

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

УДК 681.7.055.34

Ермолаева  
Елена Владимировна



**РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ СХЕМ КОНТРОЛЯ  
НЕСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2011 г.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Зверев Виктор Алексеевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Путилин Эдуард Степанович**  
СПбГУ ИТМО

кандидат технических наук  
**Волков Дмитрий Юрьевич**  
НПК "Азимут "

Ведущая организация: **НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова»,**  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится "1" марта 2011 г. в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.227.01 в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: г. Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д.14, ауд. 314а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Автореферат разослан "29" января 2011 г.

Отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим направлять в адрес университета: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, СПбГУ ИТМО, секретарю диссертационного совета Д.212.227.01.

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета Д 212.227.01,  
кандидат технических наук, доцент



В.М. Красавцев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность**

В настоящее время в оптических приборах все более широкое практическое применение находят оптические элементы, имеющие рабочие поверхности несферической формы. Это обусловлено тем, что применение таких поверхностей позволяет достичь более высокого качества изображения, повышения оптических характеристик, упрощения конструкции оптических приборов и уменьшения их габаритных размеров и массы.

Наибольший эффект от использования оптических элементов несферической формы достигается в светосильных крупногабаритных телескопах наземного и космического базирования, предназначенных для формирования высококачественного изображения в пределах достаточно широкого углового поля.

Высокое качество изображения, формируемого оптическими приборами, может быть реализовано только при условии изготовления оптических элементов с высокой точностью. Наиболее сложным является изготовление оптических элементов с несферическими поверхностями вращения.

Для обеспечения высокого качества изготовления оптических элементов с несферическими поверхностями вращения необходимы высокоточные системы контроля. Достигнутое в результате расчета высокое качество изображения можно реализовать в процессе изготовления, если отклонения поверхностей от номинальной формы не будут превышать, по крайней мере,  $\frac{1}{8}\lambda$ . Это условие определяет весьма высокие требования к точности контроля формы поверхностей в процессе их обработки.

Точность контроля оптических элементов в первую очередь определяется схемой контроля. Схемы контроля для оптических элементов с несферическими поверхностями вращения разработаны академиком В.П. Линником и членом корреспондентом АН СССР Д.Д. Максуповым. В дальнейшем эти работы были продолжены в трудах А. Кудэ, Х.Е. Долла, Ф.Е. Росса, А. Оффнера, Д.Т. Пуряева и других авторов.

Однако существующие схемы контроля не отвечают современным требованиям по точности измерений и технологичности. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка и анализ схем контроля несферических поверхностей вращения.

**Цель диссертационной работы** заключается в повышении точности и технологичности систем контроля несферических поверхностей вращения оптических элементов за счет развития оптических метрологических средств контроля.

**Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:**

1. Разработка схем контроля и методик расчета параметров схем контроля несферических поверхностей оптических элементов, представляющих собой выпуклые поверхности гиперboloида, эллипсоида и параболоида вращения и вогнутую поверхность гиперboloида вращения диаметром до 250 мм с анаберрационным мениском.

2. Разработка методики расчета параметров схемы контроля вогнутых несферических поверхностей вращения с компенсатором Оффнера.

3. Получение функциональной зависимости для продольной сферической аберрации в изображении точки, образованном компенсатором, при компенсационном методе контроля формы несферической поверхности вращения второго и более высокого порядка.

4. Исследование взаимного влияния конструктивных параметров схем контроля несферических поверхностей оптических элементов, представляющих собой выпуклые поверхности гиперboloида, эллипсоида и параболоида вращения и вогнутую поверхность гиперboloида вращения диаметром до 250 мм с анаберрационным мениском.

**Объект исследования** представляет собой систему контроля формы несферических поверхностей вращения оптических элементов.

**Предмет исследования** – схемы контроля и методики расчета параметров схем контроля оптических элементов с несферическими поверхностями вращения.

#### **Методы исследований**

При решении поставленных задач использовались методы математического моделирования оптических систем, методы автоматизированного проектирования и расчета оптических систем и методы, основанные на применении теории аберраций третьего порядка.

#### **Научная новизна работы**

1. Предложены новые схемы контроля выпуклых несферических поверхностей с анаберрационным мениском и разработаны методики расчета их параметров.

2. Разработано теоретическое описание принципов работы компенсатора Оффнера.

3. Разработана методика расчета схемы контроля вогнутых несферических поверхностей с компенсатором Оффнера.

4. Получена функциональная зависимость для продольной сферической аберрации в изображении точки, образованном компенсатором, при компенсационном методе контроля формы несферической поверхности вращения второго и более высокого порядка.

### **Практическая ценность работы**

1. Предложены конструктивно-схемные решения и методики расчета параметров схем контроля несферических поверхностей оптических элементов, позволяющие повысить точность и технологичность контроля выпуклых поверхностей гиперboloида, эллипсоида и параболоида вращения и вогнутой поверхности гиперboloида вращения диаметром до 250 мм с анаберрационным мениском. Указанный практический эффект достигается за счет того, что в предложенных схемах диаметр анаберрационного мениска не превышает диаметр контролируемой поверхности, отсутствует зона неконтролируемой поверхности и контроль самого вспомогательного мениска может быть осуществлен простыми средствами.

2. Разработаны практические рекомендации по расчету компенсаторов по схеме Оффнера, по выбору параметров анаберрационного мениска в схеме контроля выпуклой поверхности гиперboloида и выпуклой поверхности эллипсоида вращения, по выбору оптической системы компенсатора в компенсационной схеме контроля несферической поверхности вращения.

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении исследований по теме «Анализ и разработка схем контроля оптических несферических поверхностей» в Техническом университете Ильменау (Германия) в рамках международного гранта фонда DAAD.

### **На защиту выносятся следующие результаты:**

1. Схемы контроля и методики расчета параметров схем контроля несферических поверхностей оптических элементов, представляющих собой выпуклые поверхности гиперboloида, эллипсоида и параболоида вращения и вогнутую поверхность гиперboloида вращения диаметром до 250 мм с анаберрационным мениском.

2. Методика расчета параметров схемы контроля вогнутых несферических поверхностей вращения с компенсатором Оффнера.

3. Функциональная зависимость для продольной сферической аберрации в изображении точки, образованном компенсатором, при компенсационном методе контроля формы несферической поверхности вращения второго и более высокого порядка.

4. Результаты исследования взаимного влияния конструктивных параметров схем контроля несферических поверхностей оптических элементов, представляющих собой выпуклые поверхности гиперboloида, эллипсоида и параболоида вращения и вогнутую поверхность гиперboloида вращения диаметром до 250 мм с анаберрационным мениском, и функциональной зависимости величины разброса точек пересечения нормалей к несферической поверхности вращения второго порядка с оптической осью от апертурной координаты.

### **Апробация работы**

Результаты выполненных исследований были доложены на XXXVI, XXXVII и XXXVIII научных и учебно-методических конференциях СПбГУ ИТМО в 2008, 2009 и 2010 годах, на V, VI и VII Всероссийских межвузовских конференциях молодых ученых в 2008, 2009 и 2010 годах, на IX международной конференции «Прикладная оптика-2010» в 2010 году, на кафедре Технической оптики Технического университета г. Ильменау (Германия).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 7 работ, две из них опубликованы в издании, входящем в перечень ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит список цитируемых литературных источников из 37 наименований, изложена на 140 страницах машинописного текста и содержит 60 рисунков и 5 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

**В первой главе диссертации** рассматриваются и анализируются основные параметры несферических поверхностей, которые определяют условия их контроля и изготовления. Представлен анализ технологических параметров несферических поверхностей.

Рассмотрены различные виды несферических поверхностей и их абберационные свойства, определяющие целесообразность их применения при композиции оптических систем. В общем случае анаберрационная преломляющая поверхность вращения имеет несферическую форму, определяемую уравнением образующей кривой четвертой степени. Такие поверхности называют декартовыми поверхностями. Рассмотрены декартовы отражающие и преломляющие поверхности вращения и их применение в оптических системах.

Рассматриваются эквидистантные поверхности профессора Д.Т. Пуряева, приведено уравнение несферической поверхности, эквидистантной параболоиду вращения.

Показано, что вращение произвольной кривой, несимметричной относительно нормали к ней в некоторой точке, вокруг этой нормали приводит к образованию двух поверхностей вращения, которые названы бинарной поверхностью. Рассмотрены особые абберационные свойства бинарных поверхностей, а также абберационные свойства несферических поверхностей, образованных вращением эвольвенты эволюты, имеющей вид окружности.

**Во второй главе** дается обзор принципов построения схем контроля формы несферических поверхностей. Рассматриваются и анализируются известные схемы контроля вогнутых и выпуклых несферических поверхностей.

Рассмотрены схемы контроля линз, формирующих безабберационное изображение бесконечно удаленной осевой точки предмета.

Отражающие асферические поверхности, образованные вращением кривых второго порядка вокруг оси, соединяющей их геометрические фокусы, имеют замечательное оптическое свойство: геометрические фокусы этих поверхностей являются оптически сопряженными анаберрационными точками. Если поверхность имеет идеальную форму и точечный источник света расположен в одном из геометрических фокусов, то отраженные от поверхности лучи образуют безабберационное изображение источника во втором геометрическом фокусе.

Примером удачного построения схемы с использованием свойств анаберрационных точек асферических поверхностей второго порядка может служить схема Хиндла для контроля формы выпуклой поверхности гиперboloида. В качестве дополнительного оптического элемента применена сфера, центр кривизны которой совмещен с труднодоступным фокусом гиперboloида. Аналогичные схемы могут быть использованы для контроля ряда несферических поверхностей второго порядка.

Недостаток метода заключается в необходимости изготовления высокоточного сферического зеркала, диаметр которого иногда в несколько раз превышает диаметр контролируемой поверхности. Это исключает возможность применения метода анаберрационных точек для контроля асферических поверхностей больших диаметров, например, астрономических зеркал. Этим вызвано появление компенсационных схем контроля отражающих поверхностей вращения несферической формы.

Идея контроля вогнутой отражающей поверхности параболоида вращения компенсационным методом впервые была высказана в 1921 году и практически осуществлена академиком АН СССР В.П. Линником. В дальнейшем компенсационный метод контроля несферических поверхностей получил развитие в работах Д.Д. Максудова, А. Кудэ, Х.Е. Долла, Ф.Е. Росса, А. Оффнера, Д.Т. Пуряева и других авторов.

Сущность компенсационного метода контроля заключается в том, что с помощью дополнительной оптической системы (компенсатора) сферический (в частном случае плоский) волновой фронт преобразуется в несферический, эквидистантный номинальной форме контролируемой несферической поверхности и, в конечном счете, совпадающий с ней.

Компенсационный метод контроля применяется для контроля формы асферических поверхностей второго и высших порядков.

**Третья глава** посвящена разработке и анализу компенсационных схем контроля вогнутых поверхностей вращения несферической формы. На сегодняшний день компенсационный метод является единственным эффективным методом контроля крупногабаритных асферических поверхностей как второго, так и высших порядков.

Получена функциональная зависимость величины разброса точек пересечения нормалей к несферической поверхности вращения второго порядка с оптической осью от апертурной координаты:

$$\Delta s' = \frac{1}{2} e^2 r_0 \psi_e \operatorname{tg}^2 \gamma_p, \quad (1)$$

$$\text{где } \psi_e = 1 + \frac{1}{4} (1 - e^2) \operatorname{tg}^2 \gamma_p + \frac{1}{8} (1 - e^2)^2 \operatorname{tg}^4 \gamma_p + \frac{5}{64} (1 - e^2)^3 \operatorname{tg}^6 \gamma_p + \dots;$$

$e$  - эксцентриситет контролируемой несферической поверхности;

$$\operatorname{tg} \gamma_p = \frac{y}{r_0};$$

$r_0$  - радиус кривизны при вершине контролируемой несферической поверхности.

Для сферической поверхности разброс нормалей равен нулю; разброс точек пересечения нормалей к поверхности параболоида вращения с оптической осью при  $r_0 > 0$  соответствует положительной сферической aberrации третьего порядка при ее контроле; разброс точек пересечения нормалей к поверхности эллипсоида вращения с оптической осью при  $r_0 > 0$  соответствует положительной сферической aberrации при положительных значениях aberrаций высшего порядка при ее контроле. Разброс точек пересечения нормалей к поверхности гиперболоида вращения с оптической осью при  $r_0 > 0$  соответствует положительной сферической aberrации при отрицательных значениях aberrаций высшего порядка при ее контроле.

В соответствии со смыслом решаемой задачи выражение (1) определяет продольную сферическую aberrацию  $\Delta s'_k$  в изображении точки, образованном компенсатором. При этом в идеальном случае должно выполняться условие:  $\Delta s'_k = -\Delta s'$ .

Полученные результаты выполненного анализа позволяют сделать следующие выводы:

1. Получена функциональная зависимость продольной сферической aberrации в изображении точки, образованном компенсатором, при компенсационном методе контроля формы несферической поверхности второго порядка.
2. Показано, что величина  $e^2$  определяет не только величину продольной сферической aberrации, но и характер ее изменения при изменении выходного угла  $\sigma'_k = \gamma_p$ .
3. Из анализа полученной функциональной зависимости продольной сферической aberrации от выходного угла следует, что она имеет достаточно монотонный характер при контроле формы поверхности эллипсоида и параболоида вращения, а в схеме контроля формы поверхности гиперболоида вращения определяется знакопеременным рядом.

Таким образом, в схеме контроля формы вогнутой поверхности эллипсоида или параболоида вращения оптическая система компенсатора принципиально может состоять из одной линзы. При контроле формы



поверхности вогнутого гиперboloида оптическая система компенсатора должна быть более сложной.

Рассматриваемая методика вполне применима и в случае применения поверхности более высокого порядка, тем более что коэффициенты при членах более высокого порядка, как правило, весьма малы.

Рассматриваются и анализируются известные конструкции компенсаторов в схемах контроля вогнутых несферических поверхностей вращения.

Выполнены разработка и анализ методики расчета схемы контроля вогнутых несферических поверхностей вращения с компенсатором Оффнера.

Данная схема является одной из наиболее эффективных и простых систем, позволяющих осуществлять контроль вогнутых несферических поверхностей вращения. Принципиальным отличием компенсатора Оффнера от других компенсаторов является необходимость промежуточного изображения точечного источника между компенсатором и контролируемой поверхностью. Вблизи центра кривизны при вершине параболоида расположена дополнительная полевая линза.

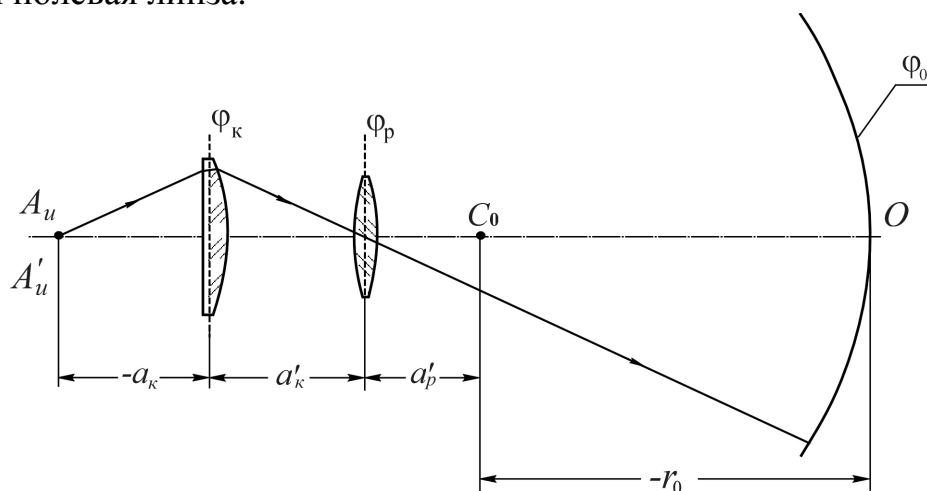


Рис. 3.12. Компенсатор Оффнера

Сам Оффнер описывал предложенный им компенсатор для контроля вогнутой поверхности параболоида следующим образом. Он отмечал, что небольшая линза, образующая действительное изображение точечного источника в центре кривизны параболоида, в сочетании с полевой линзой, изображающей ее на поверхности параболоида, с оптической точки зрения эквивалентна большой линзе вблизи контролируемой поверхности. При этом сферическая aberrация в изображении точки, образованном компенсатором, соответствовала бы сферической aberrации нормалей к контролируемой поверхности.

Таким образом, Оффнер предложил систему контроля, но отсутствовали теоретическое обоснование принципа работы предложенного им компенсатора и методика расчета параметров компенсационной схемы.

В диссертационной работе предложено принципиально новое описание работы элементов компенсатора Оффнера, на основе которого выработана методика расчета оптической системы схемы контроля.

Продольная сферическая аберрация в изображении точки, образованном компенсатором в схеме Оффнера, должна быть равна с противоположным знаком величине разброса нормалей к контролируемой несферической поверхности, при этом необходимо обеспечить равенство углов лучей с оптической осью на выходе компенсатора углам нормалей к соответствующим точкам несферической поверхности с оптической осью.

Для вогнутой несферической поверхности диаметром до 10 м разброс нормалей соизмерим с продольной сферической аберрацией, которую вносит в изображение точки отдельная положительная линза диаметром до 500 мм. Однако из-за различия форм кривых зависимости разброса нормалей к несферической поверхности и зависимости продольной сферической аберрации от апертурной координаты для отдельной линзы остаточная аберрация в контрольной схеме получается значительной.

Таким образом, с помощью 1-го компонента можно получить компенсацию разброса нормали к крайней точке несферической поверхности, т.е. собственная аберрация компенсатора равна величине разброса нормали к крайней точке несферической поверхности с противоположным знаком. При этом необходимо обеспечить равенство выходного угла для крайнего луча после компенсатора и угла между нормалью к данной точке несферической поверхности и оптической осью. Однако при этом получается большая некомпенсированная аберрация для зоны зрачка.

Для компенсации остаточной сферической аберрации для зоны зрачка в каустику лучей после компенсатора нужно установить полевую линзу, ее оптическая сила должна быть мала. При этом точность установки полевой линзы не будет оказывать сильного влияния, грубым продольным перемещением полевой линзы можно добиваться плавного изменения характера хода кривой остаточной продольной аберрации в схеме контроля. За счет положения и оптической силы полевой линзы можно добиться перераспределения сферической аберрации в изображении точки по зрачку, изменения характера кривой продольной сферической аберрации и получить приемлемую компенсацию сферической аберрации в схеме контроля несферической поверхности.

Для расчета компенсатора Оффнера 1-й компонент компенсатора представляется в виде тонкого компонента.

Конструктивные параметры 1-го компонента компенсатора определяются из равенства сферической аберрации 3-го порядка компенсатора для крайней точки зрачка разбросу нормали к крайней точке несферической поверхности и равенства нулю второй суммы Зейделя, что необходимо для сопряжения лучей на выходе компенсатора с нормальями к соответствующим точкам несферической поверхности.

Для определения оптической силы полевой линзы она представляется в виде тонкого компонента. Работа полевой линзы рассматривается следующим образом. Пусть полевая линза установлена в центре кривизны при вершине контролируемой несферической поверхности, куда приходит параксиальное изображение после 1-го компонента. Передним отрезком полевой линзы

служит величина продольной сферической aberrации после 1-го компонента для данной точки входного зрачка, а задним отрезком – величина разброса нормали для данной точки несферической поверхности. Исходя из этого получено соотношение для увеличения полевой линзы:

$$V_{nl} = \frac{1}{1 + \Delta s'_k \varphi_{nl}}, \quad (2)$$

где  $\Delta s'_k$  - продольная сферическая aberrация в изображении точки, образованном первым компонентом компенсатора;  
 $\varphi_{nl}$  - оптическая сила полевой линзы.

Были введены новые параметры. Параметр  $\psi_k = \frac{\Delta s'_{k1}}{\Delta s'_{k2}}$  равен отношению сферических aberrаций первого элемента компенсатора для двух величин выходных апертур – максимальной величины и какого-либо значения для зоны входного зрачка. Параметр  $\psi_n = \frac{\Delta s'_{n1}}{\Delta s'_{n2}}$  равен отношению величин разброса нормалей для максимальной апертуры поверхности и для одного значения для зоны входного зрачка.

Получено соотношение для оптической силы полевой линзы для случая компенсации продольной сферической aberrации для крайней точки зрачка и для какого-либо значения зрачковой координаты:

$$\varphi_{nl} = -\frac{\psi_k}{\Delta s'_{k1}} \frac{\sqrt[3]{\psi_k} - \sqrt[3]{\psi_n}}{\sqrt[3]{\psi_k} - \psi_k \sqrt[3]{\psi_n}}, \quad (3)$$

На основе разработанной методики выработаны практические рекомендации по расчету компенсаторов по схеме Оффнера.

Показано, что в случае, когда точность изготовления несферической поверхности методом алмазного точения является достаточной, может быть применена схема контроля с однолинзовым компенсатором. В этом случае первая поверхность компенсатора может быть концентрична источнику света, а вторая поверхность будет являться асферикой высшего порядка. В этом случае компенсатор может быть изготовлен и проконтролирован под поверхность, эквидистантную данной несферической поверхности. Эквидистантные несферические поверхности имеют совершенно одинаковые aberrации нормалей, но отличаются одна от другой радиусом кривизны при вершине и видом описывающих их уравнений. Эквидистантная поверхность располагается в непосредственной близости от компенсатора и имеет сравнительно небольшой диаметр. Она может быть изготовлена методом алмазного точения на станке с программным управлением. Получены соотношения для координат X, Y поверхности, эквидистантной данной контролируемой несферической поверхности. При этом профиль эквидистантной поверхности при изготовлении задается в виде координат.

**В четвертой главе** диссертации проводится разработка и анализ схем контроля выпуклых поверхностей вращения несферической формы.

Контроль формы выпуклых асферических поверхностей в настоящее время представляет собой наиболее сложную задачу. Идеальной схемой контроля формы несферических поверхностей вращения второго порядка является схема, основанная на использовании анаберрационных точек (геометрических фокусов) поверхностей второго порядка. Примером удачного построения такой схемы может служить схема Хиндла для контроля формы выпуклой поверхности гиперboloида, в которой в качестве дополнительного оптического элемента применено сферическое зеркало.

Недостаток схемы заключается в необходимости изготовления высокоточного сферического зеркала, диаметр которого иногда в несколько раз превышает диаметр контролируемой поверхности.

Для контроля формы выпуклой поверхности гиперboloида вращения диаметром до 250 мм может быть применена схема с анаберрационным мениском.

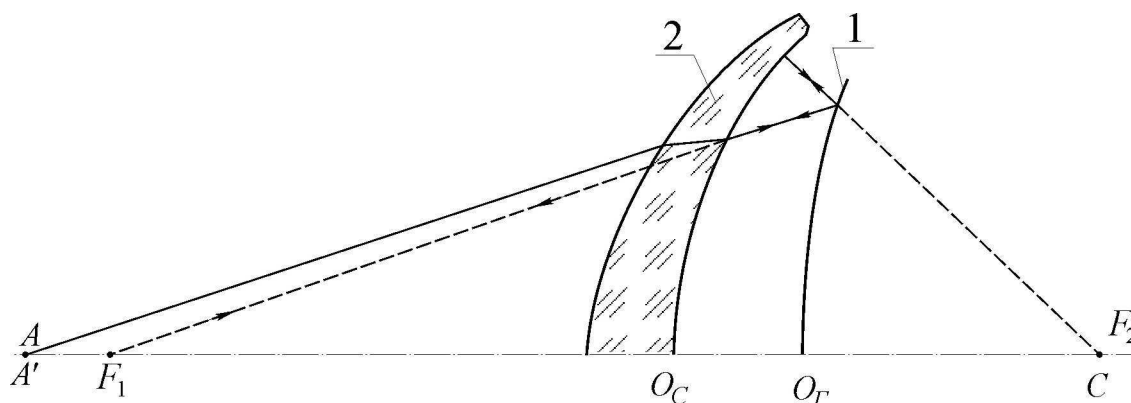


Рис. 1. Автоколлимационная схема контроля выпуклой поверхности гиперboloида вращения с анаберрационным мениском

Данная схема была предложена профессором Д.Т. Пуряевым, она описана также Ф.А. Симпсоном, В.Х. Оландом и Ж. Меккелем. В этой схеме применен анаберрационный мениск, вогнутая поверхность которого играет роль вспомогательной сферы, концентричной геометрическому фокусу  $F_2$  контролируемого гиперboloида 1, а радиус кривизны выпуклой поверхности мениска служит коррекционным параметром для компенсации сферической aberrации, вносимой в изображение геометрического фокуса  $F_1$  вогнутой поверхностью мениска.

На базе схемы контроля формы выпуклой поверхности гиперboloида вращения с менисковым компенсатором были разработаны схемы контроля выпуклой поверхности параболоида вращения, выпуклой поверхности эллипсоида вращения, а также вогнутой поверхности гиперboloида вращения. На рисунках представлены схемы для контроля этих поверхностей.

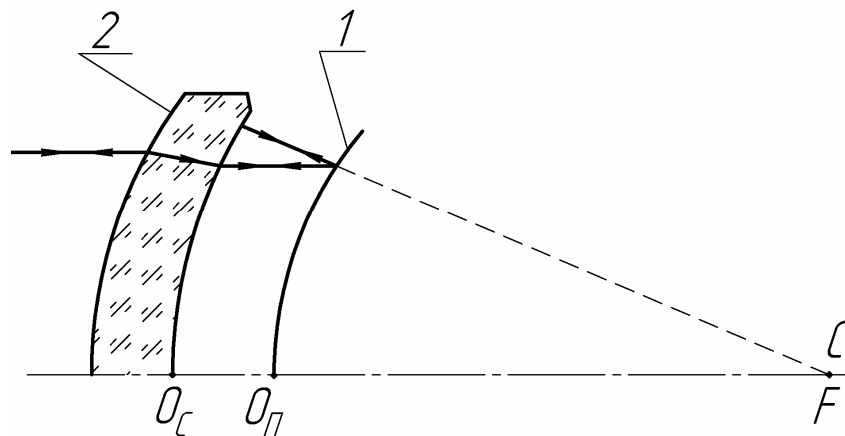


Рис. 3. Автоколлимационная схема контроля выпуклой поверхности параболоида вращения с анаберрационным мениском

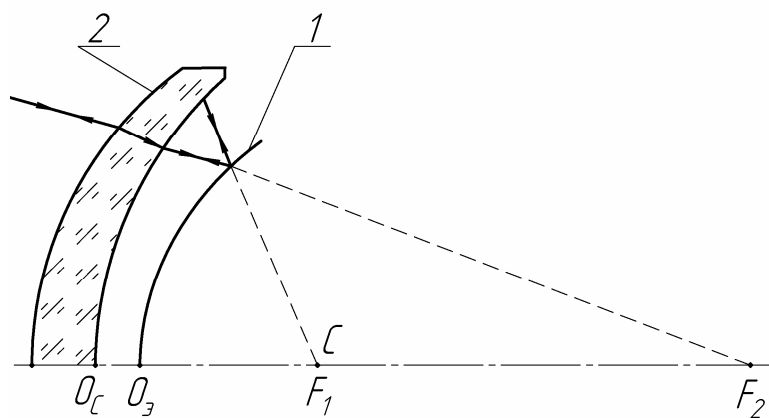


Рис. 4. Автоколлимационная схема контроля выпуклой поверхности эллипсоида вращения с анаберрационным мениском

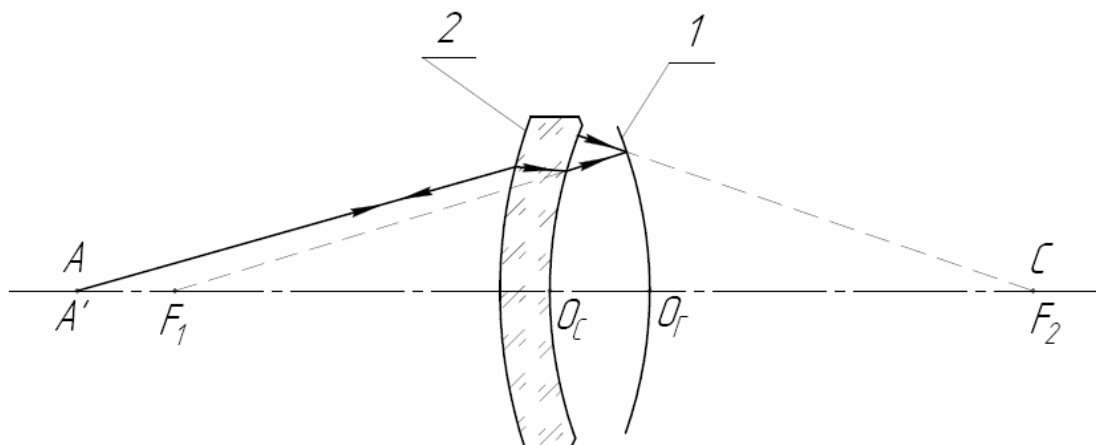


Рис. 5. Автоколлимационная схема контроля вогнутой поверхности гиперboloида вращения с анаберрационным мениском

Предлагаемые схемы обладают следующими достоинствами:

- диаметр анаберрационного мениска практически равен диаметру контролируемой поверхности зеркала;
- отсутствует зона неконтролируемой поверхности;

- снижена трудоемкость юстировки;
- анаберрационный мениск может быть аттестован простыми средствами.

Проведен анализ свойств анаберрационного мениска как элемента автоколлимационной схемы контроля выпуклых несферических поверхностей вращения второго порядка.

Разработаны методики расчета параметров предложенных схем контроля. При разработке методики контрольный мениск был представлен в обратном ходе лучей с помощью углов  $\alpha$  и  $\alpha'$  первого параксиального луча с оптической осью.

Из соотношений параксиальной оптики и из условия равенства нулю сферической аберрации третьего порядка вносимой мениском, получены соотношения для углов  $\alpha$  и  $\alpha'$ , определяющие конструктивные параметры мениска и передний отрезок схемы контроля.

Соотношения для углов  $\alpha$  и  $\alpha'$ , определяющие конструктивные параметры схемы контроля выпуклой поверхности гиперboloида вращения выглядят следующим образом:

$$\alpha = 1 - 2 \frac{n-1}{n} \frac{e}{e-1} \frac{r_0}{r_0 + (e+1)d_0}, \quad (4)$$

где  $n$  - показатель преломления материала мениска;

$e$  - эксцентриситет контролируемого гиперboloида;

$r_0$  - радиус кривизны при вершине контролируемого гиперboloида вращения;

$d_0$  - расстояние от ближней к гиперboloиду поверхности мениска до вершины гиперboloида.

$$\alpha'^3 - (2 + \nu)\alpha\alpha'^2 + (1 + 2\nu)\alpha^2\alpha' - \nu\alpha^3 - \frac{(1 - \nu\alpha)(1 - \alpha)^2}{1 - \frac{e-1}{1 - (e-1)\tilde{d}_0}\alpha\tilde{d}_m} = 0, \quad (5)$$

где  $d_m$  - толщина мениска,

$$\tilde{d}_m = \frac{d_m}{r_0}, \quad \tilde{d}_0 = \frac{d_0}{r_0}.$$

$$\overset{\leftarrow}{s}_2 = -s_1 = \frac{h_2}{\alpha'} = \frac{1 - \alpha\tilde{d}_m}{\alpha'} \left( \frac{r_0}{e-1} - d_0 \right). \quad (6)$$

Были получены зависимости величины угла  $\alpha'$  от величины квадрата эксцентриситета  $e^2$  контролируемого гиперboloида вращения в диапазоне  $1 < e^2 \leq 10$  при  $n = 1.5$  для ряда выбранных значений  $\tilde{d}_m$  представлены на рис. 6.

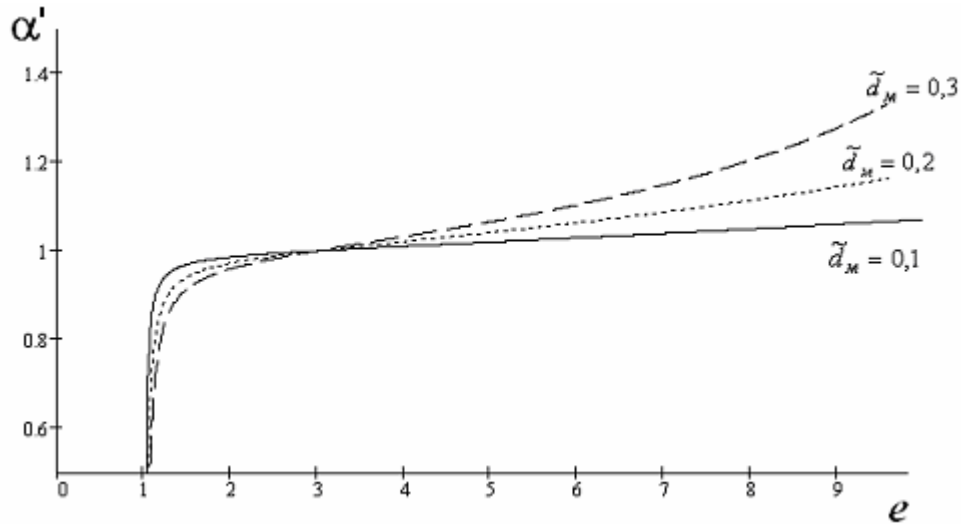


Рис. 6. Зависимости угла  $\alpha'$  от эксцентриситета контролируемого выпуклого гиперboloида вращения при разных толщинах мениска

В результате анализа данной схемы контроля и разработанной методики расчета ее параметров установлено:

1. Предлагаемая методика позволяет рассчитать оптическую систему для контроля формы поверхности гиперboloида вращения при  $1 < e^2 < \infty$ .
2. При произвольной толщине мениска и при равных радиусах кривизны его поверхностей рассматриваемая оптическая система позволяет контролировать форму поверхности гиперboloида вращения при  $3 \leq e^2 < \infty$ .
3. В случае неравных радиусов кривизны поверхностей мениска данная схема позволяет контролировать форму поверхности гиперboloида вращения при  $1 < e^2 < 3$ . При этом конструктивные параметры оптической системы зависят от толщины мениска. С ростом толщины мениска плоскость изображения удаляется, поэтому в области малых эксцентриситетов следует применять мениски с наименьшей толщиной.

Получены соотношения, определяющие конструктивные параметры мениска в случае контроля формы выпуклой поверхности параболоида вращения:

$$\alpha = -\frac{n-1}{n} \frac{r_0}{r_0 + 2d_0}, \quad (7)$$

$$\alpha'^3 - (2 + \nu)\alpha\alpha'^2 + (1 + 2\nu)\alpha^2\alpha' + \frac{\nu\alpha^4\tilde{d}_m}{1 - \alpha\tilde{d}_m} = 0, \quad (8)$$

где  $\tilde{d}_m = \frac{2}{r_0}d_m$ .

Полученные соотношения, определяющие конструктивные параметры мениска в случае контроля формы выпуклой поверхности эллипсоида вращения, выглядят следующим образом:

$$\alpha = -1 - 2 \frac{n-1}{n} \frac{e}{1-e} \frac{r_0}{r_0 + (1+e)d_0}, \quad (9)$$

$$\alpha'^3 - (2+\nu)\alpha\alpha'^2 + (1+2\nu)\alpha^2\alpha' - \nu\alpha^3 + \frac{(1+\nu\alpha)(1+\alpha)^2}{1 - \frac{1-e}{1+(1-e)\tilde{d}_0} \alpha\tilde{d}_m} = 0, \quad (10)$$

где  $\tilde{d}_m = \frac{d_m}{r_0}$ ,  $\tilde{d}_0 = \frac{d_0}{r_0}$ .

Получены зависимости значений угла  $\alpha'$  от величины квадрата эксцентриситета контролируемого эллипсоида для трех значений толщины мениска. Величина угла  $\alpha'$  определяет величину переднего отрезка схемы контроля.

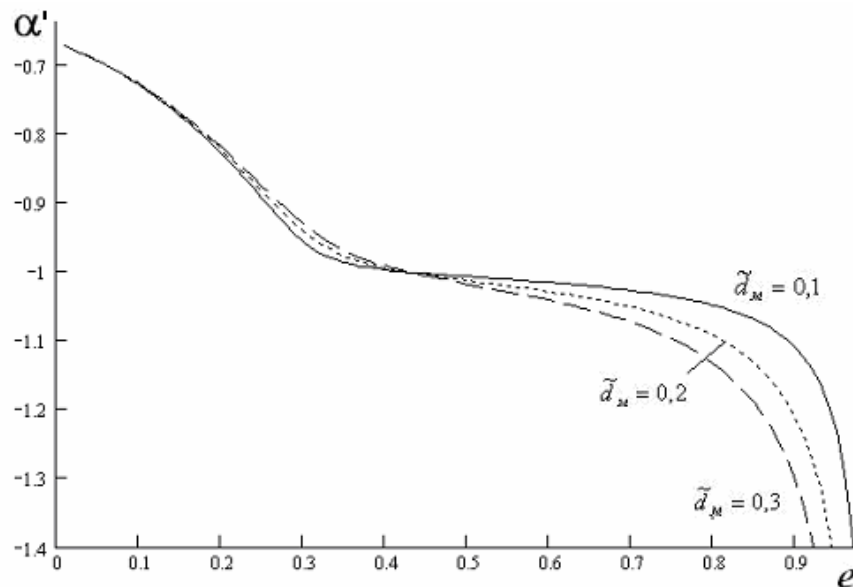


Рис. 7. Зависимость угла  $\alpha'$  от эксцентриситета контролируемого выпуклого эллипсоида вращения при разных толщинах мениска

Из рисунка следует, что в области эксцентриситетов, близких к 1, величина угла  $\alpha'$  круто падает. Падение тем круче, чем больше толщина мениска.

В результате анализа предложенной схемы контроля и разработанной методики расчета ее параметров установлено:

1. Предлагаемая методика позволяет рассчитать оптическую систему для контроля формы выпуклой поверхности эллипсоида вращения при  $0 < e^2 < 1$ .

2. В области эксцентриситетов, близких к 1, величина угла  $\alpha'$  круто падает. Падение тем круче, чем больше толщина мениска, вследствие чего происходит увеличение апертуры мениска. Поэтому в области эксцентриситетов, близких к 1, следует применять мениски с наименьшей толщиной.

Достоинствами предложенных схем контроля являются:



1. В предложенных схемах диаметр анаберрационного мениска не превышает диаметр контролируемой поверхности зеркала.
2. Отсутствует зона неконтролируемой поверхности.
3. Контроль самого вспомогательного мениска может быть осуществлен простыми средствами.
4. Снижена трудоемкость юстировки.

В результате предложенные схемы контроля позволяют повысить точность и технологичность контроля.

Для контроля выпуклых несферических поверхностей вращения диаметром более 0.25 м, в общем случае, можно применить контрольную схему со вспомогательным вогнутым сферическим зеркалом и линзовым корректором, предложенную А.П. Грамматиным и В.А. Зверевым.

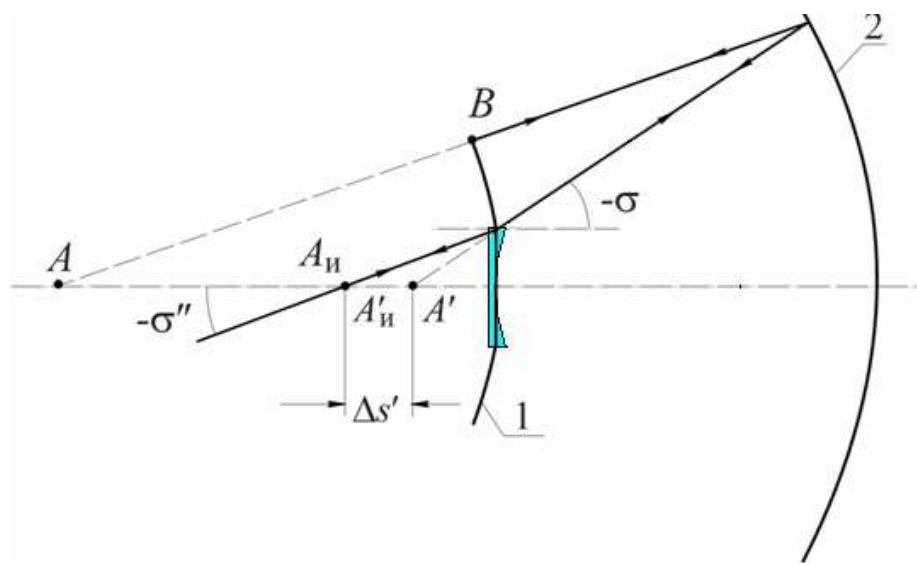


Рис. 8. Схема контроля выпуклой несферической поверхности вращения с дополнительным сферическим зеркалом и линзовым корректором

На основе приведенной выше функциональной зависимости величины разброса нормалей к несферической поверхности вращения от апертурной координаты установлено, что для контроля поверхности сплющенного сфероида принципиально применима схема с дополнительным сферическим зеркалом, разброс aberrаций нормалей сплющенного сфероида может быть скомпенсирован aberrациями вогнутого сферического зеркала. При контроле выпуклых несферических поверхностей диаметром более 0.25 – 0.35 м вогнутое сферическое зеркало может служить лишь вспомогательным оптическим элементом для формирования требуемого хода лучей, для компенсации же разброса нормалей применяется дополнительный отрицательный оптический компонент – компенсатор. В качестве окончательного корректора aberrаций можно применить киноформный элемент.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны новые схемы контроля выпуклых поверхностей параболоида и эллипсоида вращения и вогнутой поверхности гиперboloида вращения диаметром до 250 мм с анаберрационным мениском. В предложенных схемах диаметр анаберрационного мениска не превышает диаметр контролируемой поверхности зеркала, отсутствует зона неконтролируемой поверхности, контроль самого вспомогательного мениска может быть осуществлен простыми средствами. В результате повышается точность и технологичность контроля данных поверхностей.
2. Разработаны методики расчета параметров схемы контроля выпуклой поверхности гиперboloида, параболоида и эллипсоида вращения и вогнутой поверхности гиперboloида вращения диаметром до 250 мм с анаберрационным мениском, которые основаны на равенстве нулю сферической аберрации третьего порядка, вносимой мениском. Методики позволяют получить конструктивные параметры схем контроля, обеспечивающие отсутствие сферической аберрации.
3. Разработаны теоретическое описание принципа работы компенсатора Оффнера и методика расчета схемы контроля вогнутых несферических поверхностей вращения с компенсатором Оффнера, позволяющие обеспечить компенсацию сферической аберрации для всех точек входного зрачка оптической системы контроля.
4. Получена функциональная зависимость для продольной сферической аберрации в изображении точки, образованном компенсатором, при компенсационном методе контроля формы несферической поверхности вращения, позволяющая определить конструктивно-схемное решение оптической системы компенсатора в компенсационной схеме контроля несферической поверхности вращения.
5. Результаты исследования взаимного влияния конструктивных параметров схем контроля несферических поверхностей оптических элементов, представляющих собой выпуклые поверхности гиперboloида, эллипсоида и параболоида вращения и вогнутую поверхность гиперboloида вращения диаметром до 250 мм с анаберрационным мениском, и функциональной зависимости величины разброса точек пересечения нормалей к несферической поверхности вращения второго порядка с оптической осью от апертурной координаты.
6. Практические рекомендации по расчету компенсаторов по схеме Оффнера, по выбору параметров анаберрационного мениска в схеме контроля выпуклой поверхности гиперboloида и выпуклой поверхности эллипсоида вращения, по выбору оптической системы компенсатора в компенсационной схеме контроля несферической поверхности вращения.