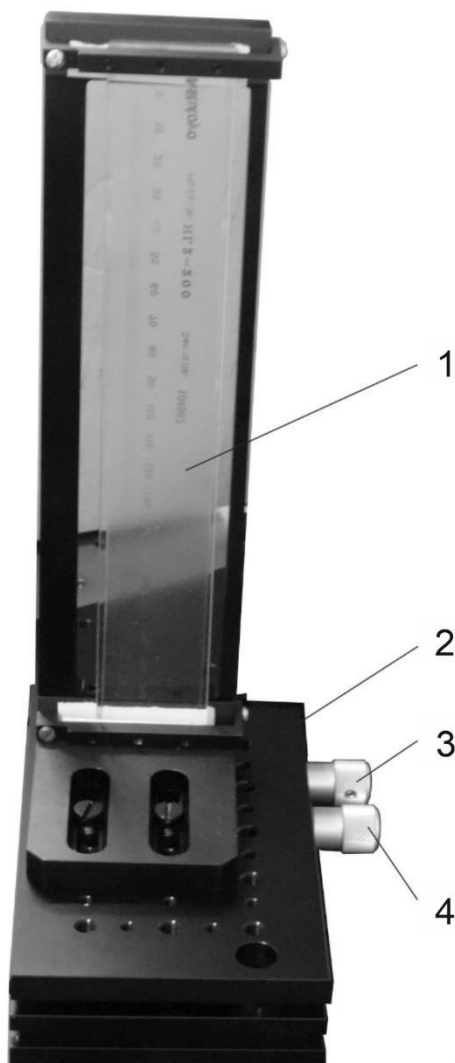


Рис. 4.2. Узел штриховой меры, общий вид и ее основные элементы и узлы. 1 – штриховая мера длины (в металлической оправе), 2 – платформа наклонная, 3 – рукоятка регулировки наклона, 4 – рукоятка регулировки поворота

Установить штриховую меру (рис. 4.3, 1) на наклонной платформе (рис. 4.3, 2) перпендикулярно пучку интерферометра. Наклон и поворот меры осуществлять с помощью рукояток (рис. 4.3, 3-4). Контроль перпендикулярности осуществлять, наблюдая автоколлимационное изображение полевой диафрагмы, сформированное пучком, отраженным от плоской рабочей поверхности меры.

Установить узел сканирования интерферограммы так, чтобы направление перемещения микрообъективов (рис. 4.3, 1, 3) было параллельно штриховой мере. Наклон и поворот узла осуществлять с помощью рукояток (рис. 4.3, 9-10). Параллельность направления перемещения будет обеспечена в том случае, когда изображение штрихов меры (рис. 4.2, 1), наблюдаемое через микрообъективы (рис. 4.3, 1,3), будет одинаково резким для двух крайних положений микрообъектива.

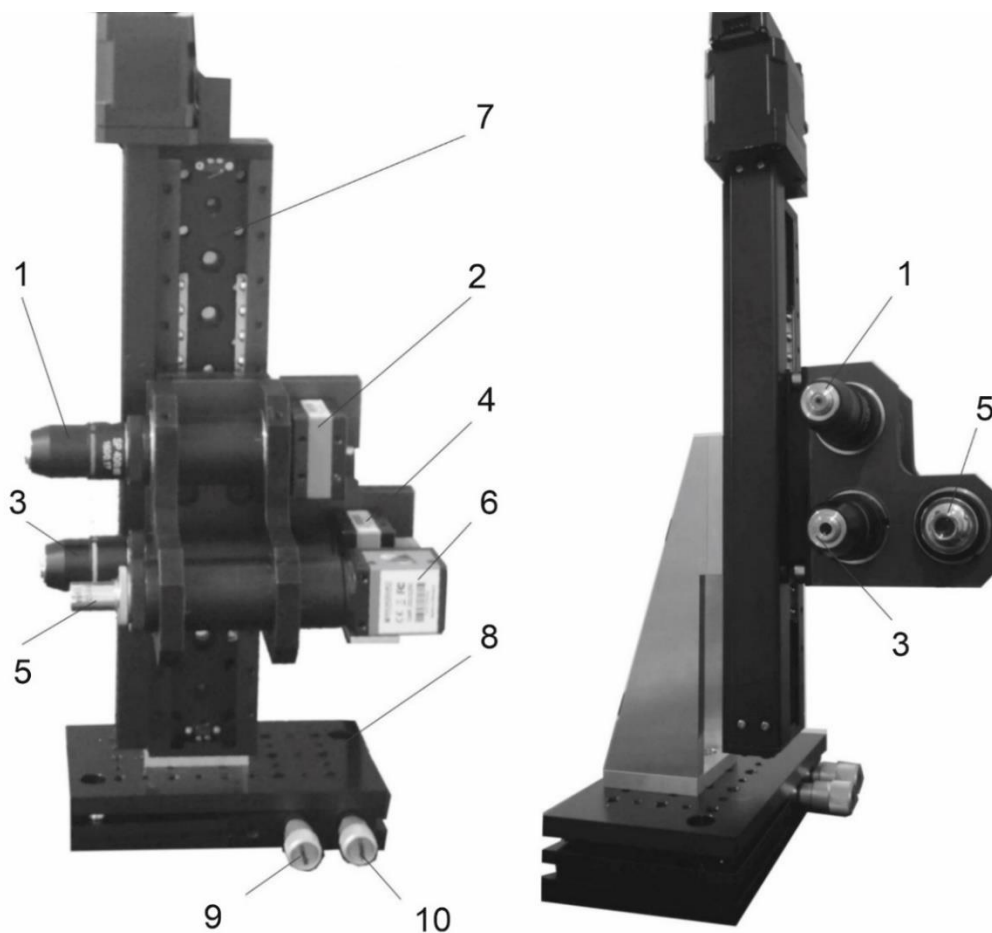


Рис. 4.3. Узел сканирования интерферограммы, общий вид и его основные элементы и узлы. 1, 3, 5 – микро-объективы, 2,4,6 – МПИ, 7 – линейный транслятор, 8 – платформа наклонная, 9 – рукоятка регулировки наклона, 10 – рукоятка регулировки поворота

Добиться расположения оси вращения поворотного стола (рис. 4.4, 3) и оптических осей микрообъективов (рис.4.4, 5-6) в одной плоскости, параллельной направлению распространения излучения. Для этого выполнить следующие действия.

Установить столик (рис. 4.4, 1) на плиту поворотного стола (рис.4.4, 3). Установить микрометрический винт со сферическим наконечником (рис. 4.4, 2) на столик. При помощи микровинтов (рис. 4.4, 4) установить центр наконечника микрометрического винта на оси вращения поворотного стола. Критерием совмещения является визуальное отсутствие движения тени от микрометрического винта при вращении поворотного стола.

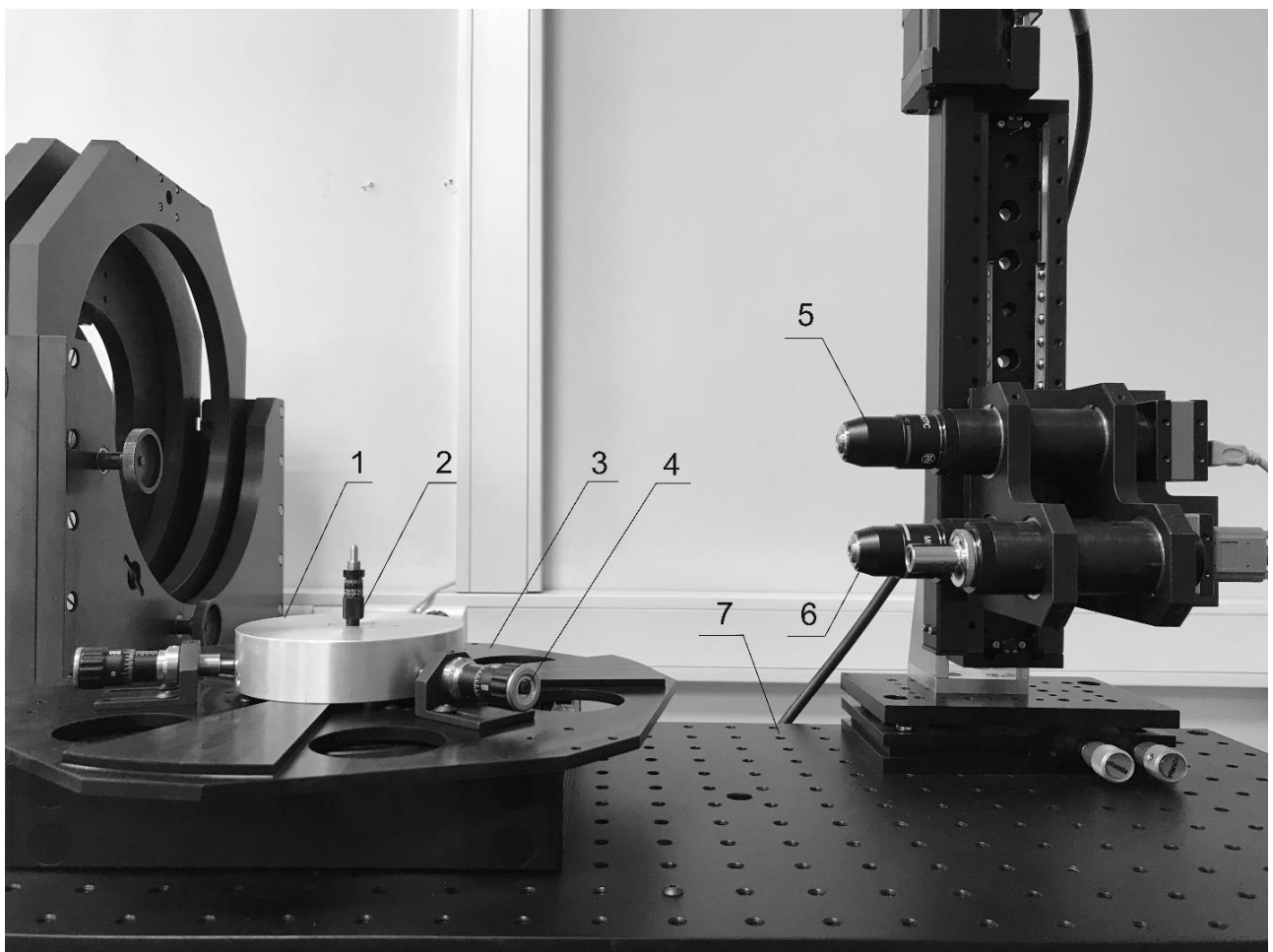


Рис. 4.4. Юстировка блока поворотного стола и системы регистрации, основные элементы и узлы. 1 – столик, 2 – микрометрический винт со сферическим наконечником, 3 – плита поворотного стола, 4 – микровинты, 5,6 – микрообъективы, 7 – плита оптическая

Совместить визуально тень от стержня с передней оптической поверхностью микрообъектива, вращая оптическую плиту (рис. 4.4, 7) в сагиттальной плоскости.

Дальнейшие наблюдения производить на мониторе блока управления и обработки данных с помощью ПО для регистрации интерферограммы.

При помощи вращения микровинтов (рис. 4.4, 4) добиться такого расположения сферического наконечника микрометрического винта (рис. 4.4, 2) при котором при вращении поворотного стола (рис. 4.4, 3) интерферограмма неподвижна.

4.3. Юстировка КП

Установить КП (рис. 4.5, 2) на плиту поворотного стола (рис. 4.5, 3).

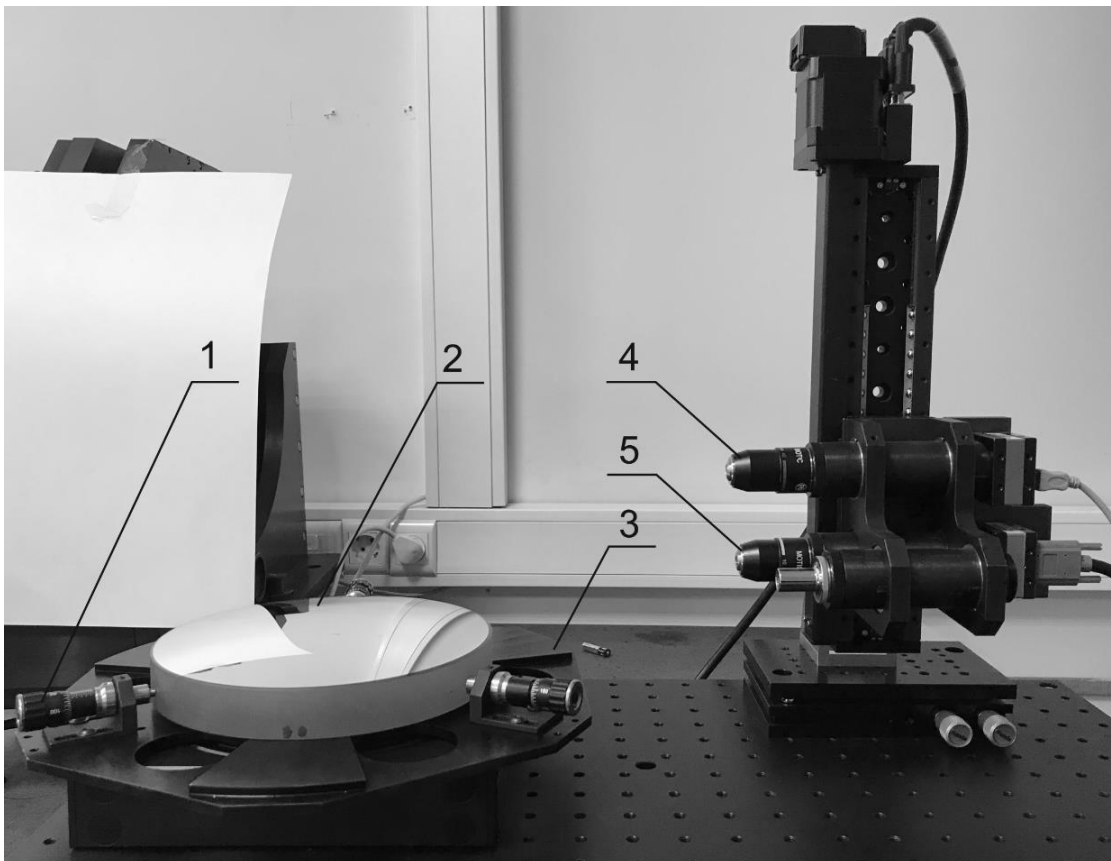


Рис. 4.5. Юстировка КП, основные элементы и узлы. 1 – микровинты, 2 – КП, 3 – плита поворотного стола, 4-5 – микро-объективы

Смещая КП при помощи микровинтов (рис. 4.5, 1) добиться совмещения оси вращения КП с осью вращения поворотного стола. Критерием соосности служит неподвижность интерференционной картины от КП в поле зрения микроскопических объективов (рис. 4.5, 4-5).

4.4. Оценка влияния погрешности установки КП в макете интерферометра на точность измерения

Результатом измерений на интерферометре является топографическая карта отклонений формы КП от идеальной теоретической. Топографическая карта получается из измерений нескольких профилей КП и их сшивки.

При сшивке отдельных профилей КП в топографическую карту отклонений могут возникнуть погрешности, вызванные несовпадением оси вращения стола с осью симметрии КП. Ниже представлен анализ влияния этой погрешности на результаты контроля.

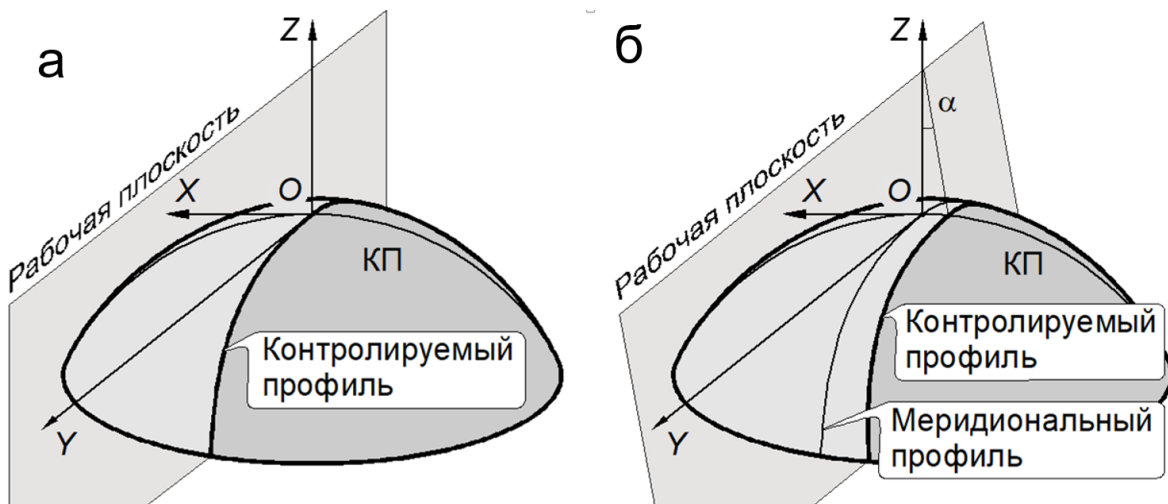


Рис. 4.6. Несовпадение оси вращения стола с осью симметрии КП

Плоскость, содержащую контролируемый профиль, будем называть рабочей плоскостью. Запишем уравнение контролируемого зеркала в виде:

$$x^2 + y^2 = 2rz - (k+1)z^2 + P(z), \quad (4.1)$$

где r – вершинный радиус кривизны, k – коническая константа, полином

$$P(z) = \sum_{i=3}^N \beta_i z^i.$$

В случае если ось симметрии зеркала лежит в рабочей плоскости, контролируемый профиль совпадает с меридиональным профилем зеркала (рис. 4.6, а) и описывается уравнением:

$$y^2 = 2rz - (k + 1)z^2 + P(z). \quad (4.2)$$

При вращении интерферометра вокруг контролируемого зеркала ось симметрии последнего (оси OZ) может не лежать в рабочей плоскости (рис. 4.6, б). В этом случае, уравнение рабочей плоскости в системе координат $OXYZ$ имеет вид:

$$x = a \cdot z + b, \quad (4.3)$$

где константа a определяется углом наклона α рабочей плоскости к оси OZ и равна $a = \operatorname{tg} \alpha$, а величина b равна смещению вершины контролируемого профиля от вершины зеркала (точки O).

Уравнение контролируемого профиля в этом случае имеет вид:

$$y^2 - b^2 = 2(r - ab)z - (k + a^2 + 1)z^2 + P(z), \quad (4.3)$$

Это уравнение отличается от уравнения меридионального профиля. Однако, отличие невелико. Максимальное значение этого отличия возникает на краю КП и также вносит вклад в погрешность определения координаты КП δ . Величина δ для различных параметров КП представлена в табл. 17.

Анализ выполнен при допустимых значениях децентрировки КП $a = 2'$ и $b = 1,0$ мм (такие значения вполне достижимы).

Основной вклад в погрешность контроля, вызванную неточностью юстировки, вносит несовпадение оси симметрии зеркала и оси вращения стола. Как показано в табл. 17, вклад их в погрешность контроля не более 23 нм для поверхностей с приведенными параметрами.

Результаты расчёта подтверждает экспериментальное исследование. Исследовалась эталонное выпуклое сферическое зеркало диаметром 180 мм и

радиусом кривизны 400.055 мм с известными значениями параметров отклонения формы $PV \sim 60$ нм, $RMS \sim 15$ нм (табл. 18).

Таблица 17.

Вклад неточности юстировки в погрешность контроля

Коническая константа k , ед.	Наименование КП	Диаметр КП D , мм	Минимальный радиус кривизны при вершине R_{min} , мм	Погрешность контроля δ , нм
0...1	Эллипсоид	250	430...450	23,0
0	Сфера	280	430	21,8
-1...0	Эллипсоид	250	410...430	20,5
-1	Параболоид	250	410	20,4
-1...-2	Гиперболоид	250	390...410	18,3
-2...-4	Гиперболоид	250	350...390	17,8
-4...-8	Гиперболоид	250	250...350	17,3

Таблица 18.

Параметры эталонного зеркала

Коническая константа k , ед.	Радиус кривизны, R , мм	Диаметр КП D , мм	Предельное отклонение формы PV , нм	Среднеквадратичское отклонение формы RMS , нм
0	400.055	180	60	15

Форма профилей зеркала также исследовалась на полу-контактном профилометре (рис. 4.7). По оси абсцисс отложена погрешность формы в длинах волн. Длина волны контроля 633 нм.

В результате контроля эталонного зеркала на разработанном интерферометре, получена топографическая карта отклонения формы, представленная на рис. 4.8.

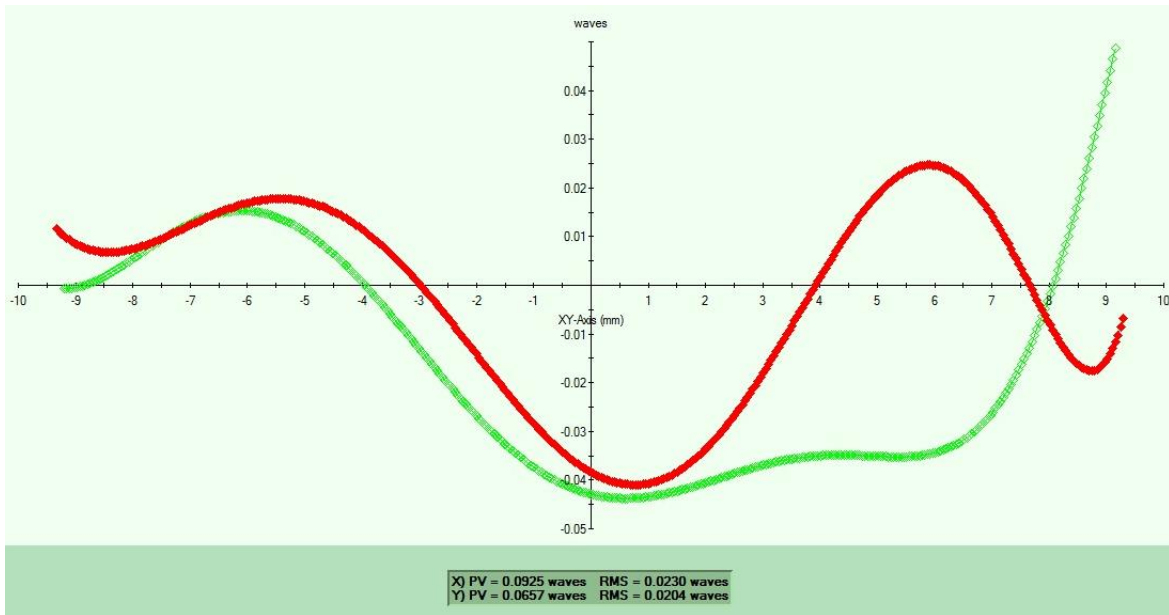


Рис. 4.7. Профили эталонного сферического выпуклого зеркала, измеренного на профилометре

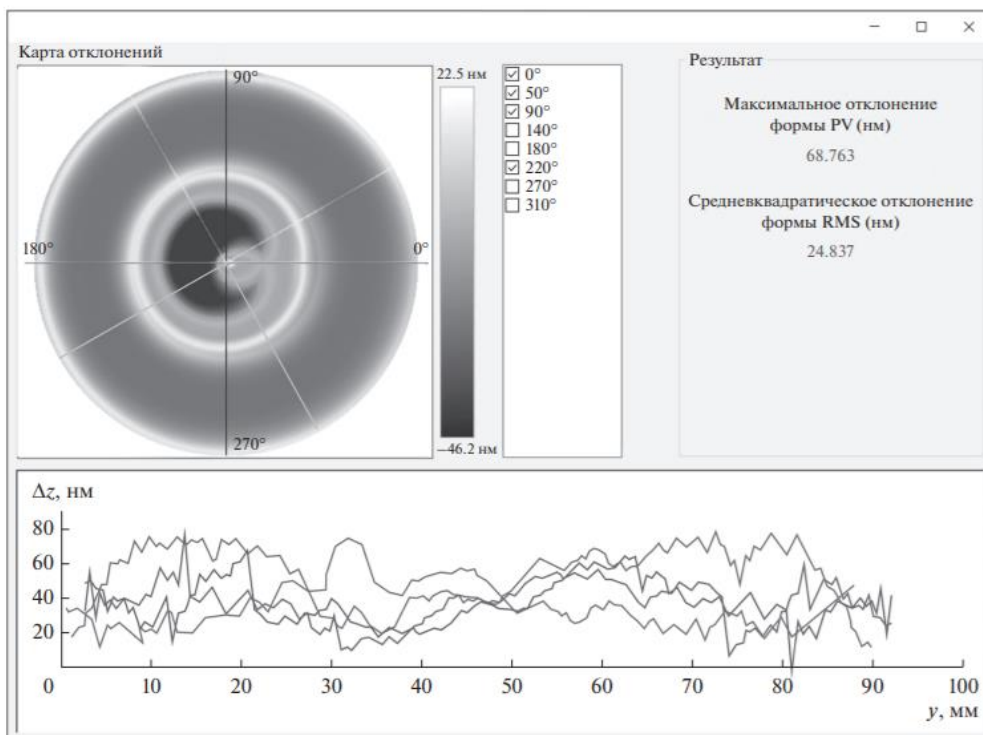


Рис. 4.8. Топография исследуемого эталонного зеркала, полученная с помощью разработанного интерферометра

Видно, что параметры отклонения формы исследуемой поверхности, измеренные разработанным методом и представленные в паспорте эталонного

зеркала хорошо совпадают. Это позволяет сделать вывод, что погрешность контроля в данном эксперименте не превышает заявленной в паспорте погрешности формы эталонного зеркала (60 нм).

Таким образом, разработанная методика юстировки обеспечивает погрешность контроля 60 нм, что подтверждается экспериментом, а также актом внедрения прибора, который представлен в Приложении 7.

4.5. Выводы по главе 4

Представлена пошаговая юстировка разработанного интерферометра.

Показано, что представленная методика юстировки для разработанного интерферометра, построенного по схеме ортогональных лучей, обеспечивает возможность контроля формы выпуклых зеркал с погрешностью не более 60 нм на этом интерферометре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Главе 1 проанализированы существующие методы контроля выпуклых асферических зеркал и выявлены следующие основные проблемы контроля:

1) для контроля выпуклых крупногабаритных АП существующими методами необходимо изготавливать вспомогательные крупногабаритные прецизионные оптические детали, диаметром большим, чем КП. При этом, изготовленные вспомогательные оптические детали подходят для контроля выпуклых АП конкретной формы и, как правило, используются один раз

2) существующие методы контроля являются не универсальными, т.е. для контроля асферических выпуклых деталей с различными формами требуется частичное изменение оптической системы прибора контроля.

Проанализированы разрабатываемые методы контроля, такие как дефлектометрия, а также методы на основе ортогональных лучей. Показано, что описанные методы контроля не пригодны для контроля крупногабаритных астрономических зеркал.

Анализ разрабатываемых схем контроля демонстрирует, что схема освещения ортогональных лучей является перспективной для разработки нового интерференционного метода контроля, универсального для контроля формы выпуклых крупногабаритных АП различной формы, работающего без использования оптических деталей диаметра большего, чем диаметр КП.

В Главе 2 предложен метод математической обработки интерферограммы в схеме ортогональных лучей. Данный метод позволяет вычислять координаты точек на меридиональном профиле контролируемой поверхности без априорной информации о его геометрических параметрах. Метод огибающей семейства парабол позволяет вычислять координаты профиля КП, как с погрешностью формы, так и без погрешности формы.

Проводится анализ точности предложенного метода огибающей семейства парабол. При контроле на длине волны 633 нм точность вычисления координат не

хуже 10 нм для зон контролируемой поверхности диаметром большим, чем 3 радиуса кривизны при ее вершине. В главе показано, что предложенный метод критичен к пропуску интерференционной полосы.

В Главе 3 описана апробация метода огибающей семейства парабол в схеме ортогональных лучей. Показано, что предложенный метод позволяет определять координаты выпуклых КП оптических деталей, интерферограмма от которых полностью уместается на приёмник излучения.

Представлен интерферометр для контроля выпуклых сферических и асферических поверхностей на базе схемы ортогональных лучей. Разработана и сконструирована система регистрации интерферограммы для контроля выпуклых крупногабаритных АП, которая регистрирует фрагменты интерференционной картины с их последующей сшивкой. Для разработанной системы регистрации интерферограммы предложен альтернативный метод математической обработки интерферограммы.

В Главе 4 описана методика юстировки, проводимая перед началом контроля формы КП на разработанном интерферометре, позволяющая минимизировать влияние погрешностей взаимного расположения его элементов. Разработана методика юстировки, минимизирующая вклад непараллельности оси системы регистрации волновому фронту, а также несовпадение оси симметрии контролируемой детали с осью ее вращения. Приведена оценка влияния погрешности установки КП в интерферометр на точность контроля.

Экспериментально показано, что разработанная методика обеспечивает погрешность контроля не более 60 нм.

Цель, сформулированная в начале диссертации, по мнению автора достигнута.

В настоящее время мы разрабатываем метод контроля формы вогнутых зеркал на разработанном интерферометре, построенном по схеме ортогональных лучей. Предложенный метод описан в нашей статье [89].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

$s := 200$ расстояние от вершины КП до ПА

$k := 0$ коническая константа

$r_0 := 500$ радиус кривизны КП при вершине

уравнение КП без погрешности:

$$y(z) := \sqrt{2 \cdot r_0 \cdot z - z^2}$$

разность хода интерферирующих лучей:

$$\Delta(z) := \left[\frac{(|y(z)| + s)}{\cos \left[2 \operatorname{atan} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot r_0 \cdot z - z^2}}{(2 \cdot r_0 - 2z)} \right] \right]} \right] - (|y(z)| + s)$$

+

высота интерферирующих лучей в ПА:

$$h(z) := \tan \left[2 \operatorname{atan} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot r_0 \cdot z - z^2}}{(2 \cdot r_0 - 2z)} \right] \right] \cdot (|y(z)| + s) - z$$

параметры касательных парабол:

$$p(z) := 2 \Delta(z)$$

двойная разность хода

$$h(z) := \tan \left[2 \operatorname{atan} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot r_0 \cdot z - z^2}}{(2 \cdot r_0 - 2z)} \right] \right] \cdot (|y(z)| + s) - z$$

высота интерферирующих лучей

Уравнения нескольких касательных парабол

$$y1(z1) := \frac{1}{p(2)} \cdot (-z1 + -h(2))^2 + -\left(200 + \frac{p(2)}{4}\right)$$

проверка, касается ли парабола КП:

точка параболы:

точка КП:

$$\overline{y1(2) = 44.677} \quad ; ;$$

$$\overline{y(2) = 44.677} \quad ; ;$$

$$y0(z1) := \frac{1}{p(3)} \cdot (-z1 + -h(3))^2 + -\left(200 + \frac{p(3)}{4}\right)$$

$$\overline{y0(3) = 54.69} \quad ; ;$$

$$\overline{y(3) = 54.69} \quad ; ;$$

$$y01(z1) := \frac{1}{p(5)} \cdot (-z1 + -h(5))^2 + -\left(200 + \frac{p(5)}{4}\right)$$

$$\overline{y01(5) = 70.534} \quad ; ;$$

$$\overline{y(5) = 70.534} \quad ; ;$$

$$y011(z1) := \frac{1}{p(10)} \cdot (-z1 + -h(10))^2 + -\left(200 + \frac{p(10)}{4}\right)$$

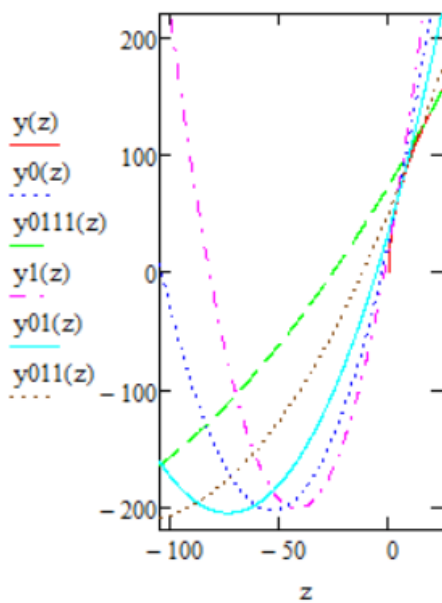
$$\overline{y011(10) = 99.499} \quad ; ;$$

$$\overline{y(10) = 99.499} \quad ; ;$$

$$y0111(z1) := \frac{1}{p(20)} \cdot (-z1 + -h(20))^2 + -\left(200 + \frac{p(20)}{4}\right)$$

$$y0111(20) = 140$$

$$y(20) = 140$$



$$y1(2) - y(2) = -3.766 \times 10^{-13}$$

$$\overline{y0(3) - y(3) = -7.816 \times 10^{-14}} \quad ; ;$$

$$\overline{y01(5) - y(5) = -3.837 \times 10^{-13}} \quad ; ;$$

$$\overline{y011(10) - y(10) = -2.7 \times 10^{-13}} \quad ; ;$$

$$y0111(20) - y(20) = 0$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

$s := 200$ расстояние от вершины КП до ПА

$k := 0$ коническая константа

$r0 := 500$ радиус кривизны КП при вершине

уравнение КП без погрешности:

$$y_i(z) := \sqrt{2 \cdot r0 \cdot z - z^2}$$

погрешность КП:

$$\Delta y(z) := A \cdot e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2}}$$

$A := 0.1$ амплитуда погрешности

$z_0 := 2$ координата погрешности

КП с погрешностью:

$$y(z) := y_i(z) + \Delta y(z)$$

разность хода интерферирующих лучей:

$$\Delta(z) := \left[\frac{(|y(z)| + s)}{\cos \left[2 \operatorname{atan} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot r0 \cdot z - z^2}}{(2 \cdot r0 - 2z)} \right] \right]} \right] - (|y(z)| + s)$$

высота интерферирующих лучей в ПА:

$$h(z) := \tan \left[2 \operatorname{atan} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot r0 \cdot z - z^2}}{(2 \cdot r0 - 2z)} \right] \right] \cdot (|y(z)| + s) + -z$$

параметры касательных парабол:

$$p(z) := 2 \Delta(z)$$

двойная разность хода

$$\Delta h(z) := \tan \left[2 \operatorname{atan} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot r0 \cdot z - z^2}}{(2 \cdot r0 - 2z)} \right] \right] \cdot (|y(z)| + s) + -z$$

высота интерферирующих лучей

Уравнения нескольких касательных парабол

$$y1(z1) := \frac{1}{p(2)} \cdot (-z1 + -h(2))^2 + -\left(200 + \frac{p(2)}{4}\right)$$

$$y0(z1) := \frac{1}{p(3)} \cdot (-z1 + -h(3))^2 + -\left(200 + \frac{p(3)}{4}\right)$$

$$y01(z1) := \frac{1}{p(1)} \cdot (-z1 + -h(1))^2 + -\left(200 + \frac{p(1)}{4}\right)$$

$$y011(z1) := \frac{1}{p(10)} \cdot (-z1 + -h(10))^2 + -\left(200 + \frac{p(10)}{4}\right)$$

$$y0111(z1) := \frac{1}{p(20)} \cdot (-z1 + -h(20))^2 + -\left(200 + \frac{p(20)}{4}\right)$$

проверка, касается ли парабола КП:

точка параболы: точка КП:

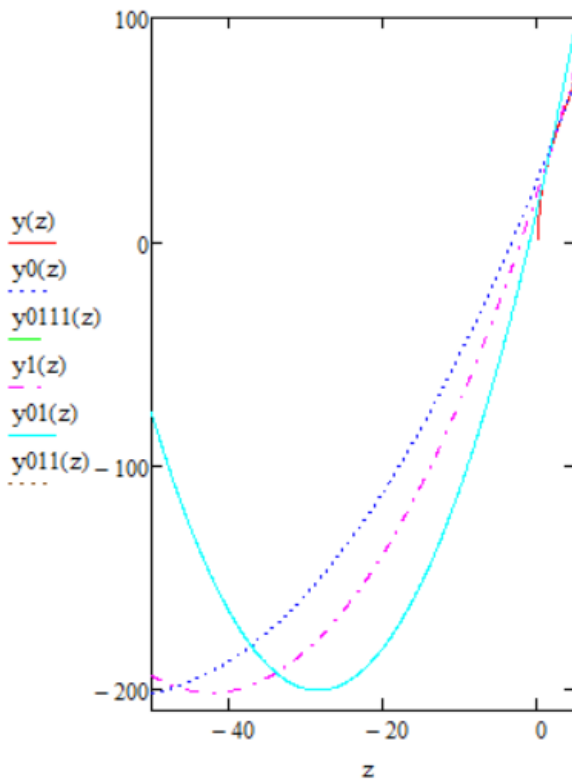
$$y1(2) = 44.777 \quad y(2) = 44.777$$

$$y0(3) = 54.855 \quad y(3) = 54.855$$

$$y01(1) = 31.772 \quad y(1) = 31.772$$

$$y011(10) = 7.896 \times 10 \quad y(10) = 7.896 \times 10^{12}$$

$$y0111(20) = 2.268 \times 10^4 \quad y(20) = 2.268 \times 10^{69}$$



$$y1(2) - y(2) = 8.1 \times 10^{-13}$$

$$y0(3) - y(3) = -2.913 \times 10^{-13}$$

$$y01(1) - y(1) = 1.35 \times 10^{-12}$$

$$y011(10) - y(10) = -8.789 \times 10^{-3}$$

$$y0111(20) - y(20) = 3.831 \times 10^{53}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

```

r0=500; %радиус кривизны КП
k=0; %коническая константа КП
s=200; %расстояние от вершины КП до ПА
lambda=0.6328*10^(-3); %длина волны

y=sqrt(2*r0*z-(k+1)*z*z); %уравнение КП без погрешности

tanphi=(diff(y,z))^-1; %тангенс φ

phi=atan(tanphi); %угол φ

h=(abs(y)+s)*tan(2*(phi))-z; %высота h на ПА

delta=(abs(y)+s)/cos(2*phi)-(y+s); %разность хода между интерф. лучами

yy=subs(y,z,zz);

n=100;

for i=0:n
    delta2=[delta2,(lambda/2)*(2*i+1)]; %расчет разности хода в максимумах интерферограммы
end

f=(abs(y)+s)/cos(2*phi)-(abs(y)+s)-delta2;

z0=0.1;

%расчет координат КП, которые соответствуют максимумам интерферограммы, а
%также соответствующие им h:
for i=1:n
    tic
    z0=vpa(z0+0.1);
    eps=lambda/100;
    df=diff(f(i),z);
    f2=(abs(subs(f(i),z,z0)));

    while f2>eps
        z1=z0-((subs(f(i),z,z0)/(subs(df,z,z0))));
        z0=z1;
        f2=(abs(subs(f(i),z,z0)));
    end
    z00=[z00,eval(z0)]; %координата z КП соответствующие максимумам интерферограммы
    f02=[f02,vpa(f2)]; %координата y КП соответствующая максимумам интерферограммы
    h2=[h2,eval(subs(h,z,z0))]; %координаты максимумов интерферограммы в ПА

    toc
end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

```

s=sym('200');%расстояние от вершины КП до ПА
imdir='M/PULS/19.01.21/';
h=load([imdir 'h.txt'],'h2','-ascii');
lambda=0.6328*10^(-3); % длина волны излучения
delta=[];
for i=0:length(h)
delta=[delta,(lambda/2)*(2*i+1)] % разность хода интерферирующих лучей
end;
delta=double(delta);
delta1=delta;
p=2*delta1; % параметр семейства парабол
% вычисление координат КП с помощью огибающей семейства парабол
for i=2:(length(h)-1)
dp=((p(i+1)-p(i-1))/(h(i+1)-h(i-1)));
f=((1/p(i))*(z+h(i)).^2)-(s+p(i)./4)-y;
df=(2/p(i)).*(z+h(i))+((z+h(i)).^2)*(-1/(p(i)^2)).*dp-dp./4;
y=((1/p(i))*(z+h(i)).^2)-(s+p(i)./4);
a=-dp/(p(i)^2);
b=((2/p(i))-(2*h(i).*dp./(p(i).^2)));
c=((2*h(i))/p(i))-(((h(i)^2).*dp)/(p(i)^2))-(dp./4);
D=(b^2)-4*a*c;
z2=(-b-sqrt(D))/(2*a); %вычисление координаты z КП
y2=eval(subs(y,z,z2)); %вычисление координаты y КП
y02=[y02,y2];%запись координаты y в массив
z02=[z02,z2];%запись координаты z в массив
end

```


ПРИЛОЖЕНИЕ 5

```

r0=500; %радиус кривизны КП
k=0; %коническая константа КП
s=200; %расстояние от вершины КП до ПА
lambda=0.6328*10^(-3); %длина волны

y=sqrt(2*r0*z-(k+1)*z*z); %уравнение КП без погрешности
dy=0.05*exp((-z-0.2)^2)/0.001); %местная ошибка формы КП
y=y+dy; %приавляем к идеальной КП местную ошибку формы
tanphi=(diff(y,z))^-1; %тангенс φ

phi=atan(tanphi); %угол φ

h=(abs(y)+s)*tan(2*(phi))-z; %высота h на ПА

delta=(abs(y)+s)/cos(2*phi)-(y+s); %разность хода между интерф. лучами

yy=subs(y,z,zz);

n=100;
for i=0:n
    delta2=[delta2,(lambda/2)*(2*i+1)]; %расчет разности хода в максимумах интерферограммы
end

f=(abs(y)+s)/cos(2*phi)-(abs(y)+s)-delta2;

z0=0.1;
% вычисление координат КП с помощью огибающей семейства парабол
for i=2:(length(h)-1)
    dp=((p(i+1)-p(i-1))/(h(i+1)-h(i-1)));

    f=((1/p(i))*(z+h(i)).^2)-(s+p(i)./4)-y;

    |
    df=(2/p(i)).*(z+h(i))+((z+h(i)).^2)*(-1/(p(i)^2)).*dp-dp./4;

    y=((1/p(i))*(z+h(i)).^2)-(s+p(i)./4);

    a=-dp/(p(i)^2);
    b=((2/p(i))-(2*h(i).*dp./(p(i).^2)));
    c=((2*h(i))/p(i))-(((h(i)^2).*dp)/(p(i)^2))-(dp./4);

    D=(b^2)-4*a*c;

    z2=(-b-sqrt(D))/(2*a); %вычисление координаты z КП
    y2=eval(subs(y,z,z2)); %вычисление координаты y КП

    y02=[y02,y2];%запись координаты y в массив
    z02=[z02,z2];%запись координаты z в массив
end

```


ПРИЛОЖЕНИЕ 6

```

%Аппроксимация полиномом 2ого порядка

N1 = 2;
Cf = polyfit(Y, X, N1);

Ymin = min(Y);
Ymax = max(Y);
Y2 = Ymin : (Ymax-Ymin)/500 : Ymax;
X2 = 0;
for i = 0:N1
    X2 = X2 + Cf(N1-i+1).*Y2.^i;
end

%Расчет точки перегиба

dX2dY2 = 0;
for i = 0:N1-1
    dX2dY2 = dX2dY2 + Cf(N1-i)*(i+1)*Y2.^i;
end

figure
plot(Y2,X2, Y, X)

%координата вершины КП

Y0 = -Cf(2)/Cf(1)/2;
X0 = 0;
for i = 0:N1
    X0 = X0 + Cf(N1-i+1).*Y0.^i;
end

N2 = 2;
Cf2 = polyfit(z, y.*y, N2);

px = 2.2*10^-3; % pixel size, mm
r0 = Cf2(2)/2*px; %вычисление радиуса кривизны КП
k = -Cf2(1)-1; % вычисление константы
r0pix=r0/px;

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 7



Федеральное государственное
бюджетное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологической службы»

119361, г. Москва, ул. Озерная, 46

Тел.: (495) 437 55 77
E-mail: Office@vniims.ru

Факс: (495) 437 56 66
www.vniims.ru



«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель директора
по производственной метрологии
ФГБУ «ВНИИМС», к.т.н.
А.Е. Коломин

« » _____ 2022 г.

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы Гавлиной А.Е. на тему:
«Интерференционный метод для контроля формы выпуклых оптических
поверхностей большого диаметра, основанный на схеме
ортогональных лучей»

Результаты научных исследований, полученных в диссертации Гавлиной А.Е. и опубликованные в статье Гавлиной А.Е., Батшева В.И., Новикова Д.А., Баландина И. А. «Интерферометр для контроля формы выпуклых зеркал оптических и радиотелескопов, построенный по схеме ортогональных лучей» (Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 44-50), подтверждены, использованы и внедрены в процессе контроля асферических поверхностей оптических деталей.

Зам. нач. отдела 203

Е.А. Милованова

ЛИТЕРАТУРА

1. Abdulkadyrov, M. A. Interference test procedures for telescopic mirrors / M. A. Abdulkadyrov, S. P. Belousov, A. N. Ignatov // Proc. SPIE. – 2004. – V. 5252. – P. 374-381.
2. Burge, J. H. Measurement of large convex aspheres / J. H. Burge // Proc. SPIE. – 1996. – V. 2871. – P. 362-373.
3. Заказнов, Н. П. Изготовление асферической оптики / Н. П. Заказнов, В. В. Горелик. – М. : Машиностроение, 1978. – 248 с.
4. Sander, G. M. Optical Fabrication Techniques for MMT / G. M. Sander, R. R. Shannon // Sky and telescope. – 1973. – V. 46, №5. – P. 280-284.
5. Burge, J. H. TMT Metrology study for M2 and M3 / J. H. Burge, C. Zhao // Thirty Meter Telescope Supplier Conference. – 2007. – V. 025, REL02. – P.1-27.
6. Spyromilio, J. Extremely Large Telescopes / J. Spyromilio // PoS MRU. – 2007. – P. 14.
7. Spyromilio, J. The European Extremely Large Telescope: the Arne way / J. Spyromilio // Proc. SPIE. – 2008. – V. 6986. – P. 698605.
8. Gilmozzi, R. The European ELT: status, science, size / R. Gilmozzi // Proc. SPIE. – 2008. – V. 6986. – P. 698604.
9. Johns, M. The Giant Magellan Telescope / M. Johns // Proc. SPIE. – 2008. – V. 6986. – 12 p.
10. Кардашев Н.С. Проект Миллиметрон / Н. С. Кардашев [и др.] // Тр. Физич. ин-та им. П.Н. Лебедева. – 2000. – Т. 228. – С. 112.
11. Астрокосмический центр. Проект «Миллиметрон» // <http://asc-lebedev.ru>: сервер Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева. URL: <http://asc-lebedev.ru/?dep=20> (дата обращения 19.12.2021).
12. Пуряев, Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей / Д. Т. Пуряев. – М. : Машиностроение, 1976. – 262 с.

13. Коломийцов, Ю. В. Интерферометры / Коломийцов, Ю. В. – Л. : Машиностроение, 1976. – 296 с.
14. Tolstoba, N. D. Analysis of Hartmann testing techniques for large-sized optics / N. D. Tolstoba // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4451. – P. 406-413.
15. Горшков, В. А. Автоматизированные методы контроля оптических поверхностей / В. А. Горшков, В. И. Новикас, А. В. Подобрый // Оптико-механическая-промышленность. – 1980. – №2. – С. 37-44.
16. Максutow, Д. Д. Новая методика исследования формы зеркал крупных телескопов / Д. Д. Максutow // Изв. Главной астроном. абсерватории. – 1957. – Т.21, вып.1, №160. – С. 5-29.
17. Бубис, И. Я. Исследование точных астрономических поверхностей с помощью эталонов существенно меньшего диаметра / И. Я. Бубис, В. И. Робачевская, В. А. Савин // Новая техника в астрономии ; под ред. Н. Н. Михельсона. – Л. : Наука, 1970. – Вып. 3. – С. 219-224.
18. Абдулкадыров, М. А. Метод определения профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал / М. А. Абдулкадыров, В. Е. Патрикеев, А. П. Семенов // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81, № 12. – С. 16-21.
19. Malacara, D. Testing of aspherical surfaces with Newton Fringes / D. Malacara, A. Cornejo // Applied Optics. – 1970. – Vol. 9, №4. – P.837-839.
20. Коломийцова, Т. С. Установка для контроля выпуклых поверхностей крупногабаритных оптических деталей / Т. С. Коломийцова // Методы аттестационного контроля оптических деталей и систем астроприборов: Информационные материалы II всесоюзного семинара, 10 мая 1977. – М., 1977. – С.17.
21. Захарьевский, А. Н. Интерферометры / А. Н. Захарьевский. – М. : ГИОП, 1952. – 296 с.
22. Коломийцев, Ю. В. Интерферометры / Ю. В. Коломийцев. – М. : Машиностроение, 1976. – 299 с.

23. Инюшин, А. И. Интерференционный метод контроля выпуклых параболических поверхностей / А. И. Инюшин, Л. А. Шифферс // Оптико-механическая-промышленность. – 1966. – №8. – С. 19-21.
24. Ritchey, G. W. On Methods of Testing Optical Mirrors During Construction / G. W. Ritchey // The Astrophysical Journal. – 1904. – Vol. 19, №1. – P.53 - 88.
25. Попов, Г. М. Изготовление больших ситалловых зеркал для телескопов типа Кассегрена и Ричи-Кретьена / Г. М. Попов // Изв. Крымской астрофиз. обсерватории. – 1972. – Т.46. – С. 159-166.
26. Wilson, R. N. Corrector Systems For Cassegrain Telescope / R. N. Wilson // Proceeding of the ESO/CERN Conference on Large Telescope design. – Geneve, 1971. – P. 131-177
27. Михельсон, Н. Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета / Н. Н. Михельсон. – М. : Физматлит, 1995. – 333 с.
28. Михельсон, Н. Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция / Н. Н. Михельсон. – М. : Наука, 1976. – 512 с.
29. Sironi, G. Evaluation of novel approach to deflectometry for high accuracy / G. Sironi, R. Canestrari, K. Tayabaly, G. Pareschi // Proc. SPIE. – 2016. – V. 9912. – P. 991213.
30. Fernandez, J. F. Curvature Radius Measurement Of Reflecting Surfaces By Moire Deflectometry / J. F. Fernandez, D. D. Soares, M. Perez-Amor, J. Blanco // Proc. SPIE. – 1988. – V. 0863. – P. 991213.
31. Пат. 1044969 СССР, МКИ 4G 01 В 11/24. Способ измерения профиля оптических поверхностей / Д.Т. Пуряев; заявитель и патентообладатель Московское ордена Ленина, Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени Высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана. – № 3467407.25-28 ; заявл. 09.07.82 ; опубл. 30.09.83, Бюл. № 36.
- 32. Пат. 2706388 Российская Федерация, МПК G 01 В 11/24. Метод контроля формы выпуклых оптических сферических и асферических поверхностей и устройство для его осуществления / Д. А. Новиков, Н. В.**

Иванникова, В. И. Батшев, А. С. Мачихин, А. Е. Гавлина; заявитель и патентообладатель РОССТАНДАРТ. – № 2019103813/09 ; заявл. 12.02.19 ; опубл. 18.11.19, Бюл. № 32.

33. Gavlina, A. E. Interferometer for large convex optical aspheric surfaces testing / A. E. Gavlina, V. I. Batshev, D. A. Novikov, M. V. Sergeeva // Proc. SPIE. – 2019. – V. 11056. – P. 110563T.

34. Gavlina, A. E. Topography mapping of convex aspheric surface up to 300 mm diameter Using "orthogonal ray" method / A. E. Gavlina, V. I. Batshev, D. A. Novikov, M. V. Sergeeva // Proc. SPIE. – 2019. – V. 11208. – P. 112082K.

35. Gavlina, A. E. Compact interferometer for precise shape testing of large-size convex aspherical mirrors / A. E. Gavlina, D. A. Novikov, M. V. Sergeeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1421. – P. 1-4.

36. Гавлина, А. Е. Современные методы контроля выпуклых асферических зеркал / А. Е. Гавлина, В. И. Батшев, Д. А. Новиков // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 10-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. – Суздаль, 2017. – С. 198-200.

37. Окатов, М. А. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Байгожин ; под ред. М. А. Окатова. – СПб. : Политехника, 2004. – 656 с.

38. Федина, Л. Г. Методы контроля формы асферических поверхностей вращения / Л. Г. Федина // Оптико-механическая-промышленность. – 1975. – №7. – С. 64-74.

39. Каширин, В. И. Основы формообразования оптических поверхностей: курс лекций / В. И. Каширин. – Екатеринбург. : ГОУ ВПО УГТУ, 2006. – 254 с.

40. Афанасьев, В. А. Оптические измерения: учебник для вузов / В. А. Афанасьев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. Школа, 1981. – 229 с.

41. Кирилловский, В. К. Оптические измерения. Часть 7. Инновационные методы контроля при изготовлении прецизионных асферических поверхностей / В.

К. Кирилловский, Е. В. Гаврилов. – СПб. : Гос. образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский гос. университет информационных технологий, механики и оптики», 2009. – 118 с.

42. Кукс, В. Г. Измерение деталей с асферическими поверхностями на сферометре ИЗС-7 / В. Г. Кукс, Л. Е. Липовецкий, В. А. Сюткин // Оптико-механическая-промышленность. – 1972. – №4. – С. 39-41.

43. Попов, Г. М. Кольцевой асферометр для контактного контроля асферических поверхностей астрономической оптики / Г. М. Попов, М. В. Попова // Изв. Крымской астрофиз. обсерватории. – 1985. – Т.71. – С. 174-180.

44. Бакаев, М. И. Об аттестации полярных измерительных приборов / М. И. Бакаев, А. В. Кузнецов, Б. А. Чунин // Оптико-механическая-промышленность. – 1990. – №11. – С. 66.

45. Lewis, A. Arcuate arm profilometry - traceable metrology for large mirrors / A. Lewis, S. Oldfield // Simposio de Metrología. – 2006. – V. 20. – P. 1-5.

46. Anderson, D. S. Swing-arm profilometry of aspherics / D. S. Anderson, J. H. Burge // Proc. SPIE. – 1995. – V. 2536. – P. 169-179.

47. Бакаев, М. И. Об аттестации полярных измерительных приборов / М. И. Бакаев, А. В. Кузнецов, Б. А. Чунин // Оптико-механическая-промышленность. – 1990. – №11. – С. 66.

48. Малакара, Д. Оптический производственный контроль / Д. Малакара ; под ред. А. Н. Соснова. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.

49. Духопел, И. И. Изготовление и методы контроля асферических поверхностей / И. И. Духопел, С. С. Качин, Б. А. Чунин. – Л. : Машиностроение, 1975. – 86 с.

50. Hartmann, J. Bemerkungen über den Bau und die Justierung von Spektrographen / J. Hartmann // Z Instrumentenkund. – 1900. – Bd. 20, №2. – S. 47.

51. Снежко, Л. И. Анализ основ метода Гартмана / Л. И. Снежко // Астрофизические исследования (Изв. Специальной астрофиз. обсерватории). – Л.: Наука, 1981. – Т. 14. – С. 3-14.

52. Зверев, В. А. Погрешность расшифровки гартманограмм и метод ее снижения / В. А. Зверев, В. В. Кирилловский, М. Н. Сокольский // Новая техника в астрономии ; под ред. Н. Н. Михельсона. – Л. : Наука, 1979. – вып. 6. – С. 98-101.

53. Еськова, Л. М. Метод Гартмана с регистрацией гартманограммы и диафрагмы в одном масштабе / Л. М. Еськова, А. И. Стороженко // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО: Выпуск 15 / СПбГУ ИТМО. – СПб, 2004. – С. 203-207.

54. Родионов, С. А. Автоматизация обработки результатов контроля выпуклых поверхностей методом переналожения пробного стекла / С. А. Родионов, И. П. Агурок, Н. А. Гойко // Методы аттестационного контроля оптических деталей и систем астроприборов: Информационные материалы III всесоюзного семинара, 16 мая 1978. – М., 1978. – С. 8-9.

55. Карлин, О. Г. Применение сферических и асферических пробных стекол для контроля асферических поверхностей / О. Г. Карлин, В. А. Сюткин // Оптико-механическая-промышленность. – 1972. – №3. – С. 37-39.

56. Духопел, И. И. Методы контроля формы асферических поверхностей вращения / И. И. Духопел, Н. В. Константиновская, Л. Г. Федина // Оптико-механическая-промышленность. – 1975. – №7. – С. 64-74.

57. Коломийцова, Т. С. Погрешности метода переналожения пробного стекла при контроле выпуклых сферических поверхностей / Т. С. Коломийцова, Н. В. Константиновская // Оптико-механическая-промышленность. – 1977. – №1. – С. 3-6.

58. Бодров, С. В. Расчет оптической системы для контроля формы выпуклых асферических зеркал на базе вогнутого зеркала: метод.указания по курсовому и дипломному проектированию / С. В. Бодров, Н. Н. Кулакова, Д. Т. Пуряев, А. М. Романов ; под ред. Д. Т. Пуряева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 23 с.

59. Hindle, J. H. A new test for cassegrainian and Gregorian secondary mirrors / J. H. Hindle // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1931. – V. 91, №51. – P. 591-593.
60. Abdulkadyrov, M. A. M2 Secondary Mirror Manufacturing for VISTA Project / M. A. Abdulkadyrov, A. P. Patrikeev, S. P. Belousov [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2008. – V. 7018. – P. 70180B.
61. Semenov, A. P. Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects) / A. P. Semenov, M. A. Abdulkadyrov, S. P. Belousov [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2012. – V. 8450. – P. 84504T.
62. Semenov, A. P. M1 and M2 Mirror Manufacturing for ARIES project: Current status / A. P. Semenov, M. A. Abdulkadyrov, A. P. Patrikeev [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2010. – V. 7739. – P. 773907.
63. Semenov, A. P. Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST / A. P. Semenov, M. A. Abdulkadyrov, S. P. Belousov [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2001. – Vol. 4451. – P. 138-144.
64. Lytle, J. D. A suggested Procedure for Testing Large Cassegrainian Optical Systems / J. D. Lytle // *Applied Optics*. – 1970. – Vol. 9, №11. – P. 2497-2500.
65. Kuhne, C. Production and Testing of the Optical Elements of the first 2.2.m – Telescope for MPJA / C. Kuhne // *Astronomy and Astrophysics*. – 1975. – Vol. 41, №3-4. – P. 345-353
66. Simpson, F. A. Testing Convex Aspheric Lens Surfaces with a Modified Hindle Arrangement / F. A. Simpson, B. H. Oland, J. T. Meckel // *Opt. Eng.* 1974. – 698 pp.
67. Smith, W. S. Current Developments in Optical Design and Optical Engineering IV / W. S. Smith, G. W. Jones // *Proc. SPIE*. – 1994. – V. 2263.
68. McKechnie, T. S. Interferometric test method for testing convex aspheric mirror surfaces / T. S. McKechnie // *Proc. SPIE*. – 2010. – V. 7739. – P. 77390Y.
69. Соснина, М. А. О компенсационном методе контроля крупных асферических зеркал / М. А. Соснина // *Изв. Главной астрон. абсерватории*. – 1958. – Т. 21, вып. 3, №162. – С. 145-146.

70. Novak, M. Distortion mapping correction in aspheric null testing / M. Novak, C. Zhao, J. H. Burge // SPIE 7063. Interferometry XIV: Techniques and Analysis. 706313. – 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.798151>.
71. Цань Цзюньхуа. Вторичные зеркала телескопов и оптические системы их контроля : дис ... канд. физ. – мат. наук . – Л., 1960. – 100 с.
72. Полещук, А. Г. Применение дифракционной оптики в измерительной технике / А. Г. Полещук [и др.] // Компьютерная оптика. – 2001. – вып. 22. – С. 85-95.
73. Семенов, А. П. Интерференционные методы контроля формы поверхностей крупногабаритных асферических деталей на основе линзовых и голограммных корректоров волнового фронта / А. П. Семенов [и др.] // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 4. – С. 33-38.
74. Chunyu, Z. CHG and stitching technique: powerful combination enabling full-surface figure measurements of certain classes of aspheres / Z. Chunyu // Proc. SPIE. – 2018. – V. 10815. – P. 1081503.
75. А.с. 1337654 СССР, МКИ 4G 01 В II/24. Способ измерения профиля выпуклых оптических поверхностей вращения / Д.Т. Пуряев, А.М. Романов ; заявитель и патентообладатель Московское ордена Ленина, Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени Высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана. – № 4016626/24-28; заявл. 04.02.86 ; опубл. 15.09.87, Бюл. №34.
76. Дружин, В. В. Метод Гартмана для контроля формы выпуклых асферических зеркал крупных оптических телескопов / В. В. Дружин, Д. Т. Пуряев // Оптический журнал. – 2007. – Т.74, №12. – С. 4-7.
77. Пуряев, Д. Т. Лазерный интерференционный метод для измерения и контроля профиля выпуклых асферических зеркал / Д. Т. Пуряев, В. И. Батшев, В. В. Дружин // Третья всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям: Сб. докладов. – Саров, 2009. – С. 88 – 90.

78. Saruta, K. Application of target tracking method using an Arago spot and divergent beam for in-chamber measurement / K. Saruta, R. Tsuji // *Journal of Physics*. – 2008. – V. 112032048. – P. 4.

79. Дружин, В. В. Измерение и контроль профиля светосильных выпуклых асферических зеркал на базе лазерного устройства с линзовым растром / В. В. Дружин, В. И. Батшев, Д. Т. Пуряев // *Лазеры в науке, технике, медицине: Сб. научных трудов*. – Москва, 2009. – Т. 20. – С. 109 – 111.

80. Batshev, V. I. Testing method of large-sized convex optical surfaces / V. I. Batshev, A. E. Gavlina, D. A. Novikov // *Proc. SPIE*. – 2018. – V. 10833. – P. 108331R.

81. Gavlina, A. E. Orthogonal ray scheme: A method for processing interference patterns and reconstructing the shape of a test convex mirror / A. E. Gavlina, D. A. Novikov, M. V. Askerko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – V. 2127. – P. 012066.

82. Батшев, В. И. Интерферометр для контроля формы выпуклых зеркал оптических и радиотелескопов, построенный по схеме ортогональных лучей / В. И. Батшев, Д. А. Новиков, А. Е. Гавлина, И. А. Баландин // *Радиотехника и электроника*. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 44-50.

83. Новиков, Д. А. Интерферометр для контроля качества выпуклых асферических зеркал размером до 250 мм / Д. А. Новиков, Н. В. Иванникова, В. И. Батшев, А. Е. Гавлина // *Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации : материалы 10-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова*. – Суздаль, 2017. – С. 200-202.

84. Гавлина, А. Е. Метод и устройство для контроля выпуклых оптических поверхностей диаметром 50-250 мм / А. Е. Гавлина, Д. А. Новиков // *Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения : сборник трудов II международной молодежной конференции*. – Астрахань, 2018. – С. 8.

85. Гавлина, А. Е. Интерференционный метод контроля выпуклых оптических поверхностей большого / А. Е. Гавлина, В. И. Батшев, Д. А. Новиков // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации : материалы 11-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. – Суздаль, 2018. – С. 119-121.

86. Гавлина, А. Е. Интерференционная установка для контроля формы выпуклых асферических зеркал диаметром до 250 мм / А. Е. Гавлина, В. И. Батшев, Д. А. Новиков // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации : материалы 12-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. – Москва, 2019. – С. 141-143.

87. Гавлина, А. Е. Интерферометр для контроля формы выпуклых асферических зеркал / А. Е. Гавлина, В. И. Батшев // Тезисы докладов IX научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Москва, 2020. – С. 10-11.

88. Новиков, Д. А. Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений параметров отклонений от плоскостности оптических поверхностей ГЭТ 183-2019 / Д. А. Новиков, Е. А. Милованова, Н. В. Иванникова, Н. А. Табачникова // Измерительная техника. – 2019. – № 11. – С. 3-6.

89. Askerko, M. V. Orthogonal ray interferometer: modification for testing convex and concave mirror surfaces / M. V. Askerko, A. E. Gavlina, V. I. Batshev, D. A. Novikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2127. – P. 012067.