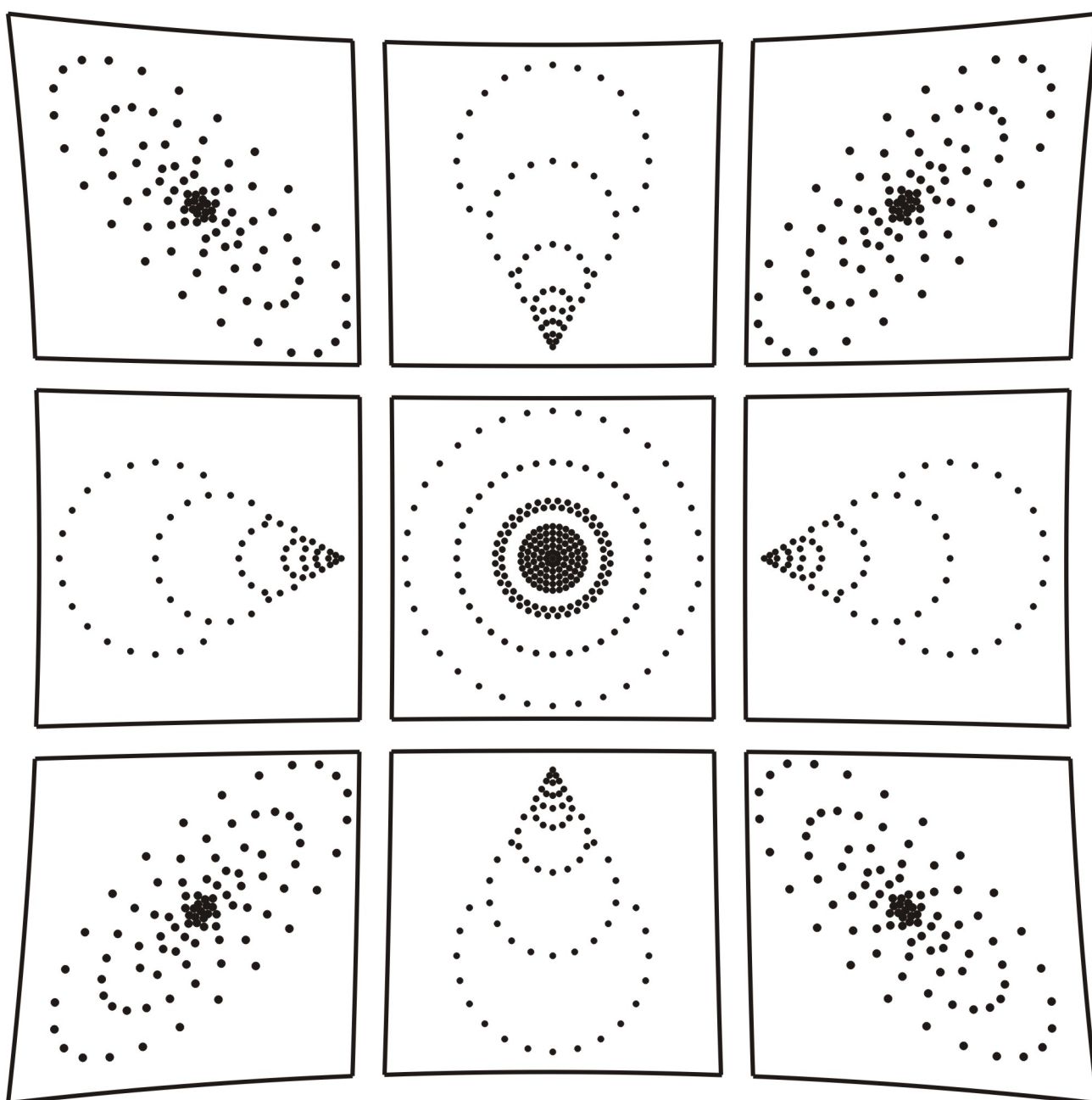


А.В. Бахолдин, Г.Э. Романова, Г.И. Цуканова

# ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Часть I



г. Санкт-Петербург  
2011 г.



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**А.В. Бахолдин, Г.Э. Романова, Г.И. Цуканова**

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Часть I**

**Учебное пособие**

**под редакцией проф. А.А. Шехонина**



**Санкт-Петербург**

**2011**

А.В. Бахолдин, Г.Э. Романова, Г.И. Цуканова Теория и методы проектирования оптических систем. Учебное пособие под редакцией проф. А.А. Шехонина – СПб: СПб НИУ ИТМО, 2011. – 104 с.

Учебное пособие охватывает обязательные разделы курсов «Теория и методы проектирования оптических систем», «Специальные разделы прикладной оптики», «Функциональное проектирование оптических систем». Пособие содержит теоретические сведения об организации и основных этапах схемного проектирования оптических систем, подробно рассмотрен этап синтеза изображающих систем.

Для студентов направления подготовки 200400 «Оптотехника», специальности 200203 «Оптико-электронные приборы и системы» и 200401 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения».

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оплотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 200400 «Оптотехника», направлению подготовки дипломированных специалистов 200203 «Оптико-электронные приборы и системы» и 200401 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения».



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2011

© А.В. Бахолдин, Г.Э. Романова, Г.И. Цуканова 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	4
1.1. Процесс проектирования оптических систем и элементов	4
1.2. Система автоматизированного проектирования оптических систем	7
1.3. Техническое задание на проектирование оптической системы	11
1.4. Оформление результатов проектирования. Техническая документация	14
2. СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	24
2.1. Требования, предъявляемые к оптическим системам	24
2.2. Выбор типа оптической системы и габаритный расчёт	32
2.3. Энергетический расчёт	39
2.4. Выбор aberrаций, подлежащих исправлению	46
2.5. Выбор конструкций компонентов и оптических материалов	47
2.6. Алгебраический метод получения стартовой системы	51
2.7. Предварительный расчёт из тонких линз. Введение толщин	65
2.8. Создание стартовой системы с использованием особых свойств поверхностей и линз	67
2.9. Метод проб	97
ЛИТЕРАТУРА	99

# Глава 1. Проектирование оптических систем

## 1.1. Процесс проектирования оптических систем и элементов

Проектирование (от лат. *projectus*, буквально – брошенный вперед) – процесс создания проекта, прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта, состояния.

Проектированием в технике называется разработка проектной, конструкторской и другой технической документации, предназначенной для создания новых видов и образцов продукции промышленности [1].

Современный оптический прибор (ОП) является сложной системой, состоящей из оптических, механических, электронных, телевизионных, волоконных и других звеньев. Различия в физических принципах работы звеньев ОП, в способах обработки сигналов, проходящих через них, а также разнообразие требований и условий эксплуатации ОП обуславливают сложность и многоступенчатость процесса проектирования этих приборов. Для создания ОП, отвечающих поставленным требованиям, необходим тщательный анализ как уровня теории и методов проектирования ОП, так и состояния имеющейся в распоряжении разработчика элементной базы.

Разработка сложных систем, какими являются ОП, проводится в определенной последовательности [2].

Отправной точкой создания любой системы являются выбор и формулировка цели проектирования. Необходимость создания нового изделия определяется как развитием конкретного направления техники, так и запросами потребителей (научных и производственных учреждений, человека-оператора и др.). Это требует предварительного анализа потребностей общества и уровня развития науки и техники, в особенности таких отраслей, как оптика, электроника, вычислительная техника, точная механика. При этом главная трудность состоит в том, что разработчик на основании анализа современных данных должен прогнозировать развитие систем, созданием которых он занимается.

Обоснование исходных данных требует учета назначения системы, основных видов ее взаимодействия с другими системами или подсистемами, если она является подсистемой, входящей в состав другой более крупной системы, влияния внешних факторов.

Обоснование исходных данных – весьма ответственный этап, и поэтому его целесообразно вести совместными усилиями разработчиков, заказчиков и потребителей проектируемой системы.

Результатом проделанной работы является техническое задание (ТЗ) на прибор, после утверждения которого, можно переходить к, собственно, проектированию.

Различают следующие основные уровни проектирования: информационно-логический, системотехнический, схемотехнический, конструкторский и технологический. Первые три уровня иногда объединяют в единый функциональный, или схемный уровень проектирования (рис. 1.1).



*Рис. 1.1. Этапы функционального проектирования*

В процессе проектирования на информационно-логическом уровне определяется конкретная структура данного прибора, определяются связи функциональных устройств между собой и устанавливаются требования технических заданий на проектирование отдельных функциональных устройств (ФУ), исходя из требований технического задания на прибор в целом. Техническое задание на проектирование того или иного устройства содержит требования к сигналам, информации и командам, вырабатываемым этим устройством.

Таким образом, проектирование на этом уровне состоит из определения сначала структуры проектируемого объекта, а затем в определении оптимальных значений параметров этой структуры, т.е. составляющих ее элементов.

На следующем уровне функционального проектирования – системотехническом – производится проектирование отдельных функциональных устройств, т.е. процесс разбивается на отдельные ветви.

Каждое из функциональных устройств рассматривается здесь как структура, состоящая из взаимосвязанных функциональных блоков. Процесс проектирования заключается в определении оптимального состава и параметров блоков, например, изображающего, который может включать оптическую систему, приемник излучения, электронный тракт, системы развертки и отображения.

Все эти отдельные блоки рассматриваются на этом уровне как преобразователи сигналов, безотносительно к их внутреннему устройству. Здесь определяются требования к преобразованию сигналов тем или иным блоком, т.е. к его передаточным характеристикам.

На следующем уровне, который называется схмотехническим, производится проектирование отдельных блоков, входящих в состав функциональных устройств, в соответствии с техническими заданиями, определенными на предыдущем уровне.

Каждому блоку соответствует своя ветвь, причем, начиная с этого уровня, различные ветви имеют различную «специализацию» в соответствии с физической природой блоков, игнорируемой на предыдущем уровне.

Схмотехнический уровень является важнейшим при функциональном проектировании. В настоящее время он занимает наибольший объем работы и именно на этом уровне определяются основные параметры различных схем прибора, в конечном итоге обеспечивающие правильную работу прибора в соответствии с техническим заданием. Например, на этом уровне выделяется оптическая ветвь и производится проектирование оптической системы прибора.

Исходными данными являются требования к оптической системе как к преобразователю сигнала, полученные на предыдущем, системотехническом, уровне проектирования. Сюда входят требования к различным характеристикам, описывающим качество изображения, например, к размерам и форме пятна рассеяния (изображения точки) или передаточным функциям оптической системы. К ним также относятся требования к светосиле оптической системы и ее увеличению. Должны быть заданы также геометрические параметры – размеры, показывающие расположение поверхностей предмета и изображения, размеры поля предмета и изображения, а также спектральный интервал длин волн. Кроме этого задаются различного рода ограничения, например, габаритные, по используемым материалам и т.п.

Целью проектирования оптической системы на этом уровне является определение как ее структуры, т.е. количества входящих в нее элементов и их типов, так и численных значений параметров этих элементов.



Большинство оптических систем являются «центрированными». С точки зрения разработчика на схемотехническом уровне такая оптическая система использует в качестве функциональных элементов оптические среды и оптические поверхности. Она полностью описывается такими параметрами, как радиусы кривизны поверхностей (при необходимости — коэффициенты асферики), осевые расстояния между поверхностями, показатели преломления или марки оптических материалов, из которых состоят среды, разделяющие эти поверхности, световые диаметры. Результатом проектирования является оптическая схема («оптический выпуск»), содержащая численные значения и допускаемые отклонения указанных параметров.

Аналогично проектируются электронная и механическая ветви ОП.

Таким образом, в процессе схемотехнического проектирования разработчик определяет элементную базу будущего прибора.

Как показывает практика, очень часто проектирование новых элементов на этом уровне не требуется, и работа сводится к подбору элементов из имеющихся стандартных или покупных.

Рассмотренные уровни функционального проектирования являются типичными для оптического прибора средней сложности. В более простых случаях некоторые уровни могут исключаться, например, информационно-логический или системотехнический [3].

## **1.2. Система автоматизированного проектирования оптических систем**

Системы автоматизированного проектирования (САПР) широко используются в оптическом приборостроении [4]. Объясняется это тем, что применение ОП в различных отраслях народного хозяйства, а также ускорение темпов развития науки и техники, привело к значительному повышению требований к разрабатываемым ОП и усложнению их конструкции, что в свою очередь, вызвало увеличение сложности и сроков проектирования.

Применение САПР позволяет сократить сроки и снизить стоимость разработки ОП за счет того, что при использовании этой системы можно:

- проанализировать большое число различных схемных и конструктивных решений за короткий интервал времени, что не может сделать ни один проектировщик обычными методами;
- использовать более точные математические методы для расчета и проектирования ОП;
- создавать конструкции, оптимально отвечающие предъявляемым к ним техническим требованиям;

- повышать качество конструкторской и технологической документации создаваемых ОП.

Структура САПР ОП [5] определяется рядом требований, главными из которых являются универсальность системы и удобство средств, предъявляемых пользователю. Универсальность системы предполагает обеспечение таких возможностей, как взаимодействие пользователя с ЭВМ в автоматическом режиме, перестраиваемость и расширение системы для решения новых задач, одновременное ведение нескольких проектов. Пользователь системы, не являясь программистом, должен выполнять проектирование естественным для него способом, не вникая в структуру и механизм большинства сложных программ, которые вызываются его действиями. Кроме того, важным фактором является совместимость ручного, автоматизированного и автоматического режимов проектирования.

Следует, указать, что характер решаемых при проектировании ОП задач позволяет использовать для создания САПР ОП универсальные вычислительные комплексы в сочетании с широкой номенклатурой внешних устройств, обеспечивающих автоматизацию различных проектно-конструкторских работ.

Любая САПР включает комплекс средств, обеспечивающих ее нормальное функционирование.

В процессе проектирования выполняется множество различных действий, которые можно сгруппировать в некоторые блоки, называемые, по мере возрастания укрупнённости, проектными операциями, процедурами и задачами.

Из всего процесса проектирования можно вычлнить отдельные процедуры, различающиеся по своим свойствам, и объединить эти процедуры в три типовые задачи проектирования, решаемые на любом уровне и ветви, а именно, задачи синтеза, анализа и оптимизации [6]. Процесс проектирования собственно и состоит в определенной последовательности решения этих основных задач (рис.1.2).

Специфической особенностью САПР является то, что промежуточные решения могут быть представлены в виде математических моделей объектов и элементов. Модели хранятся в запоминающих устройствах САПР. В них отражены соответствующие свойства объекта, существенные для данного этапа проектирования. Количественным выражением этих свойств являются параметры, которые делятся на внутренние и внешние. Для оптической системы, например, внешними параметрами являются увеличение, светосила, показатели качества изображения; внутренними параметрами – фокусные расстояния и относительные отверстия элементов, показатели преломления оптических материалов, осевые

расстояния, диаметры и радиусы линз. Следует также учитывать внешние условия – температуру окружающей среды, давление, влажность и др.

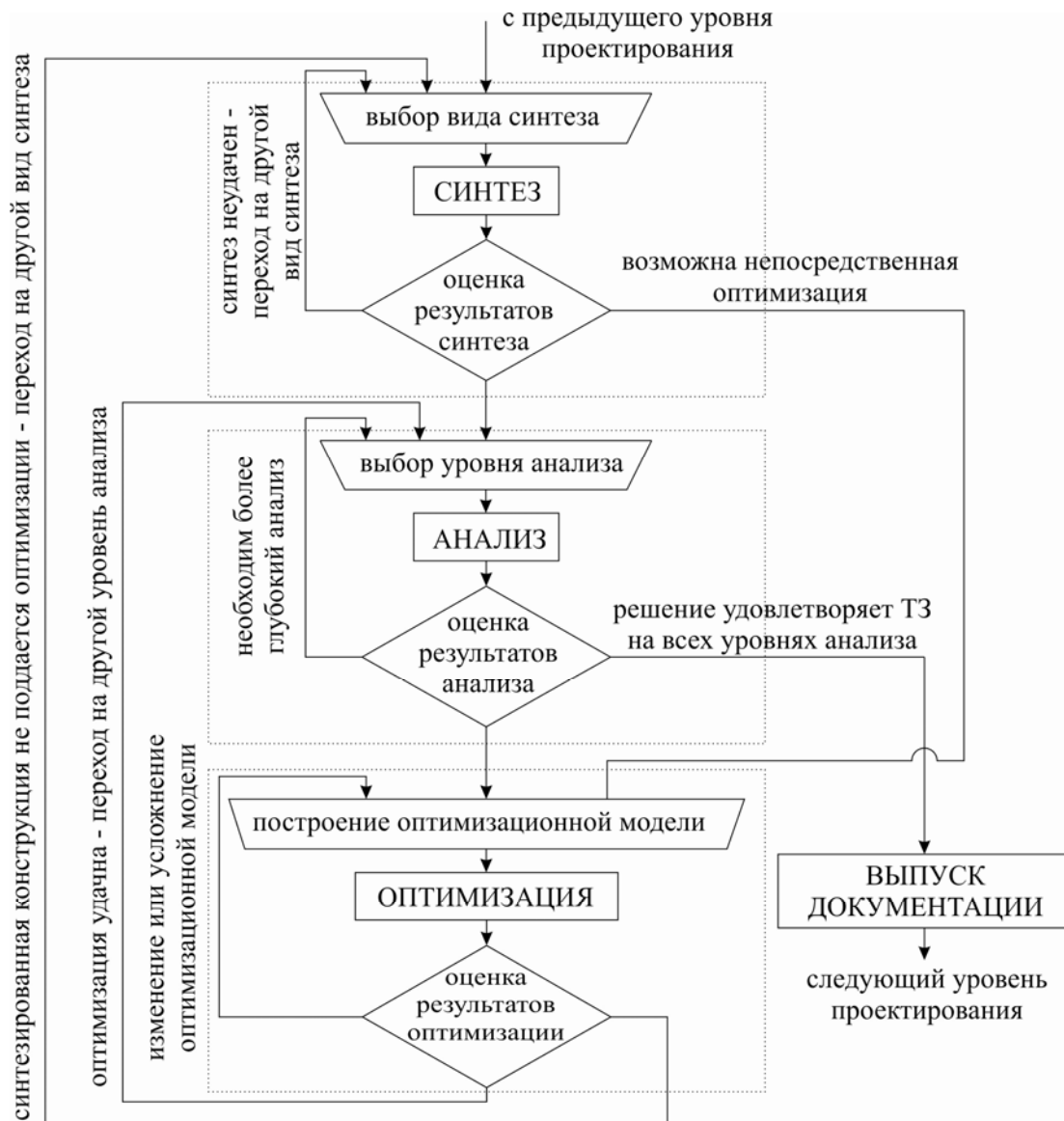


Рис. 1.2. Схема алгоритма процесса автоматизированного проектирования оптических систем

Синтез – (от греч. συν – с, вместе и θέση – положение, место) – соединение (мысленное или реальное) различных элементов объекта в единое целое (систему) [1]. Сущность синтеза заключается в первоначальном создании объекта проектирования по техническому заданию (на данном уровне данной ветви), т.е. определения неизвестных ранее параметров по заданным характеристикам.

Синтез обычно рассматривается как вполне реализуемая задача, но дающая только начальное, приближенное решение. Это решение, т.е. набор значений параметров, может являться крайне приближенным, если оно не удовлетворяет большинству требований технического задания.

Окончательное решение получается путем сложного итерационного процесса, включающего анализ, оптимизацию и возврат к синтезу.

Решение, полученное в результате синтеза, называют также стартовой точкой для дальнейшего преобразования, а именно для оптимизации.

Анализ (от греч.  $\alpha\nu\alpha\lambda\upsilon\zeta$  – разложение, расчленение) – разложение (мысленное или реальное) объекта на элементы [1].

Решение задач анализа позволяет определить свойства объекта с выбранной структурой и параметрами. Если при синтезе создаются, то при анализе оцениваются проектные решения объектов. Характерной особенностью анализа является наличие нескольких уровней, отличающихся глубиной и полнотой анализа и его трудоемкостью. На начальных, наиболее поверхностных уровнях анализа определяется небольшое количество основных характеристик при минимальных затратах вычислений. На следующих, более глубоких уровнях анализируется все большее число характеристик, требующих все возрастающего объема вычислений, причем трудоемкость различных уровней анализа может отличаться в десятки и сотни раз. Так, например, при анализе оптических систем начальный уровень относится к определению так называемых параксиальных характеристик, таких как фокусное расстояние, увеличение, положение изображения и характеризуется малой трудоемкостью. Следующий уровень заключается в расчете хода реальных лучей и вычислении их аберраций, на что требуется в десятки раз больше времени. Вслед за этим обычно идет уровень определения передаточных характеристик, оценивающих качество оптического изображения – импульсной реакции (функции рассеяния точки), оптической передаточной функции. Трудоемкость этого уровня выше предыдущего. Затем идет уровень математического моделирования формирования изображений каких-либо объектов, которое обычно еще более трудоемко.

Разделение анализа на уровни имеет большой смысл для экономии ресурсов компьютера, времени и исключения ненужных затрат. В самом деле, если проектное решение не удовлетворяет техническому заданию по основным характеристикам, определяемым на начальных уровнях анализа, нет необходимости тратить ресурсы компьютера и разработчика для проведения трудоемких вычислений на последующих уровнях.

Оптимизация (от лат. *optimum* - наилучшее) – процесс поиска наилучшего варианта решения задачи при данных условиях и ресурсах, процесс приведения системы в наилучшее (оптимальное) состояние [1]. Он заключается в постепенном изменении параметров с целью улучшения качества проектов, т.е. достижения оптимальных значений характеристик.

Оптимизация не может начинаться «от нуля», от пустого места; для нее необходимо начальное приближение, стартовая точка, т.е. предварительно синтезированная структура с некоторыми приближенными, начальными значениями параметров. По завершении оптимизации мы получаем окончательные значения параметров, обеспечивающие лучшие, оптимальные значения характеристик ОП. Из сказанного видно, что при параметрической оптимизации не изменяется структура проектируемого объекта, а лишь значения параметров этой структуры.

Сложность оптимизации состоит в том, чтобы найти правильную закономерность одновременного изменения большого количества параметров, или, говоря другими словами, найти нужную «траекторию движения» в пространстве параметров. Для решения этой проблемы привлекается довольно сложный математический аппарат. Благодаря достижениям математиков и программистов оптимизация превратилась в мощнейший инструмент проектирования, без которого разработка современных ОП была бы невозможной. Именно оптимизация позволяет, стартуя от приближенного начального проектного решения, получить в результате за весьма сжатое время проект, удовлетворяющий самым трудно сочетаемым требованиям. С помощью современных методов и программ оптимизации часто даже начинающий разработчик может сравнительно быстро получить решение, которое ранее было доступно только опытным расчётчикам.

### **1.3. Техническое задание на проектирование оптической системы**

Последовательность разработки и изготовления промышленных изделий в настоящее время регламентируется группой государственных стандартов, входящих в Единую Систему Конструкторской Документации (ЕСКД). ЕСКД устанавливает единый порядок разработки, выполнения, оформления, согласования, внесения изменений, учета и хранения конструкторской документации. В мировой практике существуют и другие региональные системы стандартов.

В соответствии с ГОСТ 2.103-68 проектирование ОП можно представить в виде последовательности этапов, в процессе которых разрабатывают техническое задание (ТЗ), техническое предложение, эскизный и технический проекты, рабочую документацию.

Проектирование любого промышленного изделия, в том числе и ОП, ведется на основании технического задания (ТЗ).

ТЗ – это документ, который устанавливает назначение и область применения, технические, качественные и технико-экономические требования, а также определяет необходимые стадии разработки конструкторской документации и её состав.

Составляется ТЗ организацией-заказчиком при возможном участии организации-разработчика с привлечением других заинтересованных организаций. После утверждения и согласования ТЗ принимается к выполнению.

ТЗ на проектирование ОП обычно состоит из нескольких разделов. Вводная часть ТЗ содержит основание для проведения разработки. В следующем разделе указываются назначение и область применения изделия. Далее излагаются технические требования, предъявляемые к изделию. Типовое ТЗ на оптические приборы включает следующие разделы:

1. Общие сведения (состояние вопроса, цели и основания разработки).
2. Определение, назначение и область применения оптических приборов.
3. Технические (функциональные) характеристики: обобщенное разрешение (точность, пространственное разрешение, энергетическое разрешение), поле зрения или диапазон измерения, спектральный диапазон, производительность и другие в зависимости от типа прибора.
4. Структура и взаимосвязь основных функциональных устройств, типы устройств, не разрабатываемые при проектировании (приемники, источники, телевизионные трубки, ЭОПы и другие).
5. Желательные габаритные размеры и масса.
6. Условия эксплуатации, ремонтпригодность, устойчивость к воздействию окружающей среды, помехам и другие.
7. Требования к стандартизации, унификации.
8. Экологические требования, требования безопасности и эргономики.
9. Условия транспортировки и хранения.
10. Требования патентной чистоты, конкурентоспособности и другие.

ТЗ, по сути, является перечислением данных для задачи проектирования. Удобно для структурирования в ТЗ информации об оптической системе пользоваться, например, следующим шаблоном [7]:

**Основные системные параметры:**

Расстояние до объекта (тип предмета)	.....
Расстояние до изображения (тип изображения)	.....
Фокусное расстояние $f'$	.....
Линейное увеличение $\beta$ (для проекционных систем)	.....
Относительное отверстие $D / f'$ (или числовая апертура $A$ )	.....
Диаметр входного зрачка $D$	.....
Поле оптической системы в пространстве предметов $2y$ ( $2\omega$ )	.....
Поле оптической системы в пространстве изображений $2y'$ ( $2\omega'$ )	.....
Спектральный диапазон	.....
Основная длина волны	.....
Диапазон изменения увеличения (фокусного расстояния)	.....

Размер и форма поверхности изображения	.....
<b>Габаритные характеристики:</b>	
Расстояние от предмета до изображения	.....
Положение и размер входного ( $D$ ) и выходного зрачков ( $D'$ )	.....
Задний фокальный отрезок ( $s'_{F'}$ )	.....
Максимальный диаметр	.....
Максимальная длина	.....
Вес	.....
<b>Конструктивные элементы:</b>	
Количество элементов	.....
Используемые материалы (стёкла, кристаллы, пластмассы, ...)	.....
Преломляющие / отражающие поверхности	.....
Асферические поверхности	.....
Дифракционные поверхности	.....
Покрытия	.....
<b>Оптическое преобразование:</b>	
Пропускание	.....
Относительная освещённость (виньетирование)	.....
Размеры пятен рассеяния	.....
ЧКХ	.....
Кривизна поверхности изображения	.....
Дисторсия и искажения форм	.....
<b>Воздействие окружающей среды:</b>	
Температурный диапазон работы	.....
Температурный диапазон хранения / транспортировки	.....
Устойчивость к вибрациям	.....
Устойчивость к ударам	.....
Влагоустойчивость,	.....
Устойчивость к конденсату	.....
<b>Приёмник:</b>	
Тип приёмника	.....
Размеры приёмной площадки (диагональ)	.....
Количество пикселей (горизонталь / вертикаль)	.....
Размер пикселя (горизонталь / вертикаль)	.....
Частота Найквиста	.....
Спектральная чувствительность приёмника	.....
<b>Источник излучения:</b>	
Тип источника	.....
Поток излучения ( $\Phi_e$ , Вт)	.....
Размер светящегося тела	.....
Индикатриса излучения	.....
Метод освещения предмета	.....

Рассеяние	.....
Бленды и защита от засветок	.....
<b>План выпуска и стоимость:</b>	
Необходимое количество систем	.....
Дата начала выпуска	.....
Стоимость разработки	.....

Представленный шаблон в процессе разработки ТЗ может быть сокращён, или дополнен для конкретного прибора. Но он даёт достаточно полное представление об оптической системе и тех требованиях, которые к ней могут предъявляться, и должны быть обеспечены в процессе проектирования. На основе описания оптической системы и в соответствии с ТЗ происходит выбор начальной схемы, по которой она будет рассчитываться.

В ТЗ включаются также разделы, в которых излагаются требования по охране труда, технической эстетике, технологичности, отражаются технико-экономические показатели, специальные требования, учитывающие специфику построения, применения и изготовления прибора.

В процессе выполнения разработки техническое задание может уточняться по взаимному согласованию заинтересованных сторон в случаях, если будет доказана необоснованность каких-либо требований, показана принципиальная невозможность обеспечения некоторых свойств и т.п.

#### **1.4. Оформление результатов проектирования. Техническая документация**

Если ТЗ является перечислением условий для задачи разработки, в частности, для этапа функционального проектирования, то результаты проектирования должны быть оформлены в виде технической документации (проекта).

К технической документации, выполняемой по результатам функционального проектирования оптической системы прибора, относятся в первую очередь: пояснительная записка, схема оптическая принципиальная, оптический выпуск и чертежи на оптические детали.

Пояснительная записка содержит описание прибора и принципа его действия, а также обоснование принятых при разработке прибора технических и технико-экономических решений. Пояснительная записка (в соответствии с ГОСТ 2.106-96) должна включать следующие разделы:

- введение (с указанием документов, на основании которых выполняется проектирование);
- назначение и область применения прибора;



- технические характеристики прибора;
- описание и обоснование выбранной конструкции;
- расчеты, подтверждающие работоспособность и надежность выбранного конструктивного решения;
- описание организации работ с применением разрабатываемого прибора;
- ожидаемые технико-экономические показатели;
- уровень оценки по показателям стандартизации, унификации, патентной чистоты и т.п.

Указанная структура пояснительной записки применима к любому этапу проектирования. При этом в зависимости от особенностей изделия и характера решаемых на том или ином этапе проектирования задач возможно объединение, исключение или введение новых разделов.

Текст пояснительной записки должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 2.105–95.

Пояснительная записка должна содержать все необходимые расчеты ОП, подтверждающие возможность его реализации. При большом объеме расчетов они могут быть оформлены в виде отдельного документа. При этом в пояснительной записке приводятся только результаты расчетов.

К числу наиболее важных относятся следующие виды расчетов ОП: энергетический (светотехнический); оптической системы (габаритный, абберационный); точности. В зависимости от принципа работы ОП проводят и другие расчеты, часто имеющие принципиальное значение: кинематический, электронного тракта; динамический, надежности, прочности и жесткости, температурных режимов и т.п.

Специфическими конструкторскими документами ОП [8] являются комбинированная функциональная и оптическая принципиальная схемы.

Функциональная комбинированная схема иллюстрирует процессы преобразования сигналов, происходящие в функциональных цепях прибора и в приборе в целом. Эта схема является основным документом, раскрывающим принцип работы прибора. При выполнении функциональных схем ОП руководствуются следующими положениями.

Функциональная схема выполняется без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположение составных частей прибора либо не учитывается вообще, либо учитывается приближенно.

При выполнении функциональной комбинированной схемы могут быть использованы условные обозначения, применяемые при выполнении схем других видов (оптических, кинематических, электрических и т.д.).

Схема должна быть выполнена компактно, но без ущерба для ясности и удобства чтения.

Элементы и узлы схемы, являющиеся отдельными функциональными частями, допускается изображать в виде прямоугольников с указанием вида элемента и его характеристик.

При выполнении схемы необходимо пользоваться условными графическими изображениями, установленными ГОСТами. При отсутствии соответствующего стандартизованного условного обозначения элемент на схеме изображают либо в виде, приближенно соответствующем его конструктивному исполнению, либо в виде прямоугольника, внутри которого написано название элемента.

Условные графические обозначения, стандартизованные или построенные на основе стандартизованных обозначений, на схемах не поясняются. Элементы, составляющие функциональные группы или устройства, на схемах допускается выделять штрихпунктирными линиями, указывая внутри контура наименование или тип группы. Для наглядности допускается изображать элементы схем различных видов, а также отдельные элементы и устройства, не входящие в данный прибор, но необходимые для пояснения принципа его работы.

Технические характеристики элементов или частей схемы следует указывать рядом с графическим обозначением или на свободном поле схемы. На схеме могут быть поясняющие надписи, диаграммы, таблицы, определяющие последовательность процессов во времени.

Механические связи между элементами схемы указываются штриховой линией, электрические и оптические – сплошной. Пример выполнения функциональной комбинированной схемы ОП представлен на рис. 1.3.

Оптические схемы выполняются в соответствии с ГОСТ 2.412–81 в определенном масштабе (рис. 1.4). На схеме показывают все оптические детали прибора, источники света и приемники излучения (условными графическими обозначениями), положение диафрагм, зрачков, фокальных плоскостей или плоскостей изображения предмета. Номера позиций оптических деталей присваивают по ходу луча.

На оптической схеме помещают также основные оптические характеристики прибора; таблицу с указаниями  $\lambda$ ,  $f'$ ,  $s_F$  и  $s'_F$ , – для отдельных сборочных единиц оптической системы (объективов, конденсоров, коллективов и т.п.); наименование, шифр или тип источников света и приемников излучения; таблицу – перечень деталей; таблицу световых диаметров оптических деталей, соответствующих им стрелок прогиба и толщины по оси; для призм указывается длина развертки.





На оптической схеме показывают диаметры диафрагм, размеры зрачков, размеры тела накала и т.п.; воздушные промежутки и другие размеры по оси, определяющие взаимное положение деталей, зрачков, диафрагм и т.п.; размеры, определяющие пределы перемещения или предельные углы поворота оптических деталей и некоторые другие размеры.

При разработке ОП, наряду с рассмотренными, выполняются и другие схемы, если они необходимы.

Для окончательного варианта системы с округленными по ГОСТу радиусами кривизны составляется оптический выпуск, который содержит чертеж оптической системы, ее оптические характеристики, конструктивные параметры, таблицы и графики аберраций. Оптический выпуск может быть оформлен на нескольких страницах. Пример оформления оптического выпуска представлен на рис. 1.5 – 1.7.

В верхней части формата записывают название объектива (рис. 1.5), а затем указывают основные оптические характеристики и особенности системы, приводится основная длина волны и рабочий спектральный диапазон и др.

Затем располагается чертеж оптической системы, выполненный в масштабе. Под чертежом приводятся конструктивные параметры системы: радиусы, осевые расстояния, показатели преломления, коэффициенты дисперсии, марки стекол, или другие оптические материалы, световые и полные диаметры, а также стрелки прогиба поверхностей по световым и полным диаметрам. Если система содержит асферические поверхности, то соответствующие им радиусы при вершине записываются в столбце радиусов, а ниже записывается уравнение профиля или поверхности.

Под конструктивными параметрами системы указываются значения заднего фокусного расстояния, а также переднего и заднего фокальных отрезков.

Для случая предмета, расположенного на конечном расстоянии, например для микрообъектива, проекционного, репродукционного объективов, приводится расстояние от первой поверхности до предмета (передний отрезок) и от последней поверхности до изображения (задний отрезок), а также оптическая длина системы – расстояние между плоскостями предмета и изображения.

Кроме того, указываются положение апертурной диафрагмы, расстояние от первой поверхности до входного зрачка и от последней поверхности до выходного зрачка, а также приводятся диаметры зрачков и апертурной диафрагмы. Иногда дается линейное увеличение в зрачках.

Дополнительно для разъяснения могут быть представлены габаритные чертежи крепления системы, или чертежи отдельных элементов.

Числовые значения остаточных aberrаций оптической системы сводят в таблицы и строят соответствующие графики aberrаций. Сначала приводят в правой верхней части (рис. 1.6) таблицу aberrаций для точки на оси, где указаны сферическая aberrация, условие изопланатизма, сферохроматические разности и хроматизм положения.

Затем следует таблица полевых aberrаций: астигматические отрезки и их разность, кривизна поверхности изображения, дисторсия и хроматизм увеличения. В этой же таблице приводится удаление выходного зрачка при различных наклонах для оценки сферической aberrации в зрачках.

Далее следуют таблицы aberrаций лучей широких наклонных пучков в меридиональном и сагиттальном сечениях. Эти aberrации могут быть даны как для основной длины волны, так и для длин волн, подлежащих ахроматизации.

В отдельных случаях, например при больших относительных отверстиях и угловых полях, приводится таблица aberrаций для внемеридиональных («косых») лучей.

Для высококачественных оптических систем приводят таблицу волновых aberrаций и указывают положение плоскости наилучшей установки, таблицу частотно-контрастных характеристик для разных точек поля.

На основании данных таблиц строят графики aberrаций под соответствующими таблицами. Графики aberrаций для различных точек поля необходимо выполнять в одинаковом масштабе.

В различных оптических системах, обычно допускается виньетирование части наклонного пучка оправами линз или специальными диафрагмами, называемыми виньетирующими. На графиках aberrаций наклонных пучков следует указывать, какая поверхность или диафрагма вызывает виньетирование.

В оптическом выпуске приводится таблица допусков при изготовлении оптических деталей. В таблице приводятся используемые материалы и их оптические постоянные, значения осевых расстояний с допусками, радиусы поверхностей пробных стёкол по ГОСТ, общая и местная ошибки. В случае если какие-либо элементы в процессе работы должны перемещаться, указываются диапазоны изменения осевых расстояний или углов.

Также может быть представлена любая другая информация, поясняющая работу оптической схемы прибора.

# Апохроматический объектив микроскопа 90x1,40 с масляной иммерсией

Длина тубуса 160мм, толщина покрывного стекла 0,17мм

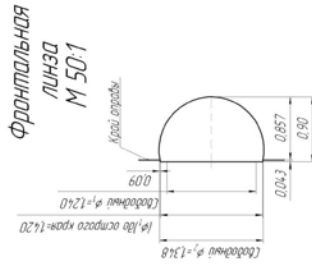
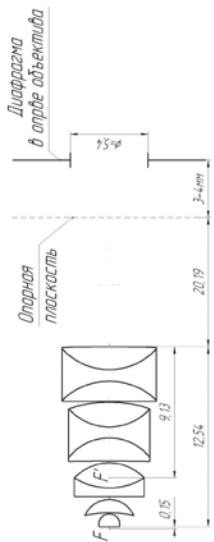


Схема расположения объектива относительно тубуса микроскопа  
 А - верхний срез тубуса.  
 В - плоскость изображения с нею совмещается фокальная плоскость окуляра.  
 С - диафрагма в оправе объектива.  
 D - нижний срез тубуса.  
 E - верхняя поверхность объектива.  
 F - верхняя передняя поверхность объектива.  
 H - верхняя поверхность покрывного стекла (толщина покрывного стекла 0,17мм).  
 g - предмет.

AD=160
Hg=0,17
AB=13,0 BE=16,719
BO=14,70 EF=12,54
Dg=33,0 Fg=0,27
Ag=193,0 Bg=180,0
CO=3-4мм
DE=20,19
FH=0,10

Увеличение ..... -89,6  
 Числовая апертура ..... 1,40  
 Фокусное расстояние ..... 1,97мм

Расстояние верхней поверхности покрывного стекла от первой поверхности объектива ..... -0,097мм  
 Расстояние предмета от первой поверхности объектива ..... -0,267мм  
 Изображения от последней поверхности объектива ..... 167,19мм  
 изображения от предмета ..... 180,00мм

$\Gamma$	$d$	$r$	$n$	$V$	$C$	$\phi$	Стекло по ГОСТ
$\Gamma_1$	0,80		БК4	60,5	$\phi_1$	12,4	0
$\Gamma_2$	0,73				$\phi_2$	12,4	0
$\Gamma_3$	1,41		K5	64,3	$\phi_3$	2,9	-0,14
$\Gamma_4$	1,65				$\phi_4$	3,11	-0,65
$\Gamma_5$	∞		БФ10	16,055	$\phi_5$	3,7	0
$\Gamma_6$	4,57		Фторит	14,3865	$\phi_6$	4,3	0,54
$\Gamma_7$	3,34				$\phi_7$	4,3	-0,78
$\Gamma_8$	94,19		Фторит	14,3865	$\phi_8$	4,4	-0,03
$\Gamma_9$	3,60		/Ф1	15,406	$\phi_9$	4,9	-0,96
$\Gamma_{10}$	3,77		Фторит	14,3865	$\phi_{10}$	4,9	0,90
$\Gamma_{11}$	8,59				$\phi_{11}$	4,9	-0,36
$\Gamma_{12}$	∞		K15	15,337	$\phi_{12}$	5,0	0
$\Gamma_{13}$	4,70		Кдасцы	14,562	$\phi_{13}$	5,2	-0,78
$\Gamma_{14}$	4,45		K14	15,17	$\phi_{14}$	5,2	0,84
$\Gamma_{15}$	94,19				$\phi_{15}$	5,2	-0,04

$\Sigma n^2 d$

Все радиусы, кроме  $r_2$  и  $r_4$ , по ГОСТ 1807-42

№ линз	Фокусное расстояние $f'$	Расстояние фокусов в пространстве от предыдущей поверхности объектива	Расстояние фокусов в пространстве от предыдущей поверхности объектива	Расстояние гл. пт-ли в пространстве
I	+1,38	-0,79	+1,38	+0,59
II	+4,57	-3,80	+4,76	+0,77
III	-7,55	+7,92	-7,55	+0,37
IV	+4,77	-4,01	+4,21	+0,76
V	+8,58	-7,43	+8,63	+1,5
VI	-3,29	+3,52	-3,53	+0,23
VII	+6,31	-5,92	+5,42	+0,39
VIII	+8,81	-7,89	+8,81	+0,92
IX	+4,68	+5,15	-5,14	+0,27
X	+8,30	-8,25	+7,29	+0,05
XI	+10,17	-8,19	+10,64	+1,98
XII	-127,72	+118,86	-140,39	-8,86
XIII	+28,77	-27,40	+27,61	+1,37
XIV	+1,97	-0,15	-9,13	+1,82

Рис.1.5. Пример оптического выпуска. Лист 1

# Апохроматический объектив микроскопа 90x140 с масляной иммерсией

Длина тубуса 160мм, толщина покровного стекла 0,17мм

Точка на оси

Аберрации

Точка вне оси

Предмет на поверхности Петцолья

$10^2 \sigma'$

$n_1 \sin \alpha_1$	$10^2 \sigma'$	$S'$	Точка на оси					Точка вне оси					Предмет на поверхности Петцолья						
			$\Delta S'$	$\eta$	$\zeta$	$10^2 \sigma'$	$\Delta S'$	$F$	$10^2 \sigma'$	$\Delta S'$	$G$	$\Delta S'$	$S_1 - S_2$	$S_1 - S_2$	$S_1 - S_2$	$S_1 - S_2$	$S_1 - S_2$	$S_1 - S_2$	$S_1 - S_2$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-140 \sqrt{1/8}	0,56	66,10	-3,90	-0,01%	0,56	-4,96	0,55	-5,57	-0,28	-1,67	-0,09	0	0	+0,01	-140	-123	4,90	-4,31	10,35
-140 \sqrt{1/4}	0,80	63,60	-6,40	-0,05%	0,81	-7,65	0,79	-8,95	-0,50	-0,69	0	0	+0,05	-140 \sqrt{7/8}	-128	4,80	-3,97	9,51	
-140 \sqrt{3/8}	0,99	62,15	-7,55	-0,08%	1,00	-8,78	0,97	-7,77	0,96	-1,17	+1,01	-0,08	-0,07	-140 \sqrt{3/4}	-128	4,59	-3,84	9,04	
-140 \sqrt{1/2}	1,19	62,94	-7,06	-0,08%	1,15	-8,40	1,12	-7,26	1,11	-0,75	+1,14	+0,14	+0,27	-140 \sqrt{5/8}	-133	4,45	-3,87	8,81	
-140 \sqrt{3/4}	1,25	65,16	-4,84	-0,04%	1,27	-6,17	1,24	-5,54	1,22	-3,20	+0,63	-0,36	+0,32	-140 \sqrt{1/2}	-144	4,39	-3,98	8,73	
-140 \sqrt{7/8}	1,45	66,75	-1,70	+0,07%	1,36	-2,65	1,34	-3,40	1,32	-3,68	-0,75	-1,98	-0,09	-140 \sqrt{3/8}	-160	4,38	-4,16	8,74	
-140	1,74	64,07	-2,193	+0,08%	1,77	-2,315	1,75	-2,450	1,72	-2,4,04	-1,35	-2,11	-0,88	-140 \sqrt{1/4}	-180	4,41	-4,39	8,80	
														0	-2,65	4,50	-5,29	9,00	
														+140 \sqrt{1/8}	-1,79	4,54	-5,81	9,07	
														+140 \sqrt{1/4}	-3,41	4,56	-5,99	9,07	
														+140 \sqrt{3/8}	-3,57	4,56	-6,10	9,07	
														+140 \sqrt{1/2}	-3,70	4,57	-6,24	8,88	
														+140 \sqrt{5/8}	-3,79	4,53	-6,09	8,63	
														+140 \sqrt{3/4}	-3,85	4,45	-5,97	8,24	
														+140 \sqrt{7/8}	-3,91	4,40	-5,82	7,82	
														+140	-4,26	4,89	-6,51	6,97	

Точка вне оси

$S'_{\text{группы}} = 0$

$y_0$	$y_c$	$y_f$	$y'_c$	$y'_f$	$y'_0$	Предмет на поверхности Петцолья			Предмет на плоскости Гюйсса		
						$x'_m$	$x'_s$	$x'_m - x'_s$	$y' - y'_0$	$\theta$ мм	$\theta$ %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,5	0	0	+0,67%	+1,77%	+2,04%	+0,00111	-7,18	-4,31	-2,87	+0,023	+0,52%
9	8,953	9,112	9,998	+1,77%	+2,20%	+0,005245	-28,71	-5,60	-9,99	+0,89	+2,85%

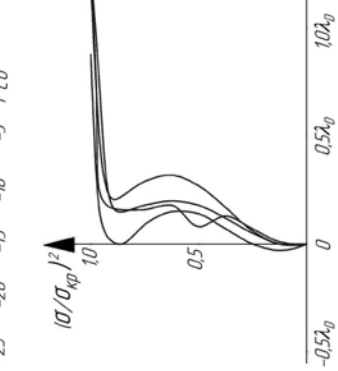
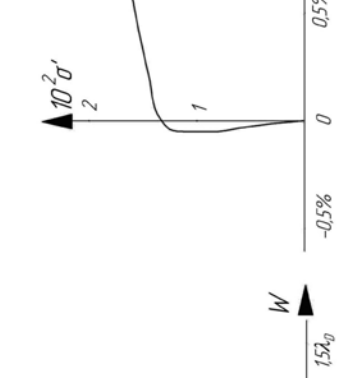
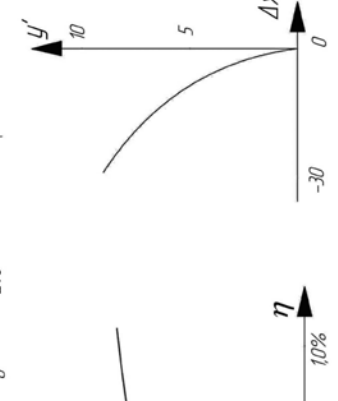
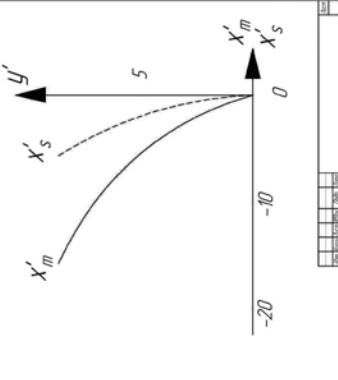
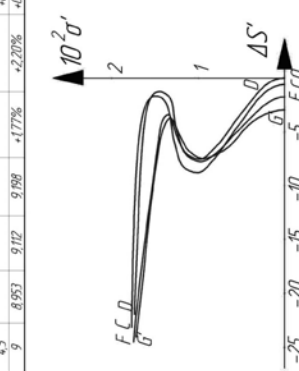
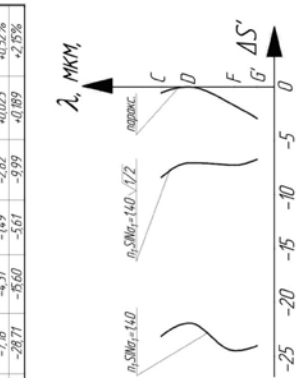
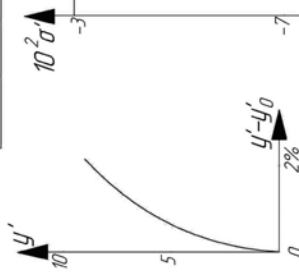
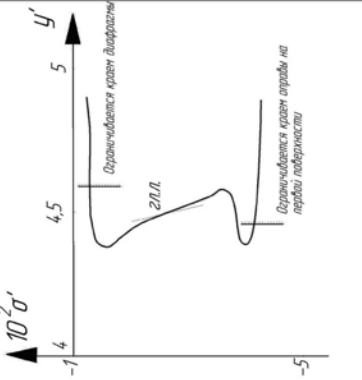


Рис.1.6. Пример оптического выпуска. Лист 2



# Апохроматический объектив микроскопа 90x1,40 с масляной иммерсией

Длина тубуса 160мм, толщина покрывного стекла 0,17мм

## Допуски при изготовлении оптических деталей

№№ линз	Материал		Толщины и воздушные промежутки	Радиусы	Длина радиусов прядных стекол	На обработку под прядное стекло	
	Сорт стекла	Оптические постоянные				Точность поверхности	Местные дефекты
I	BK4	0,00877	$d_1=0,90\pm 0,01$ (толщина пласт)	$r_1=\infty$ плоск. $r_2=-0,73$ вып.	$\pm 7\mu$ ( $\pm 0,1\%$ ) $\pm 0,5\mu$	3 кольца 2 кольца	0,5 полосы
							0,25 полосы
II	K5	0,00795	$d_1=0,92\pm 0,01$ $d_2=0,08$ сн.ниже	$r_3=-7,4$ вогнут. $r_4=-1,85$ вып.	$\pm 7\mu$ ( $\pm 0,1\%$ ) $\pm 2\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	2 кольца 2 кольца	0,25 полосы
							0,25 полосы
III	Б-Ф10	0,01679	$d_1=0,60\pm 0,01$	$r_5=\infty$ плоск. $r_6=4,75$ вогнут.	$\pm 5\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	2 кольца 3 кольца	0,25 полосы
							0,5 полосы
IV	Флюорит	0,00456	$d_1=1,75\pm 0,03$ $d_2=0,14$ сн.ниже	$r_7=4,75$ вып. $r_8=-3,34$ вып.	$\pm 5\mu$ ( $\pm 0,1\%$ ) $\pm 3\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	3 кольца 2 кольца	0,5 полосы
							0,25 полосы
V	Флюорит	0,00456	$d_1=1,60\pm 0,05$ $d_2=0,14$ сн.ниже	$r_9=-94,19$ вогнут. $r_{10}=-3,60$ вып.	$\pm 10\mu$ ( $\pm 0,1\%$ ) $\pm 4\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	2 кольца 3 кольца	0,25 полосы
							0,5 полосы
VI	ЛФ1	0,01145	$d_1=0,75\pm 0,02$	$r_{11}=-3,60$ вогнут. $r_{12}=-3,77$ вогнут.	$\pm 4\mu$ ( $\pm 0,1\%$ ) $\pm 4\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	3 кольца 3 кольца	0,5 полосы
							0,5 полосы
VII	Флюорит	0,00456	$d_1=1,75\pm 0,03$ $d_2=0,05$ сн.ниже	$r_{13}=3,77$ вып. $r_{14}=-8,59$ вып.	$\pm 4\mu$ ( $\pm 0,1\%$ ) $\pm 9\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	3 кольца 2 кольца	0,5 полосы
							0,25 полосы
VIII	K15	0,00964	$d_1=1,40\pm 0,05$	$r_{15}=\infty$ плоск. $r_{16}=-4,70$ вып.	$\pm 5\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	2 кольца 3 кольца	0,25 полосы
							0,5 полосы
IX	Квартц	0,00780	$d_1=0,80\pm 0,05$	$r_{17}=-4,70$ вогнут. $r_{18}=4,45$ вогнут.	$\pm 5\mu$ ( $\pm 0,1\%$ ) $\pm 4\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	3 кольца 3 кольца	0,5 полосы
							0,5 полосы
X	K14	0,00849	$d_1=1,60\pm 0,05$	$r_{19}=4,45$ вып. $r_{20}=-94,19$ вып.	$\pm 4\mu$ ( $\pm 0,1\%$ ) $\pm 10\mu$ ( $\pm 0,1\%$ )	3 кольца 2 кольца	0,5 полосы
							0,25 полосы

Объектив микроскопа 90x1,40 с масляной иммерсией следует изготавливать по специальному перерасчету, произведенному применительно к оптическим постоянным имеющимся на заводе платок стекла и радиусам прядных стекол.

Отклонения радиусов, толщин линз и воздушных промежутков в пределах указанных допусков, а также наличие слоя дельта-эма в склеенных линзах могут в случае необходимости соответствующих отклонений в величинах aberrаций вызвать ухудшение качества изображения, поэтому следует предостерегать возможность изменения при сборке всех воздушных промежутков. Первый и второй воздушные промежутки ( $d_1=0,08$  и  $d_2=0,20$ ) не должны при сборке уменьшаться более, чем  $d_1$  - на 0,01 и  $d_2$  - на 0,04.

## Таблица высот лучей при $d_1=0,90$

№№ лучей	$y=0$			$y=4,5$			$y=9,0$			
	$10^2 \sigma'$	$10^2 \sigma'$	$10^2 \sigma'$	$10^2 \sigma'$	$10^2 \sigma'$	$10^2 \sigma'$	$10^2 \sigma'$	$10^2 \sigma'$	$10^2 \sigma'$	
1	0,620	0,448	0,453	0,324	-0,589	-0,831	0,309	0,210	-0,768	-1,143
2	0,718	0,730	0,730	0,721	-0,729	-0,697	0,723	0,689	-0,703	-0,666
3	14,29	12,71	13,62	1,84	1,387	-1,434	1,447	1,296	-1,506	-1,444
4	15,55	14,47	15,15	1,387	-1,434	-1,572	1,447	1,296	-1,506	-1,444
5	18,35	16,76	18,10	1,620	-1,699	-1,828	1,740	1,447	-1,705	-1,776
6	2,008	1,829	2,001	1,786	-1,836	-1,982	1,944	1,521	-1,828	-1,904
7	2,138	1,996	2,142	1,976	-1,989	-2,109	2,110	1,693	-1,973	-2,035
8	2,153	2,023	2,196	2,026	-1,994	-2,110	2,193	1,914	-1,960	-2,015
9	2,187	2,054	2,238	2,077	-2,006	-2,117	2,253	1,985	-1,955	-2,005
10	2,365	2,213	2,480	2,288	-2,188	-2,239	2,560	2,059	-2,032	-2,076
11	2,448	2,314	2,553	2,397	-2,270	-2,322	2,633	2,314	-2,215	-2,154
12	2,484	2,344	2,515	2,442	-2,227	-2,341	2,712	2,432	-2,222	-2,160
13	2,522	2,385	2,663	2,434	-2,254	-2,367	2,767	2,493	-2,156	-2,170
14	2,594	2,441	2,801	2,609	-2,265	-2,378	2,995	2,732	-2,117	-2,142
15	2,583	2,440	2,811	2,622	-2,248	-2,350	3,011	2,754	-2,084	-2,108

Рис.1.7. Пример оптического выпуска. Лист 3

## Глава 2. Синтез оптических систем

Основным элементом оптического прибора является оптическая система. Её разработка – важная задача для математических, физических и технических исследований. Возрастающие требования к качеству изображения, новые области применения ставят перед синтезом оптических систем новые проблемы.

Для оптической системы, функция которой создавать изображение, синтез охватывает общий процесс от формулирования требований к оптической системе до получения конструктивных параметров системы. Схема синтеза оптических систем приведена на рис. 2.1[9].

В связи с развитием науки и техники постоянно меняются требования к оптическим системам, поэтому проведение научно-исследовательских работ в области синтеза оптических систем совершенно необходимо. Несмотря на высокую степень автоматизации это сложный творческий процесс с множеством трудоёмких вычислений.

### 2.1. Требования, предъявляемые к оптическим системам

Первый этап содержит требования к оптическим системам. Можно выделить несколько групп требований, которые являются общими для всех оптических систем:

- требования к оптическим характеристикам,
- требования к габаритам системы, т.е. к её внешним размерам и форме,
- требования к качеству изображения,
- требования к интенсивности изображения (световой поток, сила света),
- требования, относящиеся к условиям эксплуатации оптического прибора (теплостойкость, морозоустойчивость, допустимые вибрации и ударные нагрузки, радиационные воздействия, атмосферное давление и т.д.).

#### *Требования к оптическим характеристикам*

Оптические характеристики зависят от типа оптической системы. В зависимости от положения предмета и изображения все оптические системы делятся на четыре типа:

1. телескопические системы (предмет в бесконечности, изображение в бесконечности) – это зрительные трубы, перископы, дальномеры и другие приборы для наблюдения удалённых объектов, работающие с глазом;
2. микроскопы (предмет на конечном расстоянии, изображение в бесконечности) – это лупы, микроскопы и другие системы, в которых предмет находится вблизи оптической системы, а приёмником изображения является глаз;

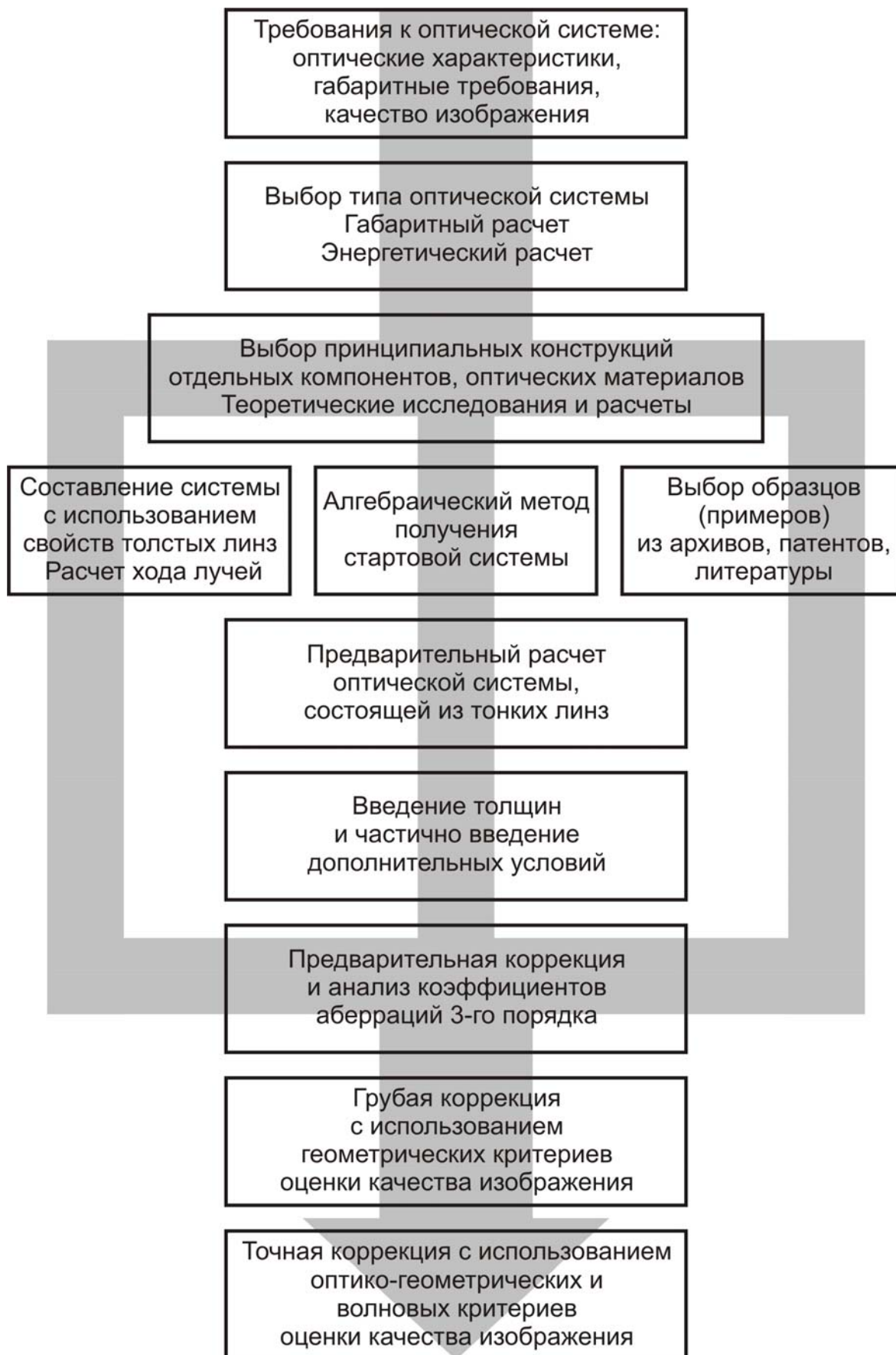


Рис. 2.1. Схематическое представление синтеза оптических систем

3. фотографические системы (предмет в бесконечности, изображение на конечном расстоянии) – это огромный класс объективов оптических систем, которые в большинстве своём рассчитываются для предмета в бесконечности и изображения, расположенного в задней фокальной плоскости;
4. проекционные системы (предмет на конечном расстоянии и изображение на конечном расстоянии) – к этому типу систем относятся также микрообъективы, в которых предмет и изображение на конечном расстоянии, проекционные микроокуляры и другие системы.

Для телескопических систем (дальний предмет – дальнее изображение) (рис.2.2) основные оптические характеристики следующие:  $\Gamma_T$  – видимое увеличение (отношение тангенсов углов, под которыми глаз видит изображение через оптическую систему и предмет без неё);  $D$  – диаметр входного зрачка, или  $D'$  – диаметр выходного зрачка;  $2\omega$  – угловое поле в пространстве предметов, или  $2\omega'$  – угловое поле в пространстве изображений; для которых выполняется соотношение:

$$\Gamma_T = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{D}{D'}, \quad (2.1)$$

$S_p$  – расстояние от первой поверхности до входного зрачка,  $S'_p$  – расстояние от последней поверхности до выходного зрачка.

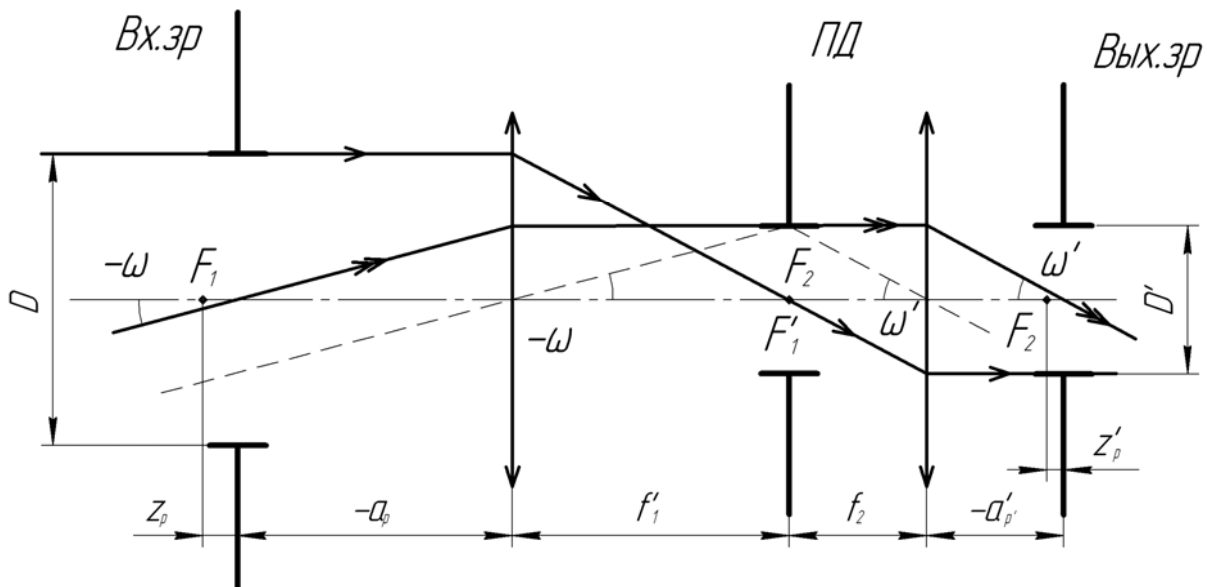


Рис. 2.2. Схема хода лучей в телескопической системе Кеплера

Видимое увеличение  $\Gamma_T$  и диаметр входного зрачка  $D$  телескопической системы не могут быть выбраны произвольно. Необходимо учитывать дифракционную разрешающую способность, зависящую от диаметра входного зрачка  $D$  и разрешающую способность глаза.

Дифракционная разрешающая способность по критерию Релея [10] определяется для случая, когда минимум в изображении одной точки совпадает с максимумом в изображении другой. Тогда угловой предел разрешения равен:

$$\varphi_d = \frac{1,22\lambda}{D}. \quad (2.2)$$

Для светового излучения с длиной волны  $\lambda = 0,55$  мкм и диаметра входного зрачка  $D$  (в мм) угол дифракционной разрешающей способности  $\varphi_d$  (в сек) равен:

$$\varphi_d = \frac{138''}{D}.$$

Для высокоточных приборов применяется более строгий астрономический критерий:

$$\varphi_d = \frac{120''}{D},$$

а для приборов серийного и массового изготовления:

$$\varphi_d = \frac{140''}{D}.$$

Разрешающая способность зрительной трубы, связанная с ограниченной разрешающей способностью глаза, будет зависеть от диаметра выходного зрачка  $D'$ . Диаметр выходного зрачка  $D'$  телескопической системы может принимать значения от 6 мм для биноклей до 1 мм для зрительных труб большого увеличения.

Если приравнять дифракционную и глазную разрешающие способности, тогда получим при  $D' = 6$  мм:

$$\varphi_{зл} = \frac{23''}{\Gamma_T}, \quad \varphi_d = \frac{140''}{D}, \quad \Gamma_T = \frac{D}{6}.$$

При  $D' = 1$  мм:

$$\varphi_{зл} = \frac{140''}{\Gamma_T}, \quad \varphi_d = \frac{140''}{D}, \quad \Gamma_T = D.$$

На практике выполняется соотношение:

$$0,2D \leq \Gamma_T \leq 0,75D.$$

Для систем типа микроскоп (ближний предмет – дальнее изображение) (рис. 2.3) основные оптические характеристики следующие:  $\bar{\Gamma}$  – видимое увеличение,  $A$  – числовая апертура, которая равна  $A = n \sin \sigma$ ,

$2y$  – линейное поле в пространстве предметов. Основные характеристики связаны соотношением:

$$\bar{\Gamma} = \frac{250 \operatorname{tg} \omega'}{y} = \frac{500 A}{D'} \quad (2.3)$$

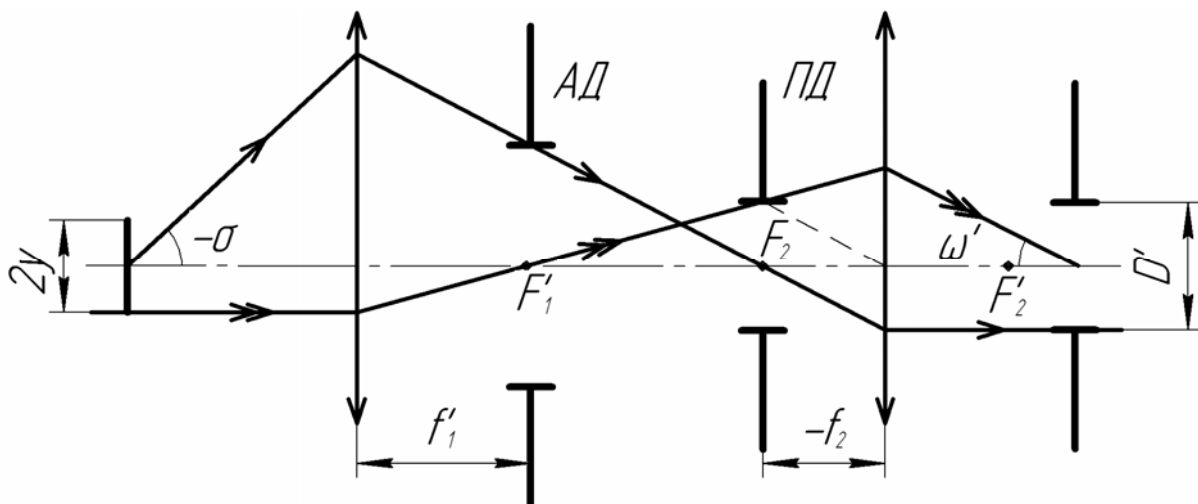


Рис.2.3. Схема хода лучей в схеме микроскопа

Минимальный линейный размер объекта  $\delta$ , который может быть разрешен с помощью светового микроскопа, определяется по формуле Аббе:

$$\delta_d = \frac{\lambda}{2A} \quad (2.4)$$

Видимое увеличение  $\bar{\Gamma}$  и числовая апертура  $A$  микроскопа не могут быть выбраны произвольно из-за ограниченной разрешающей способности глаза. Для видимого диапазона длин волн выполняется условие [10]:

$$\bar{\Gamma} = (500 \div 1000) A.$$

Диаметр выходного зрачка микроскопа, который на практике может принимать значения от 0,5 мм до 1 мм, равен:

$$D' = \frac{500 A}{\bar{\Gamma}} \quad (2.5)$$

Угловое поле в пространстве изображений можно найти по формуле:

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{y \cdot \bar{\Gamma}}{250} \quad (2.6)$$

Для фотографических систем (дальний предмет – ближнее изображение) (рис. 2.4) основные оптические характеристики следующие:  $f'$  – заднее фокусное расстояние,  $2\omega$  – угловое поле в пространстве

предметов,  $D/f' = 1/k$  – относительное отверстие,  $k$  – диафрагменное число. Основные характеристики связаны соотношением:

$$f' = \frac{y'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{D}{2A'}. \quad (2.7)$$

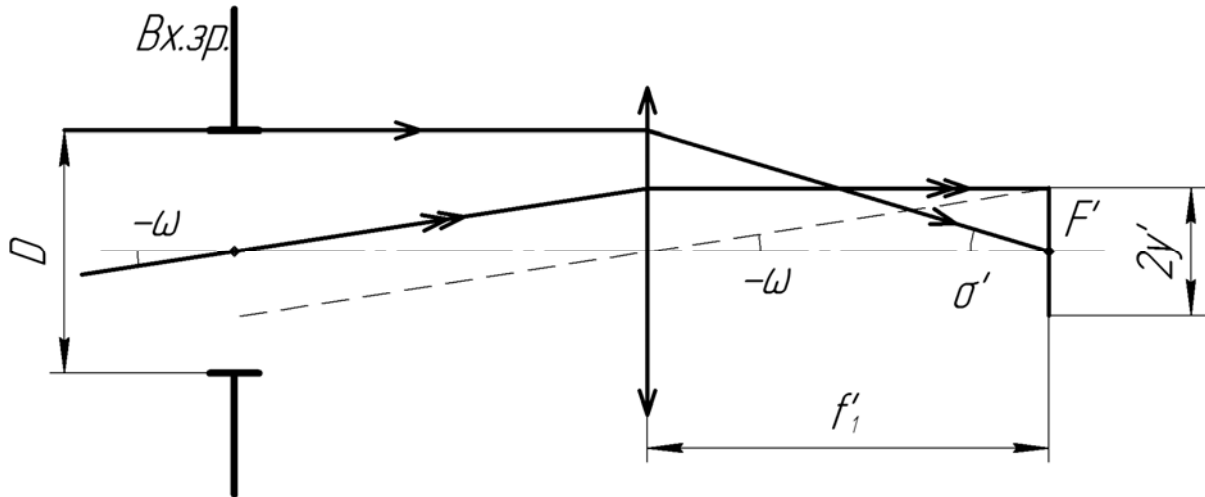


Рис. 2.4. Схема хода лучей в фотообъективе

Диаметр изображения равен:

$$2y' = 2f' \operatorname{tg} \omega. \quad (2.8)$$

Соотношение между фокусным расстоянием  $f'$ , относительным отверстием  $D/f'$  и угловым полем в пространстве предметов  $2\omega$  не может быть произвольным. Для объективов, работающих в видимом диапазоне длин волн  $0,48\text{ мкм} - 0,6438\text{ мкм}$ , проф. Волосовым В.С. на основании анализа большого числа объективов был введён критерий добротности объектива [11]:

$$C = \frac{D}{f'} \operatorname{tg} \omega \sqrt{\frac{f'}{100}} = 0,22 \div 0,26. \quad (2.9)$$

Этим инвариантом обеспечивается физическая осуществимость объектива. Если  $C$  меньше критерия добротности, то система может быть реализована с качеством изображения, необходимым для геометрически ограниченных систем, если  $C$  больше критерия, то качество изображения будет неудовлетворительным. В настоящее время в связи с появлением новых марок стёкол и совершенствования методов расчёта оптических систем этот критерий может быть повышен. Если рабочий спектральный диапазон расширяется, то критерий уменьшается.

Для систем типа проекционных (ближний предмет – ближнее изображение) (рис. 2.5) основные оптические характеристики следующие:  $\beta$  – линейное увеличение оптической системы;  $L$  – длина системы

(расстояние между плоскостями предметов и изображений);  $A = n \sin \sigma$  – числовая апертура в пространстве предметов, или  $A' = n' \sin \sigma'$  – числовая апертура в пространстве изображений:  $2y$  – линейное поле в пространстве предметов, или  $2y'$  – линейное поле в пространстве изображений. Основные характеристики связаны соотношением:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{A}{A'}. \quad (2.10)$$

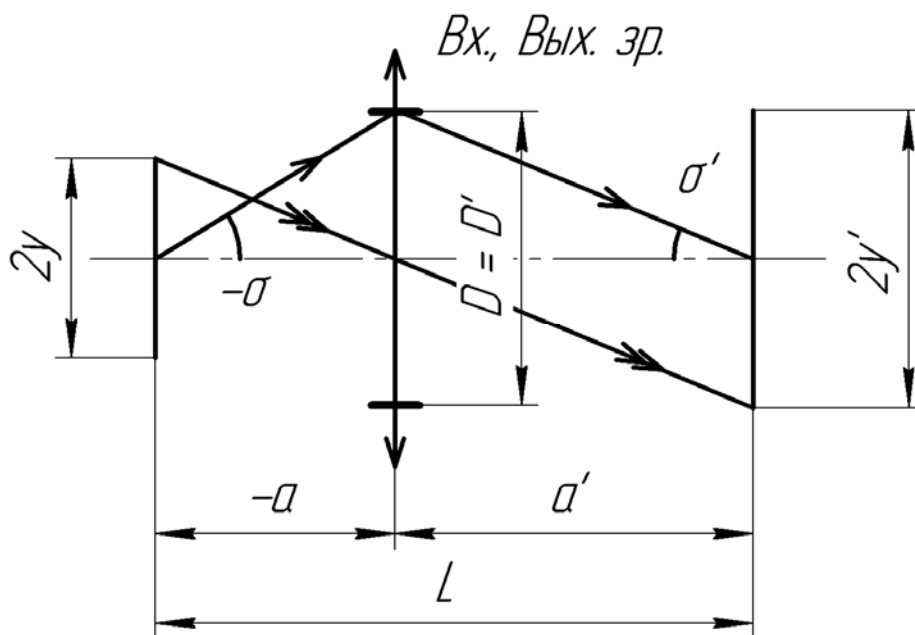


Рис. 2.5. Схема хода лучей в проекционной установке

Требования к качеству изображения ОП весьма разнообразны и зависят от задачи, решаемой с помощью оптической системы. Полного исправления всех aberrаций нельзя получить даже в сколь угодно сложной системе, да этого чаще всего и не требуется. В реальных системах допускаются остаточные aberrации, величины которых определяются назначением системы и приёмником изображения.

В телескопических системах (дальний предмет – дальнейшее изображение), работающих с глазом, хорошее качество изображения должно быть в центре поля, а на краю поля допускается ухудшение качества изображения, т.к. рассматриваемое изображение всегда можно привести в центр поля. Поскольку приёмником изображения является глаз, то допустимые значения aberrаций должны быть меньше или соизмеримы с разрешающей способностью глаза. В таблице 2.1 приведены допустимые значения aberrаций зрительных труб [12]. Приводимые значения получены из многолетних практических наблюдений. Ими удобно пользоваться при оценке допустимого качества систем, работающих с таким приёмником изображения как глаз.



Таблица 2.1.

Наименование aberrаций	Качество изображения		
	удовлетвори- тельное	хорошее	отличное
точка на оси			
<b>Сферическая aberrация</b>			
I. в угловой мере:			
на краю зрачка	< 2'	< 1'	< 20"
на зоне зрачка	< 1'	< 30"	< 10"
II. в диоптрийной мере:			
на краю зрачка	> 0,25	< 0,25	< 0,1
на зоне зрачка	> 0,1	< 0,1	< 0,05
<b>Хроматизм положения, мин.</b>	< 8'	< 6'	< 3'
точка вне оси			
<b>Астигматизм, дптр</b>	8	2	1,5
<b>Кривизна поля, дптр</b>			
в меридиональном сечении	> -6	> -3	> -2
в сагиттальном сечении	< -2	> -1	> -0,1
<b>Дисторсия, %</b>			
для поля < 50°	6	3	2
для поля > 50°	9	5	4
<b>Хроматизм увеличения</b>			
на краю поля, мин	< 8'	< 5'	< 3'

В микроскопах (ближний предмет – дальнее изображение), работающих с глазом, также как и в телескопических системах, допускается ухудшение качества изображения по полю. Из-за малого диаметра выходного зрачка  $D' = (0,5 - 1,0)$  мм допустимые угловые aberrации могут составлять 2'- 4', а волновые aberrации в центре поля не должны превышать  $0,25\lambda$ . Качество изображения в микроскопах во многом зависит от объективов, которые в зависимости от конструкции имеют различное качество изображения. В высокоапертурных объективах волновая aberrация в центре поля не должна превышать  $0,1\lambda$ . В микропроекторных установках используются микрообъективы с исправленной кривизной изображения – планобъективы, в которых волновые aberrации по всему полю не превышают  $0,5\lambda$ .

В фотообъективах (дальний предмет – ближнее изображение) требования к качеству изображения очень разнообразны и во многом зависят от рабочего спектрального диапазона, приёмника изображения и

назначения системы. В качестве требований к качеству изображения могут выступать: разрешающая способность в лин/мм в центре поля и на краю, частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) с указанием частоты и требуемого контраста, в инфракрасных системах может задаваться диаметр кружка рассеяния с заданной концентрацией энергии в нём.

Очень удобной для практических расчётов является приближённая формула, выведенная проф. Волосовым Д.С.[11], которая связывает диаметр кружка рассеяния  $\delta$  и контраст  $T$  на заданной частоте  $\nu$ :

$$\delta = \frac{2}{\pi \nu} \sqrt{2,5(1-T)}. \quad (2.11)$$

Формула справедлива лишь при высоких значениях ЧКХ ( $T \geq 0,5$ ).

В проекционных системах (ближний предмет – ближнее изображение), если они рассчитываются в обратном ходе лучей, требования к качеству изображения приблизительно такие же, что и в фотографических системах.

Качество изображения в плоскости экрана можно оценить по углу, под которым наблюдатель видит кружок рассеяния. Если угол составляет  $1' - 2'$ , то качество изображения можно считать удовлетворительным.

## 2.2. Выбор типа оптической системы и габаритный расчёт

На этом этапе в соответствии с ТЗ осуществляется структурный синтез: выбирается принципиальная оптическая система, устанавливаются типы и расположение призм, зеркал, элементов линзовой оптики и выполняется расчёт в параксиальной области, который называется габаритным расчётом. Габаритный расчёт обеспечивает соблюдение габаритных требований (к длине системы  $L$  и поперечным размерам  $D$ ), предъявляемых к ОП. Если таких требований нет, то и габаритный расчёт не производится. При необходимости выполняется светотехнический расчёт.

В задачу габаритного расчёта входит:

- определение числа компонентов и их взаимное расположение
- определение оптических характеристик компонентов (если система сложная, например, перископ, зрительная труба, микроскоп и др.): фокусных расстояний  $f'$ , угловых  $2\omega$  или линейных полей в пространстве предметов  $2u$  и изображений  $2\omega'$  или  $2u'$ , относительных отверстий  $D/f'$  или передних (задних) апертур  $A(A')$ , положение и диаметры зрачков и диафрагм
- определение типа призм и зеркал, расчёт их размеров и положения в оптической системе.

Задача структурного синтеза является эвристической и выполняется в значительной своей части непосредственно проектировщиком. Синтез принципиально новой, ранее неизвестной оптической системы относится к числу трудных изобретательских задач, выполняемых лишь опытными и талантливыми проектировщиками.

Правильный выбор оптической схемы при разработке оптического прибора имеет решающее значение для успешного решения поставленной задачи. Автоматический расчёт позволяет получить удовлетворительное решение, если в основу расчёта положена удачная стартовая система.

При расчёте может оказаться, что какой-либо компонент (объектив, окуляр) по своим оптическим характеристикам резко отличается от существующих на практике. В этом случае потребуются очень трудоёмкий расчёт или же практическое осуществление схемы может оказаться невозможным.

Для облегчения расчётов сложных оптических систем их разбивают на ряд тонких компонентов. Особенностью тонкого компонента является то, что при переходе от нулевой толщины к реальной абберации изменяются незначительно и толщины не являются коррекционными параметрами.

Системы, которые можно считать состоящими из тонких компонентов, следующие: астрономические и геодезические трубы, визиры, бинокли, микроскопы малого увеличения, перископы, зрительные трубы с оборачивающими системами и др.

Системы, компоненты которых нельзя считать тонкими, следующие: фотообъективы, объективы микроскопов с большой апертурой, широкоугольные телескопические системы. Для таких систем габаритный расчёт имеет второстепенное значение.

Рассмотрим некоторые показательные примеры габаритного расчёта. Полное рассмотрение проблематики невозможно, т.к. слишком большое число примеров нужно было бы анализировать.

### *1. Система из одного компонента, предмет в бесконечности*

Система из одного компонента – это система, состоящая из одной линзы или нескольких тонких линз. Рассмотрим наиболее распространённый вариант, когда предмет находится в бесконечности (рис. 2.4). Длина системы  $L$  в этом случае приблизительно равна фокусному расстоянию:  $L \approx f'$ . Взаимосвязь основных параметров, необходимых для габаритного расчёта, имеет следующий вид:

$$f' = \frac{y'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{D}{2 A'}$$

## 2. Система из одного компонента, предмет на конечном расстоянии

Вариант однокомпонентной оптической системы со зрачками в главных плоскостях показан на рис. 2.6.

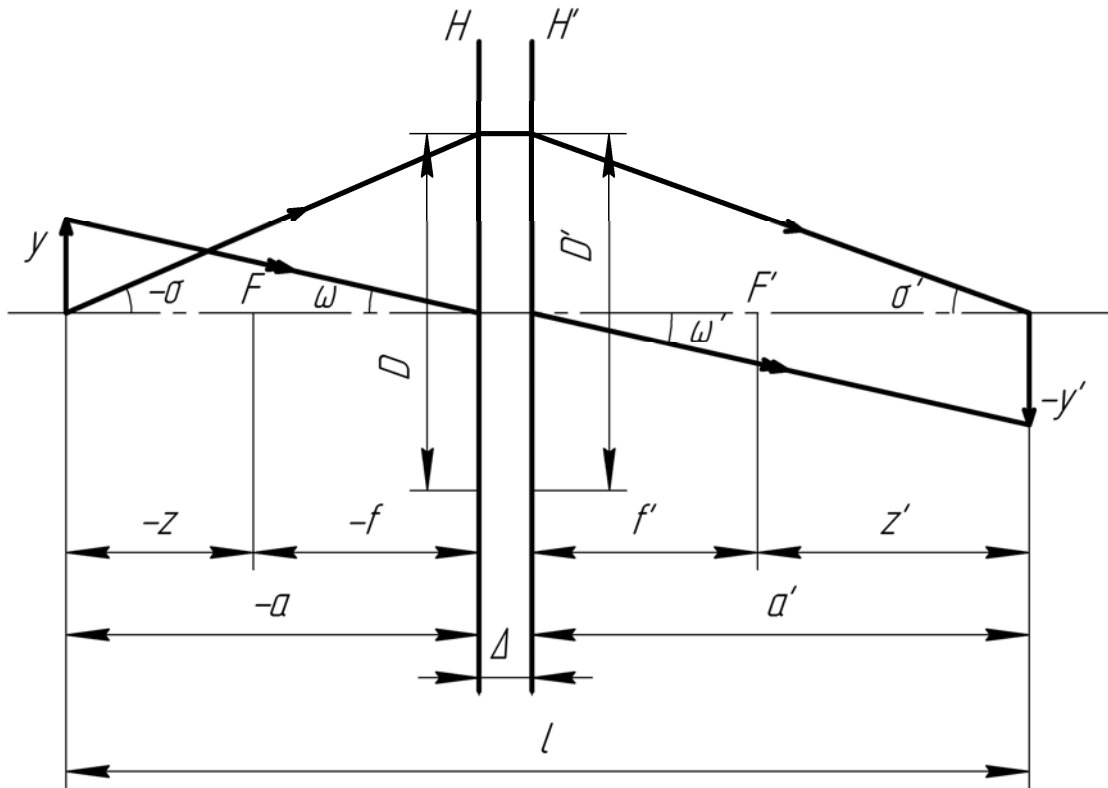


Рис. 2.6. Однокомпонентная оптическая система со зрачками в главных сечениях

Основные формулы для определения линейного увеличения  $\beta$ , а также формулы, связывающие положение предмета и изображения имеют вид:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}, \quad (2.12)$$

$$\beta = \frac{a'}{a} = \frac{f'}{z} = -\frac{f'}{z'}. \quad (2.13)$$

Если зрачки совпадают с главными плоскостями, тогда:

$$\operatorname{tg} \omega = \operatorname{tg} \omega' = -\frac{y}{a} = -\frac{y'}{a'}.$$

Если выполнено условие синусов:

$$\sin \sigma = \frac{D}{2a}, \quad \sin \sigma' = \frac{D'}{2a'}.$$

Оптическая длина системы равна:

$$L = -a + a' + \Delta. \quad (2.14)$$

Если продифференцировать выражение (2.14) для длины системы и приравнять производную нулю, тогда получим:

$$\frac{dL}{d\beta} = f' \left( -1 + \frac{1}{\beta^2} \right) = 0. \quad (2.15)$$

Система будет иметь минимальную длину, равную  $L = \Delta$ , при линейном увеличении  $\beta = 1$  и максимальную длину  $L = 4f' + \Delta$  при  $\beta = -1$ .

### 3. Система из двух компонентов (телескопическая система)

Рассмотрим двухкомпонентную систему, состоящую из двух положительных тонких компонентов, имеющую нулевую оптическую силу (рис.2.2). Это известная система Кеплера. Основные формулы для габаритного расчёта имеют вид:

$$\Gamma_T = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{D}{D'} = -\frac{f_1'}{f_2'}. \quad (2.16)$$

Длина системы:

$$L = f_1' + f_2' \quad (2.17)$$

Расстояние между компонентами:

$$d = f_1' + f_2'. \quad (2.18)$$

Размер полевой диафрагмы:

$$D_{\text{ПД}} = 2 f_1' \cdot \operatorname{tg} \omega = 2 f_2' \cdot \operatorname{tg} \omega'. \quad (2.19)$$

Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

$$z'_{p'} = \frac{z_p}{\Gamma_T^2}, \quad (2.20)$$

где  $z_p$  – расстояние входного зрачка от переднего фокуса объектива.

Удаление выходного зрачка от совмещенных главных плоскостей окуляра  $a'_{p'}$ :

$$a'_{p'} = f_2' + z'_{p'}. \quad (2.21)$$

Удаление входного зрачка от совмещенных главных плоскостей объектива

$$a_p = z_p - f_1' \quad (2.22)$$

Основные характеристики первого компонента:

- фокусное расстояние  $f'_1$ ,
- относительное отверстие  $\frac{D}{f'_1}$ ,
- угловое поле в пространстве предметов  $2\omega$ ,
- положение входного зрачка  $a_{p1}$ .

Основные характеристики второго компонента определяются в обратном ходе лучей:

- фокусное расстояние  $f'_2$ ,
- относительное отверстие  $\frac{D'}{f'_2}$ ,
- угловое поле в пространстве предметов  $2\omega'$ ,
- положение входного зрачка  $a_{p2} = -a'_{p1}$ .

#### 4. Система из двух зеркал

Рассмотрим двухзеркальную систему, представляющую из себя объектив типа Кассегрена (рис. 2.7). Пусть известны: эквивалентное фокусное расстояние  $f'_{экр}$ , коэффициент экранирования по диаметру  $k_{экр}$  и расстояние от вершины главного зеркала до приёмника изображения  $\delta$ .

Габаритный расчёт можно выполнить 2 способами: с использованием формул идеальной оптической системы, или с использованием формул для расчёта хода нулевого луча.

1) Выполним габаритный расчёт с использованием формул идеальной оптической системы.

Заданные величины  $f'_{экр}$ ,  $k_{экр}$ ,  $\delta$  связаны с остальными данными системы следующими зависимостями:

$$f'_{экр} = -f'_1 \cdot \beta_2, \quad (2.23)$$

$$L = -d + \delta$$

где  $f'_1$  – фокусное расстояние главного зеркала,  $\beta_2$  – линейное увеличение второго зеркала,  $d$  – расстояние между зеркалами,  $L$  – длина системы

$$k_{экр} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{f'_1 - d}{f'_1}, \quad (2.24)$$

где  $D_1$ ,  $D_2$  – диаметры первого и второго зеркал,  $h_1$ ,  $h_2$  – высоты нулевого луча на главных плоскостях зеркал,

Линейное увеличение второго зеркала  $\beta_2$  равно:

$$\beta_2 = -\frac{a'_2}{a_2} = -\frac{-d + \delta}{f'_1 - d}. \quad (2.25)$$

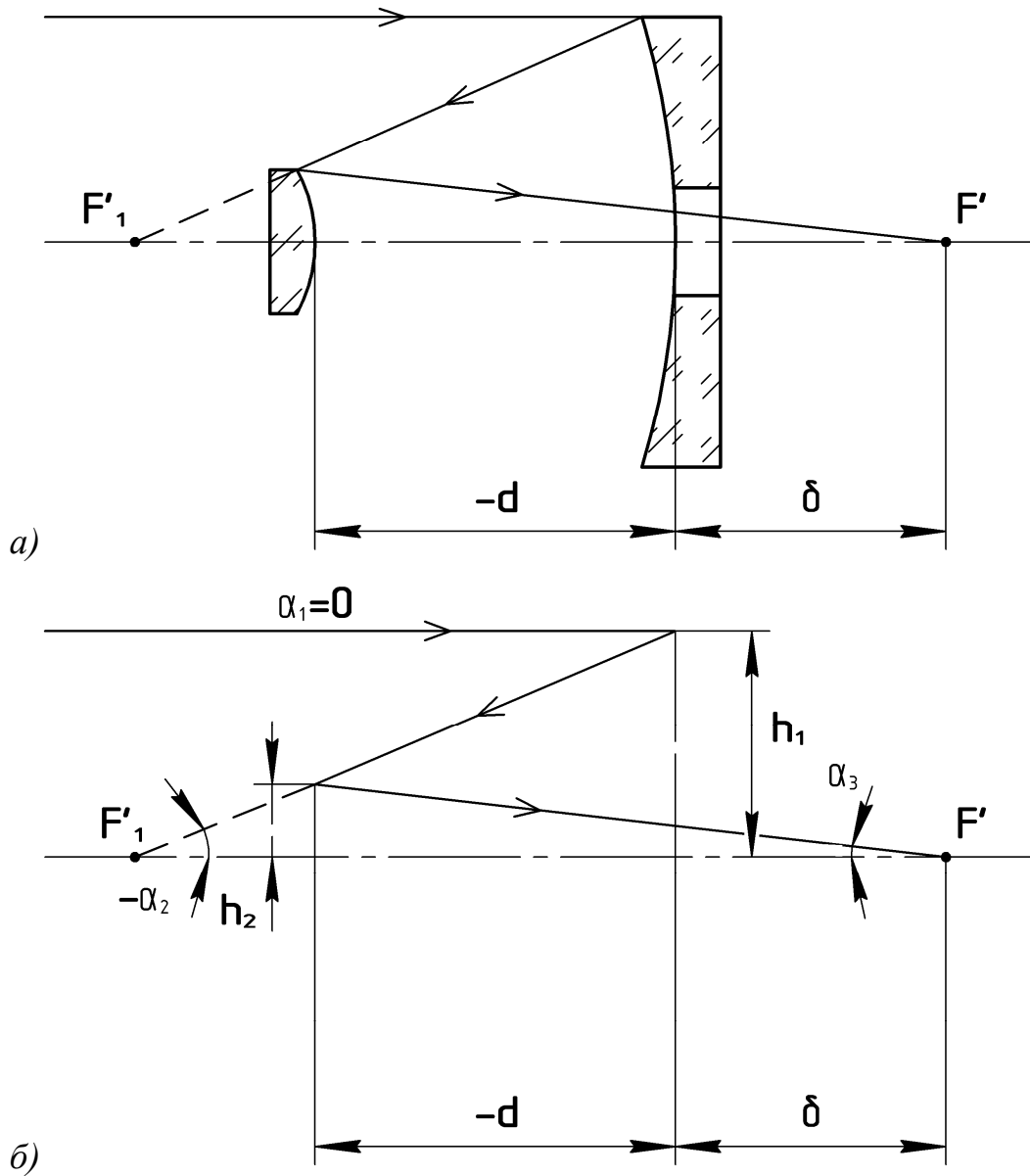


Рис 2.7. Объектив типа Кассегрена

a) оптическая схема объектива б) ход нулевого луча в объективе

Имеем систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} f'_{\text{экв}} &= f'_1 \cdot \frac{-d + \delta}{f'_1 - d} \\ K_{\text{экв}} &= \frac{f'_1 - d}{f'_1} \end{aligned} \right\}.$$

После решения системы уравнений получаем:

$$f'_1 = \frac{\delta - f'_{\text{экв}} k_{\text{экв}}}{1 - k_{\text{экв}}},$$

$$d = \delta - f'_{\text{экв}} k_{\text{экр}}.$$

$$r_1 = 2f'_1$$

Фокусное расстояние второго зеркала можно определить по формуле отрезков для зеркал:

$$\frac{1}{a'_2} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f'_2}. \quad (2.26)$$

Подставим значения  $a'_2$  и  $a_2$  в формулу (2.26):

$$\frac{1}{-d + \delta} + \frac{1}{f'_1 - d} = \frac{1}{f'_2}$$

После решения уравнения получаем:

$$f'_2 = \frac{f'_{\text{экв}} k_{\text{экр}} (\delta - f'_{\text{экв}} k_{\text{экр}})}{\delta + f'_{\text{экв}} (1 - 2k_{\text{экр}})}. \quad (2.27)$$

$$r_2 = 2f'_2$$

2) Выполним габаритный расчёт двухзеркальной системы с использованием формул для расчёта хода нулевого луча:

$$\begin{cases} \text{tg } \alpha_{S+1} = \text{tg } \alpha_S + h_S \Phi_S \\ h_{S+1} = h_S + \text{tg } \alpha_{S+1} d_S \end{cases}, \quad (2.28)$$

где  $\alpha_S$  – углы нулевого луча с оптической осью,  $h_S$  – высоты нулевого луча на главных плоскостях,  $\Phi_S$  – оптическая сила,  $d_S$  – расстояние между поверхностями.

Удобно выполнять расчёты, приняв условие масштаба:

$$f'_{\text{экв}} = 1,0 \quad h_1 = 1,0 \quad \text{tg } \alpha_3 = 1,0$$

Тогда из рис. 2.7 следует:

$$h_2 = k_{\text{экр}} = -d + \delta$$

$$d = \delta - k_{\text{экр}}$$

Используя формулу (2.28) получаем:

$$h_2 = 1 - \text{tg } \alpha_2 d$$

Находим  $\text{tg } \alpha_2$ :

$$\text{tg } \alpha_2 = \frac{1 - h_2}{d}$$



По известной формуле:

$$r_s = hs \frac{n_{s+1} - n_s}{n_{s+1} \operatorname{tg} \alpha_{s+1} - n_s \operatorname{tg} \alpha_s} \quad (2.29)$$

определяем радиус  $r_1$  и фокусное расстояние  $f'_1$  главного зеркала:

$$r_1 = \frac{2}{\operatorname{tg} \alpha_2} \quad f'_1 = \frac{r_1}{2}$$

Находим радиус  $r_2$  и фокусное расстояние  $f'_2$  второго зеркала:

$$r_2 = \frac{2h_2}{1 + \alpha_2} \quad f'_2 = \frac{r_2}{2}$$

### 2.3. Энергетический расчёт

В техническом задании на некоторые оптические системы задаются не все оптические характеристики и их нужно определять, выполняя энергетический расчёт. Целью энергетического расчета является определение светосилы, необходимой для обеспечения заданных в ТЗ требований к интенсивности изображения.

При рассмотрении вопросов передачи световой энергии оптическими приборами удобно оперировать понятием светосилы  $H$ , характеризующей способность ОП создавать более или менее светлое изображение. Светосила определяется как отношение освещенности  $E'$ , измеренной на поверхности изображения к яркости  $B$  предмета:

$$H = \frac{E'}{B}.$$

Светосила системы рассчитывается по различным формулам в зависимости от того, с какими предметами мы имеем дело. Для каждого оптического прибора существует минимальный размер предмета  $y_0$ , при котором этот предмет еще может быть отличен от геометрической точки. Всякий предмет, наблюдаемый в оптический прибор, проектируется на плоскость предметов в виде двумерного образа. Если оба размера этого образа больше  $y_0$ , предмет называем площадочным и для него справедливы следующие формулы:

$$H = \pi \tau \left( \frac{\sin \alpha}{\beta} \right)^2,$$

$$H = \pi \tau \left( \frac{n' \sin \alpha'}{n} \right)^2,$$

где  $\tau$  – коэффициент пропускания оптического канала,  $\beta$  – линейное увеличение оптической системы,  $n, n'$  – показатели преломления сред в пространстве предметов и изображений,  $\alpha, \alpha'$  – апертурные углы в пространстве предметов и изображений.

Большинство практических задач сводится именно к случаю площадочного предмета. В качестве примера можно привести фотографирование, или микроскопирование.

В случае, когда предмет находится так далеко от прибора, что его изображение практически лежит в задней фокальной плоскости, а линейное увеличение  $\beta$  равно нулю, для площадочных предметов приведенные формулы упрощаются:

$$H = \frac{1}{4} \pi \tau \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \left( \frac{D}{f'} \right)^2$$

Если одно измерение предмета больше  $y_0$ , а другое – меньше  $y_0$ , предмет линейный. В этом случае следует пользоваться формулами:

$$H = \pi \tau \frac{\sin^2 \alpha}{\beta},$$

$$H = \pi \tau \beta \left( \frac{n' \sin \alpha'}{n} \right)^2.$$

Линейные предметы встречаются сравнительно редко в практике оптического приборостроения. Примером могут служить тонкие деления шкал.

В случае, когда оба измерения меньше  $y_0$  предмет точечный. При точечных предметах действуют формулы:

$$H = \pi \tau \sin^2 \alpha,$$

$$H = \pi \tau \left( \frac{n' \beta \sin \alpha'}{n} \right)^2.$$

С точечными предметами мы встречаемся при рассматривании звезд при помощи астрономических приборов.

Следует также учитывать, что приведенные соотношения справедливы только для центральной части поля. С удалением от оптической оси светосила понижается по закону Ламберта:

$$H = H_0 \cos^4 \omega'$$

Одним из примеров такого рода систем являются проекционные системы, в которых относительные отверстия или апертуры объективов не задаются, а их нужно определить исходя из заданной освещённости изображения.

Пусть необходимо рассчитать проекционную установку для демонстрации слайдов на экран, площадь которого  $S$  [м<sup>2</sup>] и на котором необходимо создать освещённость  $E$  [лк]. Такую освещённость обеспечит световой поток  $\Phi'$  [лм]:

$$\Phi' = E \cdot S. \quad (2.30)$$

Следовательно, источник должен иметь полный световой поток

$$\Phi_0 \approx (20 \div 100) \Phi'.$$

Из каталога ламп подбирается лампа с полным световым потоком  $\Phi_0$  и известной площадью тела накала  $dS$ . Габаритная яркость  $L$  [кд/м<sup>2</sup>] определяется из формулы:

$$\Phi = 2\pi L dS. \quad (2.31)$$

При известной яркости источника для обеспечения необходимой освещённости надо иметь выходной зрачок проекционного объектива диаметром:

$$D'_p = 2p' \sqrt{\frac{E}{\tau \pi L}}, \quad (2.32)$$

где  $p'$  – расстояние от выходного зрачка до экрана;  $E$  – заданная освещённость на экране;  $\tau$  – коэффициент пропускания объектива;  $L$  – яркость источника света.

Зная диаметр выходного зрачка, можно определить относительное отверстие  $D/f'$  и заднюю апертуру объектива:

$$A' = \sin \sigma' = \frac{D'}{2p'}$$

В проекционных объективах должно быть выполнено условие синусов:

$$\beta = \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = \frac{A}{A'}$$

Следовательно, можно найти переднюю апертуру:

$$A = \sin \sigma = \frac{D}{2p}$$

Другим примером энергетического расчёта является определение диаметра входного зрачка фотоэлектрической системы по интегральным

характеристикам приёмника. Принципиальная схема оптической фотоэлектрической системы показана на рис. 2.8. Приемник изображения смещен относительно плоскости изображения источника

Диаметр входного зрачка должен быть определён из условия, что реакция приёмника на поток излучения должна быть не меньше:

$$i_{\min} = k_{\Pi} \cdot i_{\Pi},$$

где  $k_{\Pi}$  – коэффициент, учитывающий превышение полезного сигнала над пороговым,  $i_{\Pi}$  – сигнал, соответствующий порогу чувствительности приёмника.

Если источник имеет одинаковую по всем направлениям энергетическую яркость  $L$ , то во входной зрачок оптической системы будет поступать поток излучения:

$$\Phi = \tau_a \pi L_{II} Q_{II} \sin^2 \sigma, \quad (2.33)$$

где  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы,  $Q_{II}$  – площадь источника.

Пусть весь поток попадает на приёмник, тогда:

$$\Phi' = \pi \tau_a \tau_{oc} L_{II} Q_{II} \sin^2 \sigma, \quad (2.34)$$

где  $\tau_{oc}$  – коэффициент пропускания оптической системы.

Реакция приёмника  $i_{\min}$  будет равна:

$$i_{\min} = S \Phi', \quad (2.35)$$

где  $S$  – интегральная чувствительность приёмника.

Находим переднюю апертуру оптической системы:

$$\sin \sigma = \sqrt{\frac{i_{\min}}{S \pi \tau_a \tau_{oc} L_{II} Q_{II}}}. \quad (2.36)$$

Диаметр входного зрачка равен:

$$D = 2p \cdot \operatorname{tg} \sigma.$$

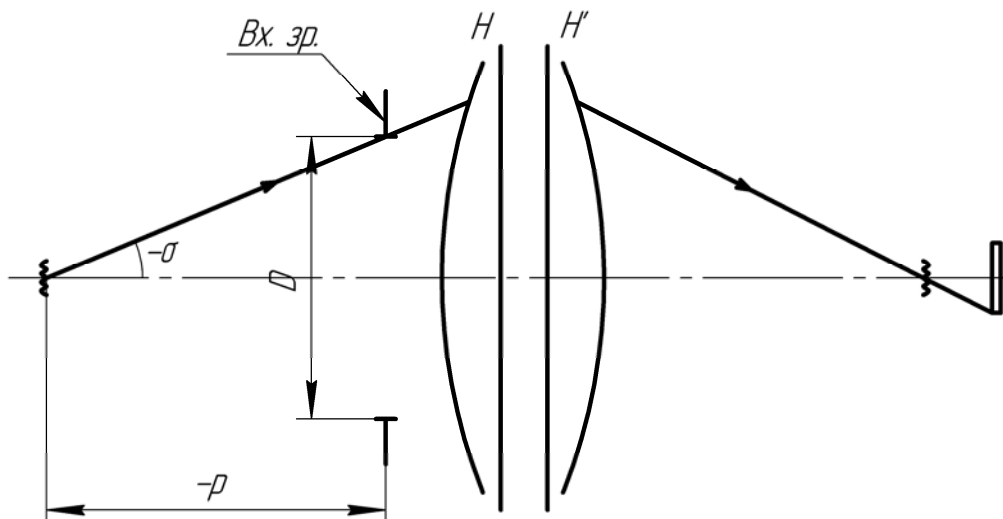


Рис.2.8. Схема хода лучей в фотоэлектрической системе

В качестве третьего пример энергетического расчёта рассмотрим оптическую фотоэлектрическую систему для регистрации излучения звёзд.

Принципиальная оптическая система показана на рис. 2.9.

Звезда – идеальный точечный объект, создающий на поверхности Земли или у края атмосферы освещённость  $E$ . В астрономии принято понятие звёздная величина  $m$ , которая определяет освещённость, создаваемую на площадке, перпендикулярной к падающим лучам.

$$m = -2,5 \lg E - 13,89. \quad (2.37)$$

При расчёте оптической фотоэлектрической системы для регистрации излучения звёзд необходимо переходить от световых величин, определяемых формулой (2.37), к энергетическим. Звёзды излучают как абсолютно чёрное тело, но температура их различна. Все они разбиты на спектральные классы, которые обозначаются буквами латинского алфавита. Переход от блеска звезды (освещённость в лк) к энергетической освещённости ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) выполняется через световую эффективность:

$$k = \frac{\Phi}{\Phi_e} = \frac{E}{E_e} \left( \frac{\text{мм}}{\text{Вт}} \right) \quad (2.38)$$

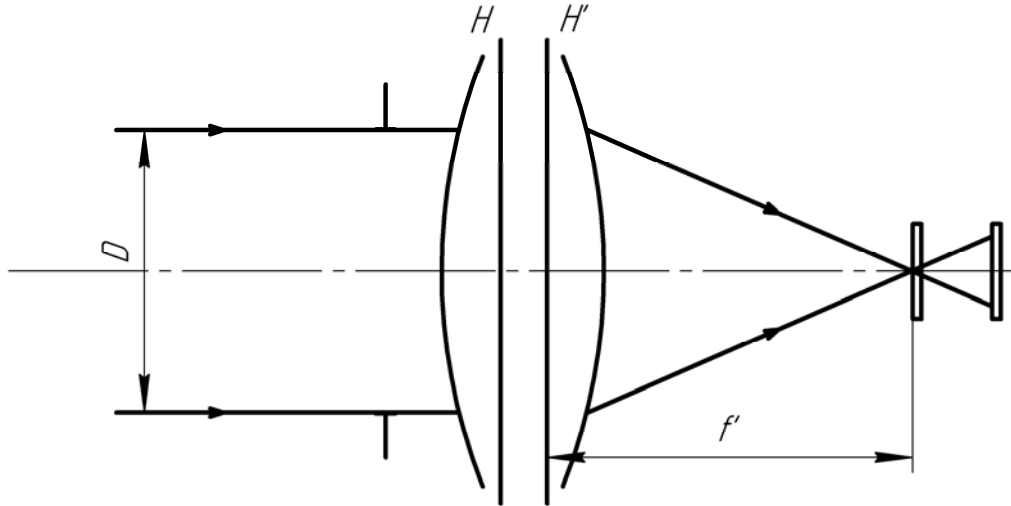


Рис.2.9. Ход лучей в системе для регистрации излучения звёзд

Если известна звёздная величина  $m$ , то по формуле (2.37) определяется освещённость  $E$ . Зная спектральный класс звезды, можно найти по формуле (2.38) энергетическую освещённость у границы земной атмосферы.

Поток от звезды, поступающий во входной зрачок оптической системы, равен:

$$\Phi_e = \tau_a E_e \pi \frac{D^2}{4}, \quad (2.39)$$

где  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы,  $D$  – диаметр входного зрачка оптической системы.

На светочувствительную поверхность приёмника поступает поток:

$$\Phi'_e = \tau_{oc} \Phi_e, \quad (2.40)$$

где  $\tau_{oc}$  – коэффициент пропускания оптической системы.

Реакция приёмника  $i_{\min}$  равна:

$$i_{\min} = \Phi'_e S, \quad (2.41)$$

где  $S$  – интегральная чувствительность приёмника.

Следовательно, диаметр входного зрачка оптической системы определяется по формуле:

$$D = 2 \sqrt{\frac{i_{\min}}{\tau_a \tau_{oc} \pi E_e S}}. \quad (2.42)$$

*Четвертый пример энергетического расчёта.* Рассмотрим оптическую систему, воспринимающую излучение от поверхности, освещённой лазером. Принципиальная схема показана на рис. 2.10.

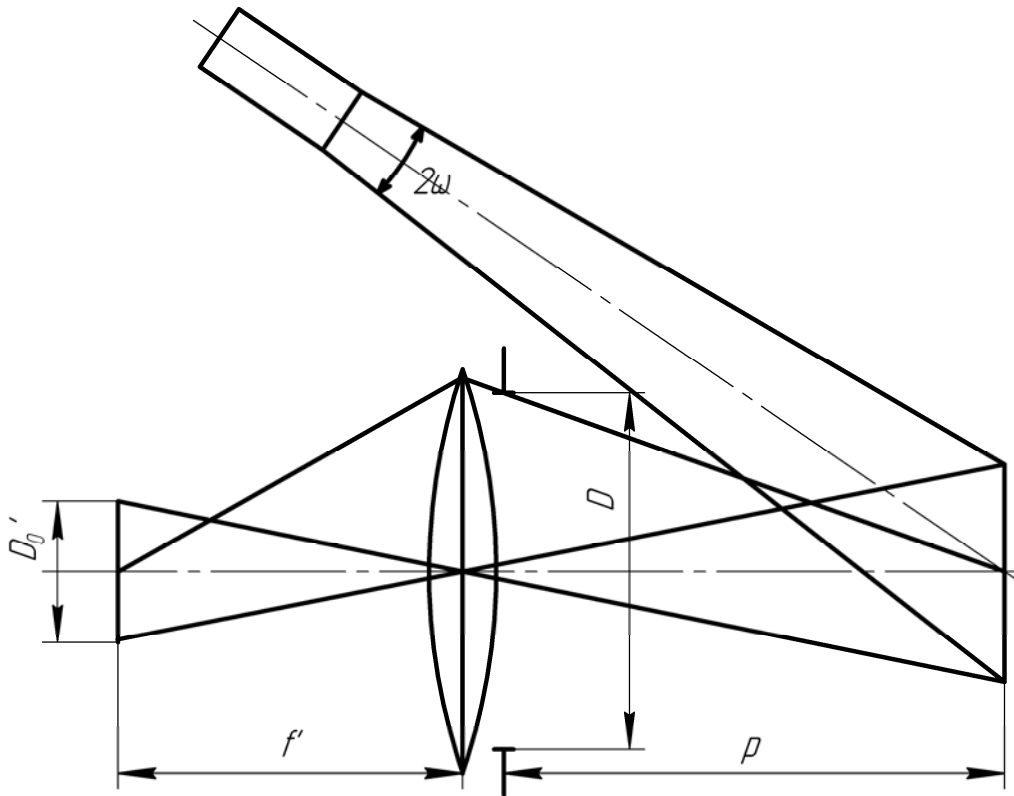


Рис. 2.10. Ход лучей в лазерной установке

Лазер с углом расходимости  $2\omega$  освещает поверхность, находящуюся на расстоянии  $p$  от оптической системы.

Можно принять, что телесный угол  $\Omega$  равен:

$$\Omega = \pi\omega^2. \quad (2.43)$$

Излучение в телесном угле  $\Omega$  равномерное. Тогда сила излучения в направлении оси лазера равна:

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\pi\omega^2}, \quad (2.44)$$

где  $\Phi_e$  – поток излучения лазера.

При нормальном падении лучей на освещаемую поверхность, освещённость  $E_e$  равна:

$$E_e = \tau_a \frac{I_e}{p^2}, \quad (2.45)$$

где  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы.

Считая, что освещаемая поверхность является поверхностью Ламберта с коэффициентом отражения  $\rho$ , находим энергетическую яркость поверхности:

$$L_e = \frac{\rho E_e}{\pi}. \quad (2.46)$$

Диаметр поверхности, освещаемой лазером равен:

$$D_0 = 2\omega p. \quad (2.47)$$

Увеличение оптической системы при значительном расстоянии  $p$  можно считать равным:

$$\beta = \frac{f'}{p}. \quad (2.48)$$

Диаметр изображения в плоскости приёмника:

$$D'_0 = D_0\beta. \quad (2.49)$$

Если изображение вписывается в светочувствительную поверхность приёмника, то необходимое относительное отверстие оптической системы будет равно:

$$\frac{D}{f'} = 2 \sqrt{\frac{i_{\min}}{\tau_a \tau_{cf} \tau_{oc} L_e Q'_0 S(\lambda)}} \quad (2.50)$$

где  $\tau_a$ ,  $\tau_{cf}$ ,  $\tau_{oc}$  – коэффициенты пропускания атмосферы, светофильтров, оптической системы,  $Q'_0$  – площадь изображения объекта,  $S(\lambda)$  – абсолютная спектральная чувствительность приёмника к монохроматическому излучению лазера.

#### 2.4. Выбор aberrаций, подлежащих исправлению

Выбор aberrаций, которые необходимо исправлять в оптической системе, зависит от назначения системы, требуемого качества изображения, относительного отверстия и углового поля.

В системах с небольшими угловыми полями, например, в объективах зрительных труб, необходимо исправлять сферическую aberrацию, кому и хроматизм положения. Если система работает с глазом, то очень хорошее качество изображения должно быть в центре поля, а по полю допускается ухудшение качества изображения.

В системах с невысокими относительными отверстиями (очковые линзы, лупы) и большими угловыми полями исправляется в первую очередь астигматизм.

В оптических системах, работающих с лазерами, исправляется только сферическая aberrация и желательно, чтобы неизопланатизм был небольшой.



В фотографических и проекционных системах нужно исправлять сферическую абберацию, кому, астигматизм, кривизну изображения, хроматизм положения и хроматизм увеличения, дисторсия не должна превышать заданной величины.

Увеличение числа аббераций, подлежащих исправлению, усложняет оптическую систему и увеличивает число линз.

## **2.5. Выбор конструкции компонентов и оптических материалов**

*Выбор конструкции компонентов* по полученным из габаритного расчёта значениям  $f'$ ,  $D/f'$ ,  $2\omega$ ,  $2y$ ,  $\beta$ ,  $A$  осуществляется с использованием архивов оптических систем, каталогов, патентов и аналитических расчётов.

На практике исходят из того, что на предприятии существуют архивы оптических систем, которые удовлетворяют новым требованиям. В известную систему вводятся новые стёкла, делаются линзы или добавляются новые линзы. Таким образом может быть получена стартовая система для автоматизированной коррекции.

Кроме того имеется значительное количество оптических систем в литературе. Имеются данные об оптических системах и в патентах. К сожалению, в них не всегда даются точные конструктивные данные.

Результатом поиска является конкретная оптическая система, которая не имеет требуемого качества изображения, но имеет для этого необходимые предпосылки. В общем, только в процессе коррекции окончательно можно решить, насколько удачной является стартовая система.

На этапе выбора стартовой системы определяется, будет ли оптическая система линзовой, зеркально-линзовой или зеркальной, сколько линз будет содержать объектив, какие марки стёкол будут использованы. Если речь идёт о зеркально-линзовом объективе, то тогда решается вопрос, сколько зеркал будет содержать объектив, будут ли зеркала сферические или несферические, будет ли объектив иметь компенсатор аббераций и где он будет расположен, в сходящемся пучке или в параллельном.

Если требуемые параметры компонента (объектива), не сильно отличаются от того, что есть в архиве или каталоге, то задача может быть решена либо масштабированием, либо небольшой оптимизацией под требуемые параметры.

Если же компонент по своим оптическим характеристикам сильно отличается от существующих, тогда этот узел или объектив нужно заново рассчитывать. Для этого существуют следующие способы:

- 1) алгебраический метод с использованием теории аберраций третьего порядка. Этот метод даёт хорошие результаты при расчёте бесконечно-тонких компонентов и систем с небольшими относительными отверстиями и угловыми полями
- 2) компоновка систем из линз и поверхностей с известными свойствами. Этот метод широко использовался при разработке оптических систем проф. Русиновым М.М.
- 3) метод проб.

### *Выбор оптических материалов*

Одним из основных оптических материалов является оптическое стекло. Оно отличается от технического химическим составом, физическими свойствами и высокой степенью однородности. Кроме оптического стекла в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра применяются кристаллы и керамика. Для неответственных деталей применяется пластмасса.

Для характеристики свойств оптических материалов используются определенные спектральные линии – линии Фраунгофера (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Линии Фраунгофера	Цвет	Длина волны (нм)	Элемент, в спектре которого находится данная линия
t	инфракрасный	1013,9	ртуть
s	инфракрасный	852,1	цезий
r	красный	706,5	гелий
C	красный	656,3	водород
C'	красный	643,8	кадмий
D	желто-оранжевый	589,3	натрий
e	зеленый	546,1	ртуть
F	синий	486,1	водород
F'	синий	480,0	кадмий
g	фиолетовый	435,8	ртуть
h	фиолетовый	404,7	ртуть
i	ультрафиолетовый	365,0	ртуть

К оптическим постоянным оптического стекла относятся:

- 1) Показатель преломления  $n$  для линии  $e$ , расположенной вблизи максимума чувствительности глаза  $n_e$  (раньше  $n_D$ ) называется основным показателем преломления. Диапазон значений  $n_e$  в области  $1,3 < n_e < 2,1$ , применяются, в основном, стекла в диапазоне  $1,45 < n_e < 1,93$ .

2)  $n_{F'} - n_{C'}$  – основная средняя дисперсия (раньше  $n_F - n_C$ ).

3)  $\nu_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$  – коэффициент основной средней дисперсии или число

Аббе  $\left( \text{раньше } \nu_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \right)$ . Диапазон значений  $10 < \nu_e < 120$ , применяются, в основном, стекла  $20 < \nu_e < 90$ .

4)  $p_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}{n_{F'} - n_{C'}}$  – относительная частная дисперсия.

Кроме этих характеристик существуют еще термооптические и другие характеристики, которые приводятся в каталогах оптического стекла.

В зависимости от коэффициента дисперсии и от показателя преломления все стекла делят на типы:

- К, ЛК, ТК, СТК (кроны, легкие кроны, тяжелые кроны, сверх тяжелые кроны);
- Ф, ЛФ, ТФ, ТБФ (флинты, легкие флинты, тяжелые флинты, тяжелые баритовые флинты).

Деление стекол на кроны и флинты показано на рис. 2.11[9].

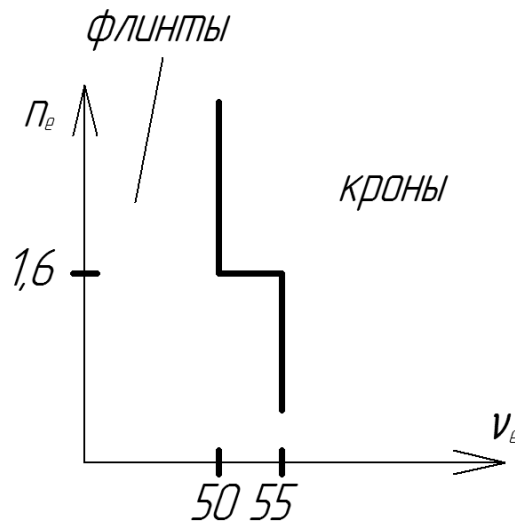


Рис. 2.11. Деление стекол на кроны и флинты

Флинты имеют малый коэффициент дисперсии  $n_e > 1,6028$ ,  $\nu_e < 49,7$ ; кроны имеют большой коэффициент дисперсии  $n_e < 1,6028$ ,  $\nu_e > 54,7$ .

Стекла внутри типа делятся на марки: К8, СТК19, ТФ10.

На рис. 2.12 приведена « $n_e - \nu_e$ » диаграмма оптического стекла.

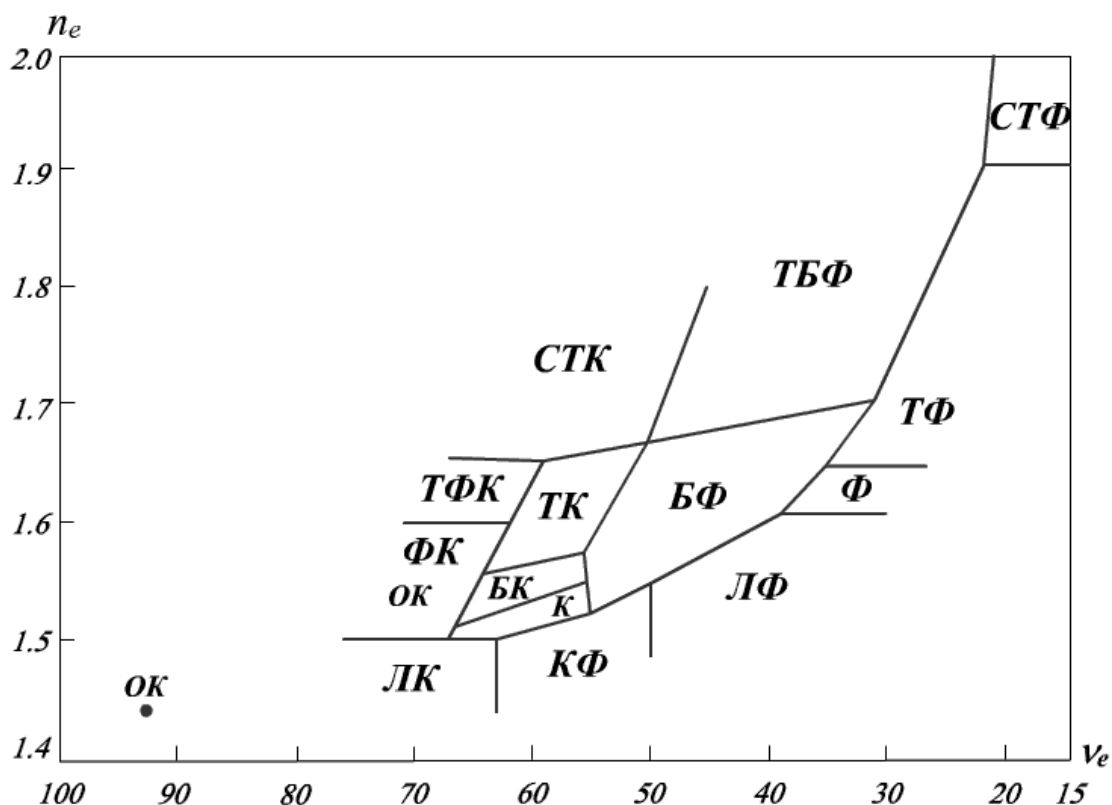


Рис. 2.12. Диаграмма «показатель преломления  $n_e$  - коэффициент дисперсии  $v_e$ »

Выбор оптических материалов определяется в первую очередь рабочим спектральным диапазоном оптического прибора. В видимой области спектра используются в основном оптические стекла. В тех случаях, когда необходима высокая степень коррекции хроматизма, например, в высокоапертурных микрообъективах и длиннофокусных астрообъективах, используются кристаллы, такие как фтористый литий, флюорит и другие.

В простых оптических системах, таких как склеенные объективы, выбор стекол позволяет осуществить прежде всего ахроматизацию системы. Простые ахроматы содержат, как правило, положительные линзы из крона и отрицательные из флинта [10].

Для создания апохроматов и минимизации величины вторичного спектра необходимы специальные стекла или кристаллы. Для подавляющего большинства оптических стекол существует линейная зависимость между относительной частной дисперсией  $p_{\lambda_1, \lambda_2}$  и коэффициентом дисперсии  $v_e$ . Для устранения вторичного спектра необходимы стекла, которые не должны находиться на нормальной прямой. Такие стекла были разработаны и они называются особыми (ОК1, ОФ3, ОК4 и др.)

Для предмета, расположенного в бесконечности, величина вторичного спектра равна:

$$S'_{\lambda_1} - S'_{\lambda_2} = -f'_0 \frac{p_1 - p_2}{v_1 - v_2},$$

где  $p_1, p_2, v_1, v_2$  – относительные частные дисперсии и числа Аббе соответственно для первой и второй линзы.

Требуется выбрать стекла так, чтобы разность дисперсий  $p_1 - p_2$  была минимальной в широкой области спектра при достаточно большой разности чисел Аббе, что дает приемлемые значения для оптических сил линз.

## 2.6. Алгебраический метод получения стартовой системы

Алгебраический метод получения стартовой системы предполагает использование теории aberrаций третьего порядка, он даёт хорошие результаты для систем из бесконечно-тонких компонентов с небольшими относительными отверстиями и угловыми полями. Особенностью бесконечно-тонких систем является то, что толщины не являются параметрами для коррекции aberrаций, и при переходе к конечным толщинам aberrации меняются незначительно.

При высокой степени автоматизации расчётов оптических систем возникает вопрос о целесообразности применения теории aberrаций третьего порядка. Успех автоматизированного расчёта любой оптической системы во многом зависит от того, насколько удачной была выбрана исходная система. Стартовая система, в которой исправлены aberrации третьего порядка, будет значительно ближе к искомой, чем произвольно выбранная. Однако расчёты в области aberrаций третьего порядка требуют большого числа трудоёмких вычислений.

Расчёт в области aberrаций третьего порядка открывает широкие возможности для общего анализа систем, для установления тех областей параметров, где возможно получение вариантов, обладающих заданными aberrациями. Такого рода исследования экономят много труда и сил, так как они позволяют не распространять поиски решений на такие области параметров, где хороших решений не может быть.

В литературе этот метод носит название разделения переменных.

В формулы для коэффициентов aberrаций входят углы и высоты для двух нулевых лучей (рис. 2.13),  $\alpha_s, h_s$  – углы и высоты первого нулевого луча, идущего из осевой точки предмета,  $\beta_s, y_s$  – углы и высоты второго нулевого луча, идущего через центр входного зрачка. Первый нулевой луч идёт по пути реального апертурного луча и пересекает оптическую ось во всех точках промежуточного изображения, второй нулевой луч идёт по

пути главного луча и пересекает оптическую ось на месте входного и выходного зрачков, также апертурной диафрагмы.

Хроматические aberrации первого порядка (в параксиальной области) зависят от внешних параметров (материала линз, фокусного расстояния, положения предмета) и не зависят от внутренних параметров (формы линз). Условие Пецваля также не зависит от внутренних параметров. Монохроматические aberrации зависят от тех же параметров, что и хроматические, а также от внутренних параметров (прогиба линз). На этом основан метод разделения переменных.

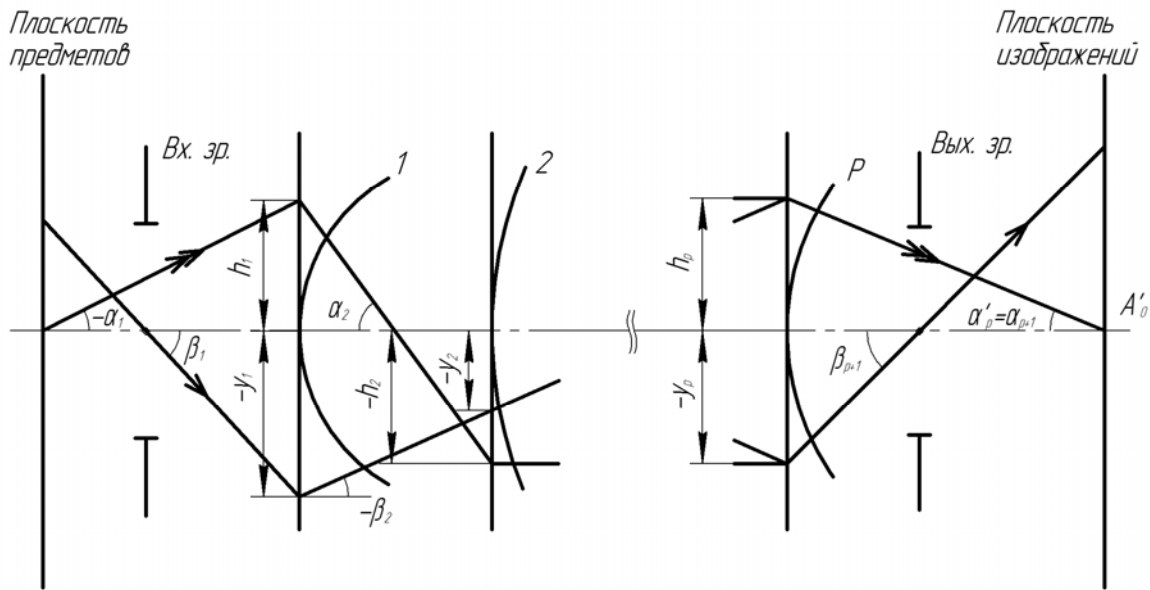


Рис. 2.13. Ход первого и второго нулевых лучей

При выполнении расчёта сначала составляют систему уравнений, в которую входят только внешние параметры:

1) Условие масштаба, обеспечивающее требуемое фокусное расстояние:

$$\Phi = \frac{1}{h_1} \sum_{S=1}^{S=P} h_S \Phi_S = 1,0, \quad (2.51)$$

где  $\Phi = 1,0$  – приведённая оптическая сила системы при  $f' = 1,0$ . В уравнение масштаба входят оптические силы линз  $\Phi_S$ , из которых состоит система, выраженные в единицах оптической силы объектива,  $h_S$  – высоты первого нулевого луча на главных поверхностях линз.

Для наиболее распространённого случая: предмет в бесконечности, изображение в фокальной плоскости, имеем:

$$h_1 = 1,0 \quad a_{p+1} = 1,0 \quad \beta_1 = 1,0 \quad y_1 = S_p / f',$$

где  $S_p$  – расстояние от первой поверхности до входного зрачка.

2) Условие исправления кривизны Пецваля:

$$\sum_{S=1}^{S=P} \frac{\Phi_S}{n_S} = 0, \quad (2.52)$$

где  $n_S$  – показатели преломления материалов линз.

3) Условие исправления хроматизма положения:

$$S_{IXP} \sum_{S=1}^{S=P} \frac{h_S^2 \Phi_S}{v_S} = 0, \quad (2.53)$$

где  $v_S$  – коэффициенты дисперсии стёкол для требуемого диапазона длин волн.

4) Условие исправления хроматизма увеличения:

$$S_{IIKP} \sum_{S=1}^{S=P} h_S y_S \frac{\Phi_S}{v_S} = 0, \quad (2.54)$$

где  $h_S, y_S$  – высоты первого и второго параксиальных лучей.

5) Конструктивные или иные другие дополнительные условия.

Из решения уравнений определяются внешние параметры оптической системы: оптические силы линз, воздушные промежутки, марки стёкол.

Во вторую группу входят уравнения коэффициентов аберраций, зависящие от внутренних параметров (углов первого нулевого луча в линзах) или от формы линзы.

Существуют 2 вида формул для коэффициентов аберраций третьего порядка. Приводим эти формулы в изложении и с обозначениями, приведёнными в книге проф. Чуриловского В.Н. [13].

Первый вид формул, в которые входят углы и высоты первого и второго параксиальных лучей, удобен для определения коэффициентов аберраций третьего порядка (коэффициентов Зейделя) оптических систем, параметры которых известны.

*Первый вид формул:*

1) коэффициент сферической аберрации:

$$S_I = \sum_{S=1}^{S=P} h_S Q_S; \quad (2.55)$$

2) коэффициент комы:

$$S_{II} = \sum_{S=1}^{S=P} \left( \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \right)_S h_S Q_S; \quad (2.56)$$

3) коэффициент астигматизма:

$$S_{III} = \sum_{S=1}^{S=P} h_S Q_S \left( \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \right)_S^2; \quad (2.57)$$

4) коэффициент кривизны поля:

$$S_{IV} = \sum_{S=1}^{S=P} \frac{\alpha_{S+1} - \alpha_S}{h_S} \frac{n_S}{n_{S+1}} = \sum_{S=1}^{S=P} \frac{n_{S+1} \alpha_{S+1} - n_S \alpha_S}{n_S n_{S+1} h_S}, \quad (2.58)$$

или:

$$S_{IV} = - \sum_{S=1}^{S=P} \frac{\Delta \left( \frac{1}{n_S} \right)}{r_S}; \quad (2.59)$$

5) коэффициент дисторсии:

$$S_V = \sum_{S=1}^{S=P} h_S Q_S \left( \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \right)_S^3 - \sum_{S=1}^{S=P} \frac{n_{S+1} \alpha_{S+1} - n_S \alpha_S}{n_S n_{S+1} h_S} \left( \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \right)_S. \quad (2.60)$$

Причём:

$$Q_S = P_S + \sigma_S T_S$$

где  $\sigma_S$  – коэффициент деформации несферической поверхности,  $\sigma_S = -e^2$ ,  
где  $e^2$  – квадрат эксцентриситета несферической поверхности;

$$P_S = \left( \frac{\alpha_{S+1} - \alpha_S}{\frac{1}{n_{S+1}} - \frac{1}{n_S}} \right)^2 \left( \frac{\alpha_{S+1}}{n_{S+1}} - \frac{\alpha_S}{n_S} \right); \quad T_S = \frac{(n_{S+1} \alpha_{S+1} - n_S \alpha_S)^3}{(n_{S+1} - n_S)^2}.$$

*Второй вид формул:*

В формулах исключены углы  $\beta$  и необходим только первый нулевой луч. Эти формулы могут быть использованы при расчёте новых систем.

Рассмотрим случай, когда входной зрачок совпадает с первой поверхностью.

1) коэффициент сферической аберрации:

$$S_{0I} = \sum_{S=1}^{S=P} h_S Q_S = \sum_{S=1}^{S=P} h_S P_S + \sum_{S=1}^{S=P} h_S T_S \sigma_S \quad (2.61)$$

2) коэффициент комы:



$$\begin{aligned}
S_{0II} &= -\sum_{S=1}^{S=P} h_S S_S Q_S + \sum_{S=1}^{S=P} W_S = \\
&= \left[ -\sum_{S=1}^{S=P} h_S S_S P_S + \sum_{S=1}^{S=P} W_S \right] - \sum_{S=1}^{S=P} h_S S_S T_S \sigma_S
\end{aligned} \tag{2.62}$$

3) коэффициент астигматизма

$$\begin{aligned}
S_{0III} &= \sum_{S=1}^{S=P} h_S S_S^2 Q_S - 2 \sum_{S=1}^{S=P} S_S W_S + \sum_{S=1}^{S=P} \frac{1}{h_S} \left( \frac{\alpha_{S+1}}{n_{S+1}} - \frac{\alpha_S}{n_S} \right) = \\
&= \left[ \sum_{S=1}^{S=P} h_S S_S^2 P_S - 2 \sum_{S=1}^{S=P} S_S W_S + \sum_{S=1}^{S=P} \frac{1}{h_S} \left( \frac{\alpha_{S+1}}{n_{S+1}} - \frac{\alpha_S}{n_S} \right) \right] + \sum_{S=1}^{S=P} h_S S_S^2 T_S Q_S
\end{aligned} \tag{2.63}$$

4) коэффициент кривизны поля

$$S_{0IV} = \sum_{S=1}^{S=P} \frac{1}{h_S} \left( \frac{\alpha_{S+1}}{n_{S+1}} - \frac{\alpha_S}{n_S} \right) = \sum_{S=1}^{S=P} \frac{1}{h_S} \left( \frac{n_{S+1} \alpha_{S+1} - n_S \alpha_S}{n_S n_{S+1}} \right) \tag{2.64}$$

5) коэффициент дисторсии:

$$\begin{aligned}
S_{0V} &= -\sum_{S=1}^{S=P} h_S S_S^3 P_S + 3 \sum_{S=1}^{S=P} S_S^2 W_S - \sum_{S=1}^{S=P} \frac{S_S}{h_S} \left( \frac{1}{n_S} + \frac{3}{n_{S+1}} \right) \alpha_{S+1} + \\
&+ \sum_{S=1}^{S=P} \frac{S_S}{h_S} \left( \frac{3}{n_S} + \frac{1}{n_{S+1}} \right) \alpha_S + \sum_{S=1}^{S=P} \frac{1}{h_S^2} \left( \frac{1}{n_{S+1}^2} - \frac{1}{n_S^2} \right) - \sum_{S=1}^{S=P} h_S S_S^2 T_S \sigma_S
\end{aligned} \tag{2.65}$$

где 
$$S_S = \sum_{K=1}^{K=S-1} \frac{d_K}{n_{K+1} h_K h_{K+1}} ;$$

$$W_S = \frac{\alpha_{S+1} - \alpha_S}{v_{S+1} - v_S} (v_{S+1} \alpha_{S+1} - v_S \alpha_S).$$

Рассмотрим общий случай, когда входной зрачок не совпадает с первой поверхностью. Тогда получается следующая сводка формул полных коэффициентов Зейделя через коэффициенты с нулями:

$$\begin{cases}
S_I = S_{I0} \\
S_{II} = S_{0II} + k S_{0I} \\
S_{III} = S_{0III} + 2k S_{0II} + k^2 S_{0I} \\
S_{IV} = S_{0IV} + 2k S_{0II} + k^2 S_{0I} \\
S_V = S_{0V} + k(2S_{0III} + S_{0IV}) + 3k^2 S_{0II} + k^2 S_{0I}
\end{cases} \tag{2.66}$$

где  $k = \frac{1}{n_1 h_1^2 \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{t_1} \right)}$ .

$S_1$  – расстояние от первой поверхности до предмета,

$t_1$  – расстояние от первой поверхности до входного зрачка.

Из формул видно, что если устранена сферическая aberrация, то кома не зависит от положения входного зрачка. Если устранены сферическая aberrация и кома, то астигматизм не зависит от положения входного зрачка и т.д.

Для устранения всех пяти монохроматических aberrаций достаточно выполнить условие, чтобы все коэффициенты с нулями были равны нулю.

При расчёте новой системы суммы Зейделя приравниваются нулю. Для уже рассчитанных систем часто известно число, к которому нужно приравнять сумму, чтобы компенсировать aberrации, возникающие при введении конечных толщин, или компенсировать aberrации высших порядков.

Необходимо, чтобы число свободных параметров было равно числу исправляемых aberrаций, то есть числу уравнений. Если число уравнений меньше, чем число свободных параметров, тогда можно ввести дополнительное условие. Вводя дополнительные условия необходимо оценивать их целесообразность и осуществимость.

Связь коэффициентов aberrаций Зейделя с самими aberrациями (для бесконечно удалённого объекта, в пространстве предметов и изображений воздух):

1) поперечная сферическая aberrация:

$$\Delta y' = -\frac{1}{2} \frac{m^3}{f'^2} S_I, \quad (2.67)$$

где  $m$  – координата первого параксиального луча на входном зрачке.

2) меридиональная кома:

$$\Delta y' = -\frac{3}{2} \frac{m^2}{f'} \operatorname{tg} \omega \cdot S_{II}, \quad (2.68)$$

где  $2\omega$  – угловое поле оптической системы.

3) астигматизм и кривизна изображения:

$$\begin{cases} z'_m = -\frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^2 \omega (3S_{III} + S_{IV}) \\ z'_s = -\frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^2 \omega (S_{III} + S_{IV}) \end{cases}, \quad (2.69)$$

$$z'_s - z'_m = f' \operatorname{tg}^2 \omega S_{III}, \quad (2.70)$$

$$\Delta y' = z'_m \operatorname{tg} \sigma' = -\frac{1}{2} m \operatorname{tg}^2 \omega (3S_{III} + S_{IV}), \quad (2.71)$$

$$\Delta x' = z'_s \operatorname{tg} \sigma' = -\frac{1}{2} m \operatorname{tg}^2 \omega (S_{III} + S_{IV}), \quad (2.72)$$

где  $z'_m$  – расстояние от плоскости идеального изображения до изображения в меридиональной плоскости,  $z'_s$  – расстояние от плоскости идеального изображения до изображения в сагиттальной плоскости,  $\Delta y'$  – поперечная aberrация в меридиональной плоскости,  $\Delta x'$  – поперечная aberrация в сагиттальной плоскости,  $\sigma'$  – задний апертурный угол.

4) дисторсия:

Поперечная aberrация:

$$\Delta y' = -\frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^3 \omega S_V. \quad (2.73)$$

Относительная дисторсия:

$$\Delta \% = \frac{100 \cdot \Delta y'}{y'} = 50 \operatorname{tg}^2 \omega S_V \quad (2.74)$$

Поперечные aberrации третьего порядка  $\Delta y'$  и  $\Delta x'$  для предмета в бесконечности имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta y' = & -\frac{m(m^2 + M^2)}{2f'^2} S_I - \frac{(3m^2 + M^2) \operatorname{tg} \omega}{2f'} S_{II} - \\ & - \frac{m \operatorname{tg}^2 \omega}{2} (3S_{III} + S_{IV}) - \frac{\operatorname{tg}^3 \omega}{2} f' S_V \end{aligned} \quad (2.75)$$

$$\Delta x' = -\frac{M(m^2 + M^2)}{2f'^2} S_I - \frac{mM \operatorname{tg} \omega}{f'} S_{II} - \frac{M \operatorname{tg}^2 \omega}{2} (S_{III} + S_{IV}) \quad (2.76)$$

где  $m, M$  – координаты лучей на входном зрачке в меридиональной и сагиттальной плоскостях.

*Примеры расчёта систем с использованием теории aberrаций третьего порядка.*

Рассчитывая систему по формулам теории aberrаций третьего порядка, невозможно получить маленькие aberrации. Теория aberrаций третьего порядка – это только первый этап на пути создания хорошо скорректированной системы. Чем больше угол поля зрения и относительное отверстие рассчитываемой системы, тем менее годной будет система, рассчитанная по формулам теории aberrаций третьего порядка, так как с увеличением углового поля и относительного отверстия растут aberrации высших порядков. Теория aberrаций третьего порядка имеет большее значение для общего анализа оптических систем, для определения областей параметров, в которых могут быть найдены хорошие варианты систем.

При введении асферических поверхностей в оптические системы расчет по формулам теории aberrаций третьего порядка является первым необходимым этапом.

По сравнению со сферическими поверхностями асферические поверхности в области aberrаций третьего порядка имеют дополнительный параметр для коррекции aberrаций. Этот параметр – эксцентриситет. Если уравнение кривой второго порядка имеет вид:

$$y^2 = 2r_0x - Bx^2, \text{ то } B = 1 - e^2.$$

Вводится понятие «деформация» поверхности  $\sigma = -e^2$ . Отсюда следует общее уравнение кривой второго порядка:

$$y^2 = 2r_0x - (1 + \sigma)x^2. \quad (2.77)$$

Можно составить таблицу 2.3, в которой показана связь коэффициентов деформации с формой поверхности.

Определение формы отражающей поверхности с исправленной сферической aberrацией третьего порядка для произвольного положения предмета.

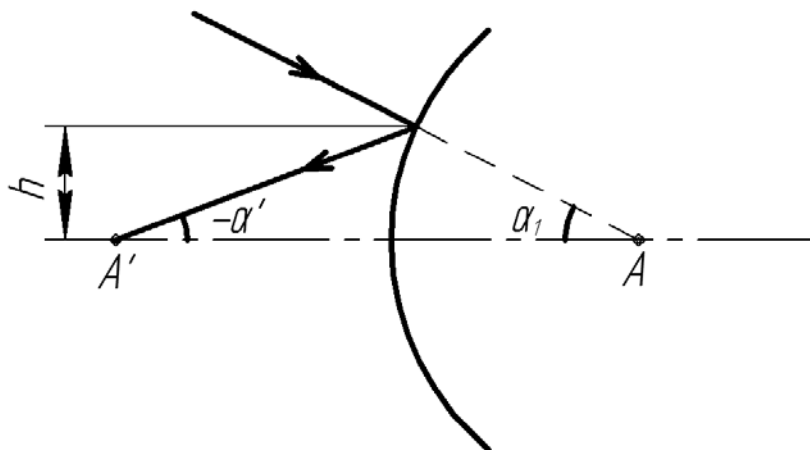


Рис. 2.14. Отражающая поверхность

Таблица 2.3

Интервал	$\sigma$	Форма поверхности
$-\infty < \sigma < -1$	$\sigma = -\infty$	Плоскость
	$-\infty < \sigma < -2$	Гиперболоид $a < b$
	$-2 < \sigma < -1$	Гиперболоид $a > b$
$\sigma = -1$	$\sigma = -1$	Параболоид
$-1 < \sigma < +\infty$	$-1 < \sigma < 0$	Эллипсоид $a > b$ 
	$\sigma = 0$	Сфера
	$0 < \sigma < +\infty$	Сплюснутый эллипсоид 

Обратимся к рис. 2.14. Примем условие масштаба:  $\alpha_1 = \beta$ ,  $\alpha' = -1, 0$ ,  $h_1 = 1, 0$ . Составим условие устранения сферической аберрации:

$$S_1 = h_1 \cdot Q_1 = 0,$$

или:  $P + T \cdot \sigma = 0$ , откуда:  $\sigma = -\frac{P}{T}$ .

Найдем значение  $P$  и  $T$ , при  $n = 1$ ,  $n' = -1$ :

$$P = \left( \frac{\frac{a' - a}{1} - \frac{1}{-1}}{\frac{1}{-1} - \frac{1}{1}} \right) \left( \frac{\alpha'}{n'} - \frac{\alpha}{n} \right) = \frac{(-1 - \beta)^2}{4} \cdot (1 - \beta),$$

$$T = \frac{(n'\alpha' - n\alpha)^3}{(n' - n)^2} = \frac{(1 - \beta)^3}{4}.$$

Отсюда следует:

$$\sigma = -\left( \frac{-\beta - 1}{-\beta + 1} \right)^2, \quad \sigma < 0$$

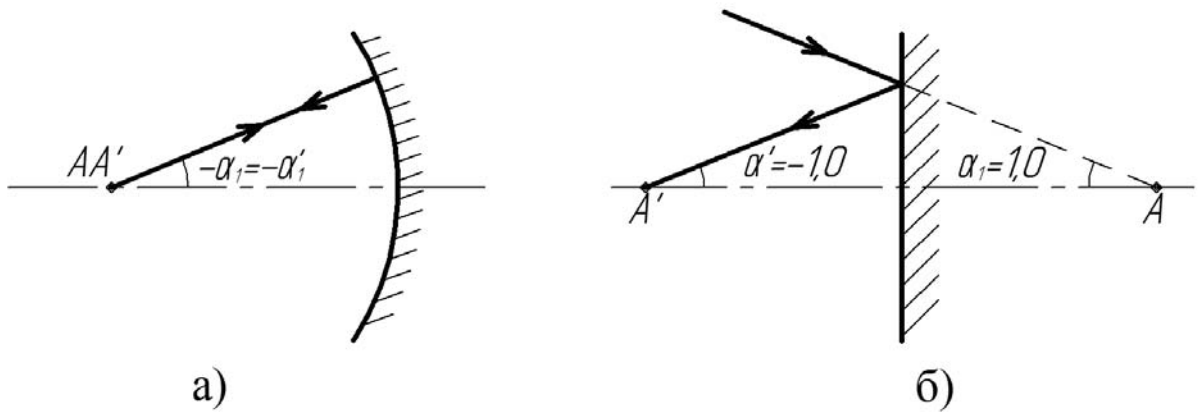


Рис. 2.15. Сфера и плоскость

Рассмотрим отдельные случаи:

- а) предмет в бесконечности  $\beta = 0$ , отсюда следует  $\sigma = -1,0$ , получаем параболоид  $y^2 = 2r_0 x$ ;
- б) предмет на конечном расстоянии  $\beta = -1,0$ , тогда  $\sigma = 0$ , получаем сферу  $y^2 = 2r_0 x - x^2$  (рис. 2.15а);
- в) предмет на конечном расстоянии  $\beta = 1,0$ , тогда  $\sigma \rightarrow 0$ , получаем плоскость (рис. 2.15б);
- г) предмет на конечном расстоянии,  $-\infty < \beta < 0$ , тогда  $-1 < \sigma < 0$ , получаем эллипсоиды (рис. 2.16);
- д) если  $0 < \beta < -\infty$ , то  $-\infty < \beta < -1$ , имеем гиперболоиды.



Рис.2.16. Эллиптические поверхности

Можно показать, что:

$$\sigma_{\left(\frac{1}{\beta}\right)} = \sigma_{\beta}$$

$$\sigma_{\left(\frac{1}{\beta}\right)} = -\frac{\left(-\frac{1}{\beta} - 1\right)^2}{\left(-\frac{1}{\beta} + 1\right)^2} = -\frac{(\beta + 1)^2}{(\beta - 1)^2}$$

Это происходит в силу обратимости лучей

В таблице 2.4 показано взаимоотношение формы отражающей поверхности с линейным увеличением  $\beta$  при условии анаберрационного изображения.

Таблица 2.4

$\beta$	-1,0	-0,5	-0,2	-0,1	0	+0,1	+0,2	+0,5	+1,0
Форма поверхности	Сфера	Эллипсоиды			Параболоид	Гиперboloиды			Плоскость
$\sigma$	0	$-\frac{1}{9}$	$-\frac{4}{9}$	$-\frac{81}{121}$	-1	$-\frac{121}{81}$	$-\frac{9}{4}$	-9,0	$-\infty$
$\frac{1}{\beta}$	-1,0	-2,0	-5,0	-10	$-\infty$	+10	+5	+2	+1

Определение формы преломляющей поверхности с исправленной сферической абберацией третьего порядка для произвольного положения предмета (рис. 2.17).

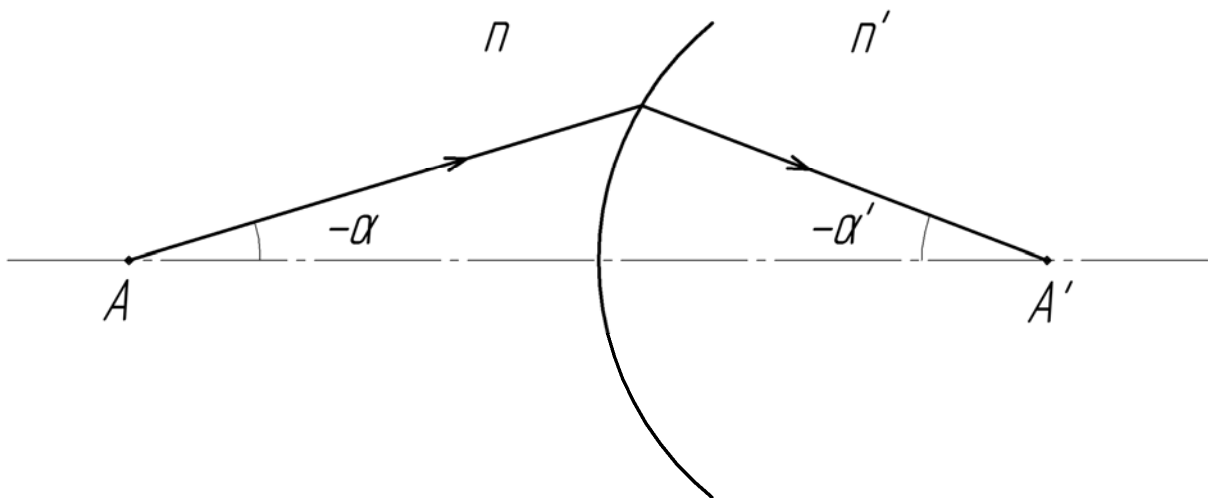


Рис. 2.17. Преломление луча сферической поверхностью

Условие масштаба:  $\alpha_1 = \beta$ ,  $\alpha' = 1,0$ ,  $h_1 = 1,0$ . Формула для определения деформации поверхности  $\sigma$  будет иметь вид:

$$\sigma = -\frac{P}{T}, \text{ так как } P + \sigma T = 0.$$

Определим  $P$  и  $T$ :

$$P = \frac{nn'}{(n' - n)^2} (1 - \beta)^2 (n - n'\beta),$$

$$T = \frac{(n' - n\beta)^3}{(n' - n)^2},$$

откуда:

$$\sigma = -\frac{nn'(1 - \beta)^2 (n - n'\beta)}{(n' - n\beta)^3}$$

Рассмотрим отдельные случаи:

а)  $\beta = 1$  – получаем сферическую поверхность.

б)  $\beta = \frac{n}{n'}$  – также получаем сферу.

в) пусть предмет находится в бесконечности, тогда  $\sigma = -\left(\frac{n}{n'}\right)^2$

Если  $n' > n$ , тогда  $-1 < \sigma < 0$ , получаем эллипсоиды.

При  $n' < n$ ,  $-\infty < \sigma < -1$  - гиперболоиды.

С помощью формул теории aberrаций третьего порядка получили формы поверхностей, которые можно также найти, используя принцип таутохронизма.

*Пример расчёта двухзеркальной системы с исправленными сферической aberrацией и комой третьего порядка.*

Рассмотрим расчёт двухзеркальной системы (рис. 2.7) с использованием формул теории aberrаций третьего порядка.

Условие масштаба (на основании формулы (2.51)):

$$f' = 1,0 \quad h_1 = 1,0 \quad \text{tg } \alpha_1 = 0 \quad \text{tg } \alpha_3 = 1,0$$

Показатели преломления:

$$n_1 = 1,0 \quad n_2 = -1,0 \quad n_3 = 1,0$$

Будем исправлять в рассчитываемой системе сферическую aberrацию, кому и кривизну изображения.

Условие устранения кривизны изображения имеет вид:

$$S_{IV} = \sum_{s=1}^{s=P} \frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{n_s h_s} = 0.$$



В случае двухзеркальной системы:

$$S_{IV} = \alpha_2 - \frac{1 + \alpha_2}{h_2} = 0$$

Пусть  $\delta = 0$  (расстояние от вершины первого зеркала до изображения):

$$h_2 = -d = \frac{1}{1 - \alpha_2}$$

Подставляем значение  $h_2$  в формулу для кривизны изображения и получаем:

$$\alpha_2^2 + \alpha_2 - 1 = 0$$

$$\alpha_{1,2} = -1,618034$$

$\alpha_2 > 0$  - неприемлемое решение (рис.2.7)

$$h_2 = 0,381966$$

Составим условия устранения сферической аберрации и комы третьего порядка:

$$\left. \begin{aligned} S_I = Q_1 + h_2 Q_2 = 0 \\ S_{II} = W_1 + W_{II} - h_2 S_2 Q_2 = 0 \end{aligned} \right\}$$

Найдем значения  $W_1, W_2, W_3$

$$W_1 = \frac{\alpha_2^2}{2} \quad W_2 = \frac{1 - \alpha_2^2}{2} \quad W_1 + W_2 = \frac{1}{2}$$

$$S_2 = -\frac{d_1}{h_1} = 1,0$$

Из второго уравнения системы уравнений получаем:

$$Q_2 = \frac{1}{2h_2} = \frac{1 - \alpha_2}{2}$$

$$Q_2 = P_2 + \sigma_2 T_2$$

Находим  $T_2$  и  $P_2$

$$T_2 = \frac{(1 + \alpha_2)^3}{4} \quad P_2 = \frac{(1 - \alpha_2)^2}{4} (1 + \alpha_2)$$

Затем определим  $\sigma_2$

$$\sigma_2 = 2 \frac{1 - \alpha_2}{(1 + \alpha_2)^3} - \frac{(1 - \alpha_2)^2}{(1 + \alpha_2)^2}$$

Если  $\alpha_2 = -1,618034$ , тогда  $\sigma_2 = -40,1246$ . Подставляем значение

$Q_2 = \frac{1 - \alpha_2}{2}$  в первое уравнение и получаем

$$Q_1 = -\frac{1}{2}$$

Определяем  $T_1$  и  $P_1$

$$T_1 = \frac{\alpha_2^3}{4} \quad P_1 = -\frac{\alpha_2^3}{4}$$

Теперь находим  $\sigma_1$

$$\sigma_1 = \frac{2}{\alpha_2^3} - 1$$

При  $\alpha_2 = -1,618034$   $\sigma_1 = -1,47214$

Оба зеркала в апланатической двухзеркальной системе гиперболические.

По формуле (2.29) определяем радиусы кривизны зеркал при  $f' = 1,0$ :

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2} = \frac{2}{-1,618034} = -1,236068,$$

$$r_1 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + 1} = \frac{2 \cdot 0,381966}{-1,618034 + 1} = -1,236068$$

Расстояние между зеркалами:

$$d = \frac{1}{\alpha_2 - 1} = \frac{1}{-1,618034 - 1} = -0,381966$$

Конструктивные данные системы:

$$r_1 = -1,236068 \quad e^2 = 1,47214$$

$$d = -0,381966$$

$$r_2 = -1,236068 \quad e^2 = 40,1246$$

$$f' = 1,0, S'_{F'} = 0,381966$$

Здесь  $e^2 = -\sigma$  ( $e^2$  – квадрат эксцентриситета кривой второго порядка)

## 2.7. Предварительный расчёт из тонких линз. Введение толщин

Вариант, рассчитанный алгебраическим методом, в большинстве случаев близок к оптимальному, если в системе небольшие относительное отверстие и угловое поле. Небольшая коррекция позволяет получить систему с хорошим качеством изображения.

Полученные в результате расчёта радиусы кривизны обеспечивают получение требуемых параксиальных характеристик только при нулевых толщинах. При переходе к линзам конечной толщины необходимо сохранить параксиальные характеристики и значения углов первого параксиального луча. Расстояние между задней главной точкой предыдущего компонента и передней главной точкой последующего равно расстоянию между бесконечно-тонкими компонентами.

Последовательность перехода к линзам с конечными толщинами такова:

- определение световых диаметров линз при нулевых толщинах,
- расчет толщин реальных линз и воздушных промежутков,
- расчет первого параксиального луча,
- определение радиусов кривизны реальных линз,
- расчёт расстояний между вершинами поверхностей компонентов.

Толщина линз определяется с учётом конструктивных особенностей. Она должна обеспечивать в наиболее тонком месте линзы (рис.2.18)  $d_{min}$ . Для положительных линз – это толщина на краю линз, а для отрицательных линз – это толщина на оси. Толщина линз зависит от диаметра линз, способа крепления и требований к качеству изображения.

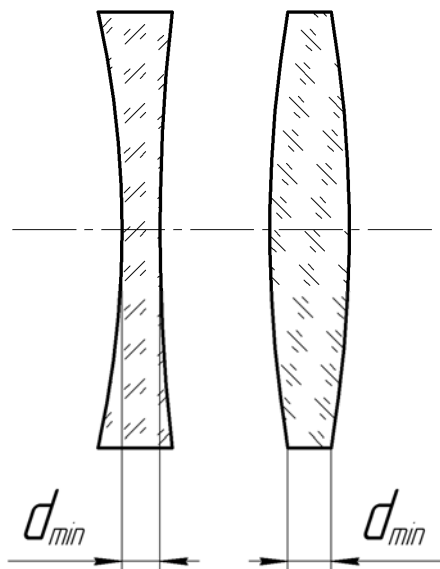


Рис. 2.18. Определение минимальных толщин линз

Отраслевой стандарт ОСТ рекомендует  $d_{min}$  для положительных линз (табл. 2.5, 2.6) и для отрицательных линз (табл. 2.7, 2.8).

Таблица 2.5

D	$d_{\min}$	D	$d_{\min}$
Св. 1 до 6	0,8	Св. 120 до 180	4,0
>> 6 >> 10	1,0	>> 180 >> 260	5,0
>> 10 >> 18	1,2	>> 260 >> 360	6,0
>> 18 >> 30	1,6	>> 360 >> 500	8,0
>> 30 >> 50	2,0	>> 500 >> 650	12,0
>> 50 >> 80	1,4	>> 650 >> 800	20,0
>> 80 >> 120	3,0		

Таблица 2.6

Форма	D, мм	$d_{\min}$ [мм] при $\Delta N$ [полос]			
		до 0,3	св. 0,3 до 0,5	св. 0,5 до 2,0	св. 2,0
Двойко- вогнутая	до 50	0,10 D	0,07 D	0,07 D	0,05 D
	св. 50 до 120 >> 120 >> 260			0,06 D	
	св. 260 до 500 >> 500 >> 650		0,06 D		0,06 D
	св. 650 до 800		0,06 D		
Выпукло- вогнутая	до 50	0,09 D	0,08 D	0,08 D	
	св. 50 до 120 >> 120 >> 260 >> 260 >> 500 >> 500 >> 650 >> 650 >> 800	0,08 D	0,06 D	0,06 D	

Таблица 2.7

D	$d_{\min}$	D	$d_{\min}$
Св. 6 до 10	0,7	>> 50 >> 80	1,5
>> 10 >> 18	0,8	>> 80 >> 100	1,8
>> 18 >> 30	1,0	>> 100 >> 120	2,0
>> 30 >> 50	1,2		

Таблица 2.8

Форма	D, мм	$d_{\min}$ , мм, при $\Delta N$ , полос	
		до 0,3	св. 0,3 до 2,0
Двойко- вогнутая	св. 6 до 30	0,06 D	0,030 D
	>> 30 >> 60	0,05 D	0,035 D
	>> 60 >> 120	0,06 D	0,040 D
Выпукло- вогнутая	до 30	0,06 D	0,040 D
	св. 30 до 120	0,07 D	0,050 D

## 2.8. Создание стартовой системы с использованием особых свойств поверхностей и линз

Использование свойств специальных поверхностей и линз – другая возможность создать стартовую систему. Этот метод, названный композицией оптических систем, предложен проф. Русиновым М.М. [10]. Метод основан на классификации оптических элементов и поверхностей по той роли, которую они выполняют в системе, он позволяет избежать введения в систему лишних элементов и неоправданного усложнения системы.

Те оптические элементы, линзы или зеркала, которые определяют оптическую силу прибора, проф. Русинов М.М. назвал *базовыми или силовыми*, а элементы, обладающие некоторой оптической силой и предназначенные для исправления кривизны поля, *коррекционно-силовыми*. Линзы или зеркала, обладающие малой или даже нулевой оптической силой, предназначенные для исправления тех или иных aberrаций, называются *коррекционными*. Это оптические элементы типа афокальных линз, афокальных менисков, пластинок Шмидта, planoидных зеркал и т.д.

Существуют поверхности и линзы, в которых отсутствуют отдельные aberrации. В некоторых случаях возможно, используя только комбинацию из специальных поверхностей и линз, получить оптическую систему. Чаще всего используются комбинации из тонких линз и линз и поверхностей с особыми свойствами.

Рассмотрим поверхности и линзы с особыми свойствами (в которых отсутствуют те или иные aberrации).

*Анаберрационные и апланатические поверхности и линзы.*

Определим форму *анаберрационной* преломляющей поверхности. Рассмотрим случай, когда предмет находится в бесконечности (рис. 2.19).

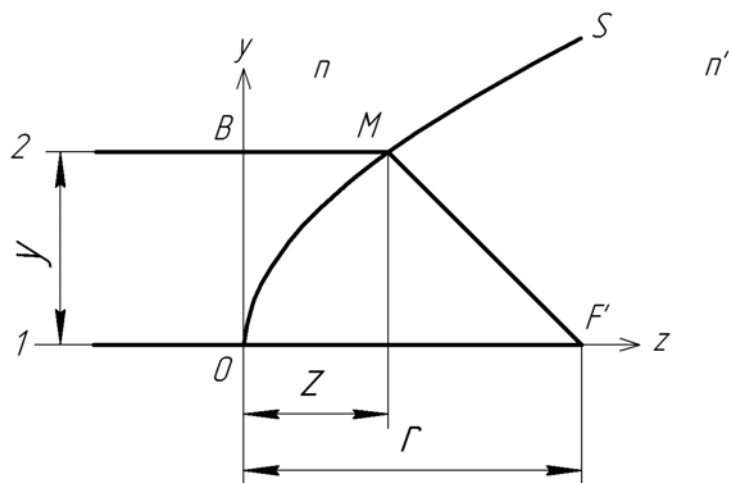


Рис. 2.19. Определение формы анаберрационной преломляющей поверхности для предмета, расположенного в бесконечности.

Воспользуемся принципом таутохронизма, когда оптическая длина хода всех лучей, идущих между двумя фиксированными волновыми поверхностями, постоянна:

$$\sum_{i=1}^{i=m+1} n_i l_i = const, \quad (2.78)$$

Положение фокуса определяет отрезок  $l'$ . Рассмотрим ход двух лучей 1 и 2, оба эти луча пересекаются в точке  $F'$ . Луч 1 - параксиальный осевой луч. Луч 2 - параллелен лучу 1 в пространстве предметов. Оптические длины хода будем рассматривать от фиксированной волновой поверхности, совпадающей с осью  $y$ . Оптическая длина хода луча 1 -  $n'l'$ , а луча 2 -  $nz + n'MF'$ .

Из условия образования точечного изображения следует:

$$nz + n'MF' = n'l'. \quad (2.79)$$

Согласно рис. 2.19:

$$MF' = \sqrt{y^2 + (l' - z)^2}. \quad (2.80)$$

Подставляем (2.80) в (2.79) и после преобразования получаем:

$$y^2 = 2\left(1 - \frac{n}{n'}\right)l'z - \left[1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2\right]z^2. \quad (2.81)$$

Уравнение (2.81) – уравнение меридиональной кривой анаберрационной несферической поверхности для бесконечно удаленного объекта.

Посмотрим, может ли (2.81) быть окружностью. Для того чтобы уравнение (2.81) было уравнением окружности, нужно, чтобы коэффициенты при  $y^2$  и  $z^2$  были бы равны, т.е.:

$$1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 = 1,$$

а это невозможно.

Для того чтобы (2.81) было уравнением параболы нужно, чтобы коэффициент при  $z^2$  был бы равен нулю:

$$1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 = 0.$$

Это возможно в том случае, если  $n = -n'$ , т.е. поверхность является отражающей, тогда уравнение меридиональной кривой поверхности будет иметь вид:

$$y^2 = 2l'z.$$

Следовательно, анаберрационной отражающей поверхностью для бесконечно удаленного объекта является параболоид, а анаберрационной преломляющей поверхностью может быть или эллипсоид или гиперboloид.

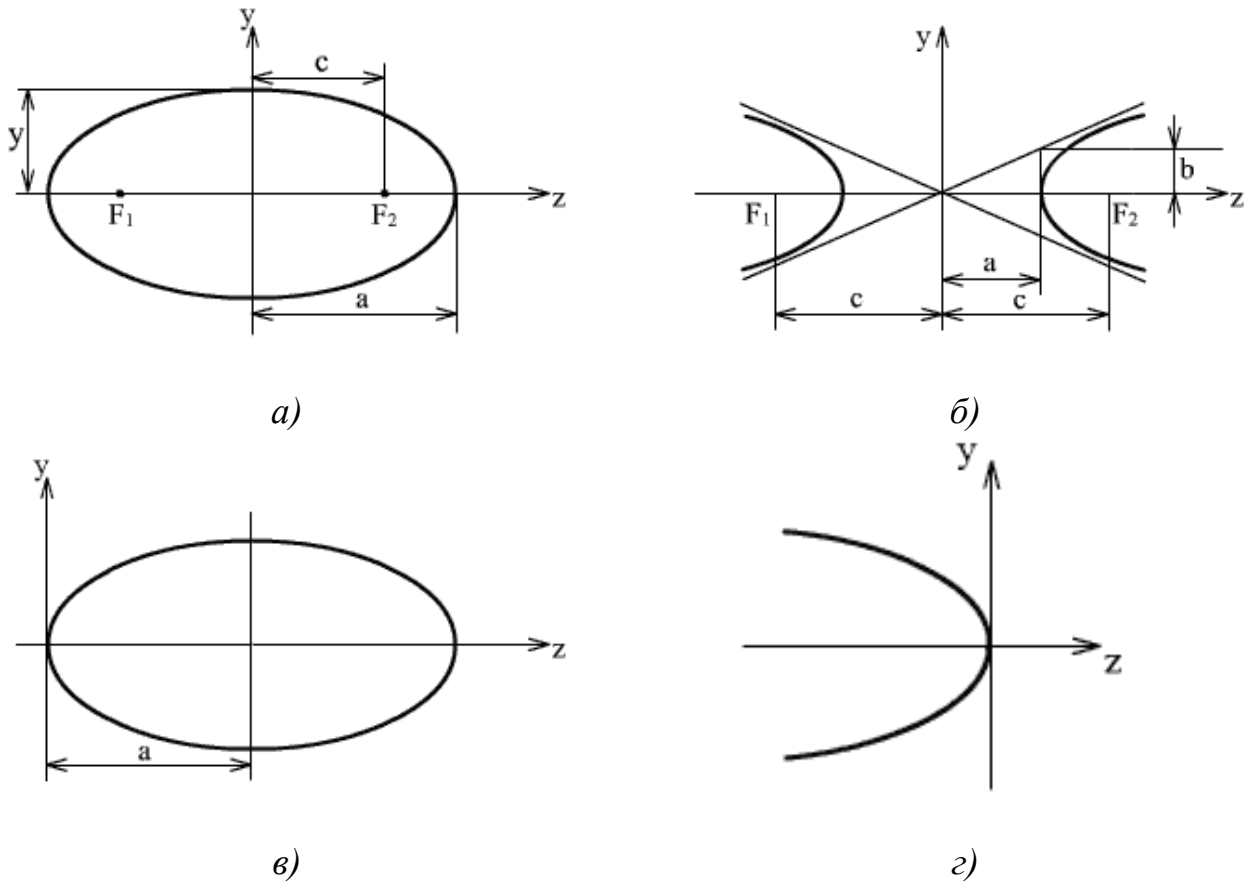


Рис. 2.20. Несферические поверхности второго порядка

Уравнение меридиональной кривой эллипсоида имеет вид:

$$\frac{z^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где  $a, b$  - полуоси эллипса.

Начало координат лежит в точке пересечения полуосей эллипса (рис. 2.20 а). Уравнение может быть записано также в виде:

$$y^2 = b^2 - \frac{b^2}{a^2} z^2.$$

Для гиперboloида (рис. 2.20 б) уравнение меридиональной кривой имеет вид:

$$\frac{z^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

или:

$$y^2 = -b^2 + \frac{b^2}{a^2} z^2.$$

Перенесем начало координат эллипсоида и гиперboloида в вершину поверхности, тогда получим для эллипсоида (рис. 2.20 в):

$$y^2 = 2\frac{b^2}{a}z - \left(\frac{b}{a}\right)^2 z^2, \quad (2.82)$$

для гиперboloида (рис. 2.20 з):

$$y^2 = -2\frac{b^2}{a}z + \left(\frac{b}{a}\right)^2 z^2. \quad (2.83)$$

Рассмотрим два возможных случая:

1. свет идет из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, т.е.  $n < n'$ ;
2. свет идет из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, т.е.  $n > n'$ .

1)  $n < n'$ . В этом случае член  $1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2$  будет положительным и уравнение будет представлять уравнение эллипса.

Сравним коэффициенты в уравнениях (2.80) и (2.81), тогда получим следующую систему уравнений:

$$2\left(1 - \frac{n}{n'}\right)l' = 2\frac{b^2}{a},$$

$$1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 = \left(\frac{b}{a}\right)^2.$$

Если  $n = 1$ ,  $n' = n$ , тогда:

$$a = \frac{l'n}{1+n}, \quad b = l' \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}, \quad c = \frac{l'}{n+1},$$

эксцентриситет эллипса равен:

$$e = \frac{c}{a} = \frac{1}{n} < 1.$$



Определим радиус кривизны в вершине поверхности:

$$r_0 = \frac{b^2}{a} = \frac{n-1}{n} l'.$$

Найдем для рассматриваемого случая максимальную величину заднего апертурного угла.

Обратимся к рис. 2.21. Из рисунка следует, что:

$$\sin \varepsilon' = \cos \sigma'_{A \max}.$$

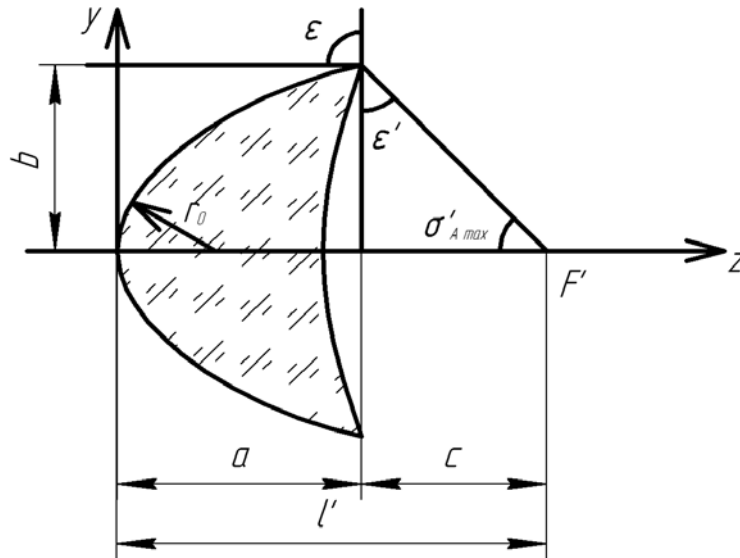


Рис. 2.21. Анаберрационная линза для предмета, расположенного в бесконечности, с эллипсоидальной первой поверхностью

По закону преломления:

$$\sin \varepsilon = n \cdot \sin \varepsilon',$$

$$\varepsilon = 90^\circ,$$

тогда:

$$\sin \varepsilon' = \frac{1}{n},$$

следовательно:

$$\cos \sigma'_{A \max} = \frac{1}{n} = e.$$

Используя анаберрационную поверхность, построим анаберрационную линзу для предмета в бесконечности (рис. 2.21).

Чтобы не внести сферическую aberrацию, вторую поверхность делаем концентричной  $F'$ . Таким образом, получили линзу с первой эллиптической поверхностью и второй сферической, в которой независимо

от высоты падения луча строго исправлена сферическая aberrация осевой точки для бесконечно удаленного предмета.

2) Рассмотрим вариант когда  $n > n'$ . в этом случае член  $1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2$  будет отрицательным и уравнение (2.81) будет представлять собой уравнение гиперболы.

Пусть  $n' = 1$ ,  $n = n$ .

Сравним коэффициенты при одинаковых степенях  $x$  в уравнениях (2.81) и (2.83), решим систему уравнений, тогда получим:

$$a = \frac{l'}{1+n}, \quad b = l' \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}, \quad c = \frac{nl'}{1+n},$$

$$l' = n, \quad r_0 = (1-n)l'.$$

Эксцентриситет гиперболы всегда больше 1.

Определим и в этом случае максимальную величину заднего апертурного угла.

Обратимся к рис. 2.22, из чертежа следует:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \operatorname{tg} \sigma'_{A \max} = \frac{b}{a},$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \cos \sigma'_{A \max} = \frac{a}{c} = \frac{1}{n}.$$

Используя анаберрационную поверхность, построим анаберрационную линзу для предмета в бесконечности (рис. 2.22).

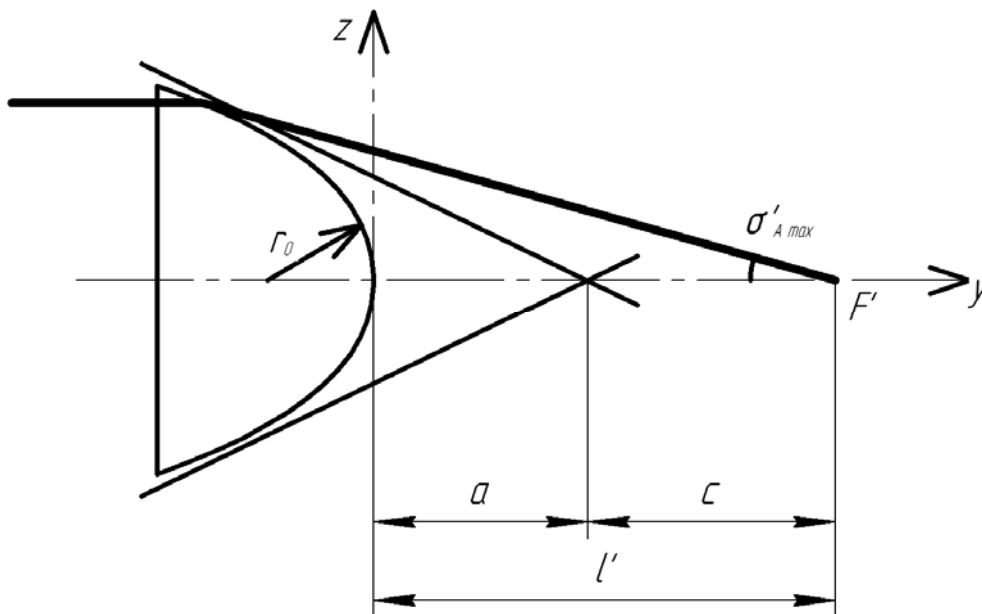


Рис. 2.22. Анаберрационная плоско-гиперболическая линза

Чтобы не внести сферической aberrации, первую поверхность делаем плоской. Таким образом, получили плоско-гиперболическую линзу, которая не вносит сферической aberrации для всех высот падения луча в случае бесконечно удаленного предмета.

Определим форму анаберрационной отражающей поверхности. Обратимся к рис. 2.23.

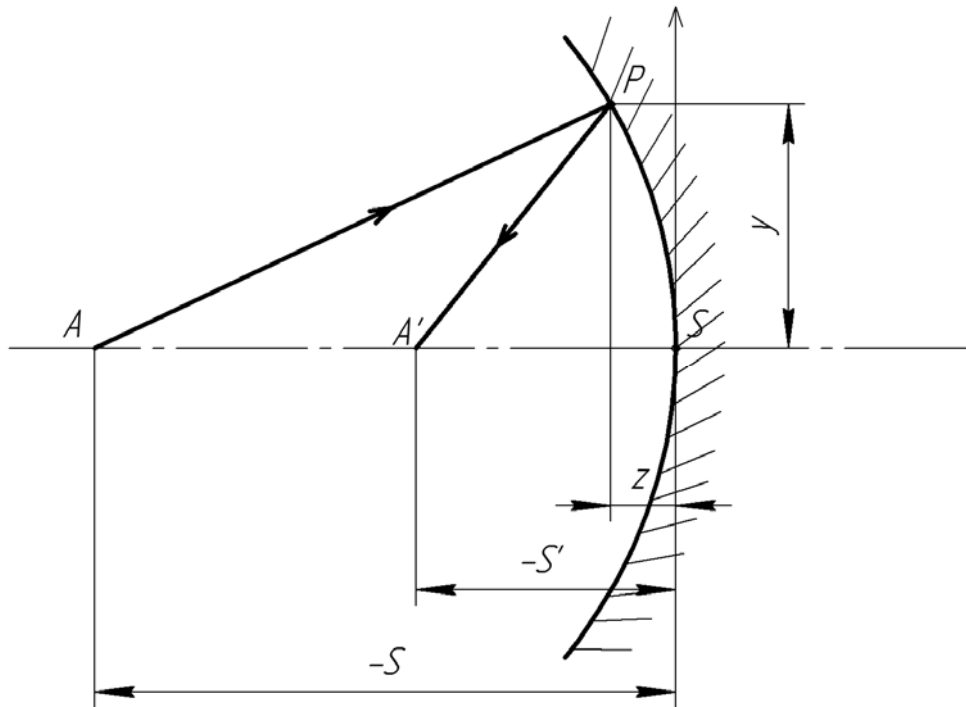


Рис. 2.23. Определение формы анаберрационной отражающей поверхности

Рассмотрим общий случай, предмет находится на конечном расстоянии (рис. 2.23). Воспользуемся принципом таутохронизма:

$$AP + PA' = const$$

Можно рассмотреть 2 луча: один луч, идущий по пути  $APA'$  и другой –  $ASA'$ . Тогда получим

$$AS + SA' = -(S + S') = AP + PA' \quad (2.84)$$

Из чертежа получим

$$AP = \sqrt{y^2 + (s - z)^2}$$

$$PA' = \sqrt{y^2 + (s' - z)^2}$$

Вследствие этого получим вместо (2.84)

$$\sqrt{y^2 + (s - z)^2} + \sqrt{y^2 + (s' - z)^2} = -(s + s')$$

Это и есть искомое уравнение кривой. Упростим это уравнение, тогда получим

$$\frac{z^3}{(s+s')^2} - \frac{z}{s+s'} + \frac{y^2}{4ss'} = 0$$

Это уравнение кривой второго порядка. Центр этой кривой находится на оптической оси. Положив  $y=0$ , найдем абсциссы точек пересечения кривой с оптической осью.

$$z_1 = 0; z_2 = s + s'$$

Находим абсциссу центра кривой

$$z_c = \frac{1}{2}(s + s')$$

Перенесём начало координат в центр кривой, что бы привести уравнение к нормальному виду. После преобразования получаем

$$\frac{z^2}{\left(\frac{s+s'}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{ss'} = 1 \quad (2.85)$$

Если отрезки  $S$  и  $S'$  имеют один и тот же знак, то уравнение представляет собой уравнение эллипса. Его полуоси равны

$$a = \frac{s+s'}{2}; b = \sqrt{ss'} \quad (2.86)$$

Если отрезки  $S$  и  $S'$  имеют разные знаки, то уравнение (2) становится уравнение гиперболы, полуоси которой определяются по формулам

$$a = \frac{s+s'}{2}; b = \sqrt{-ss'}$$

На рис. 2.24 и 2.25 показаны оба случая. Если предмет и изображение действительные, то анаберрационной отражающей поверхностью является эллиптическая. В том случае, если предмет действительный, а изображение мнимое или наоборот, предмет мнимый, а изображение действительное, анаберрационной отражающей поверхностью является гиперболическая.

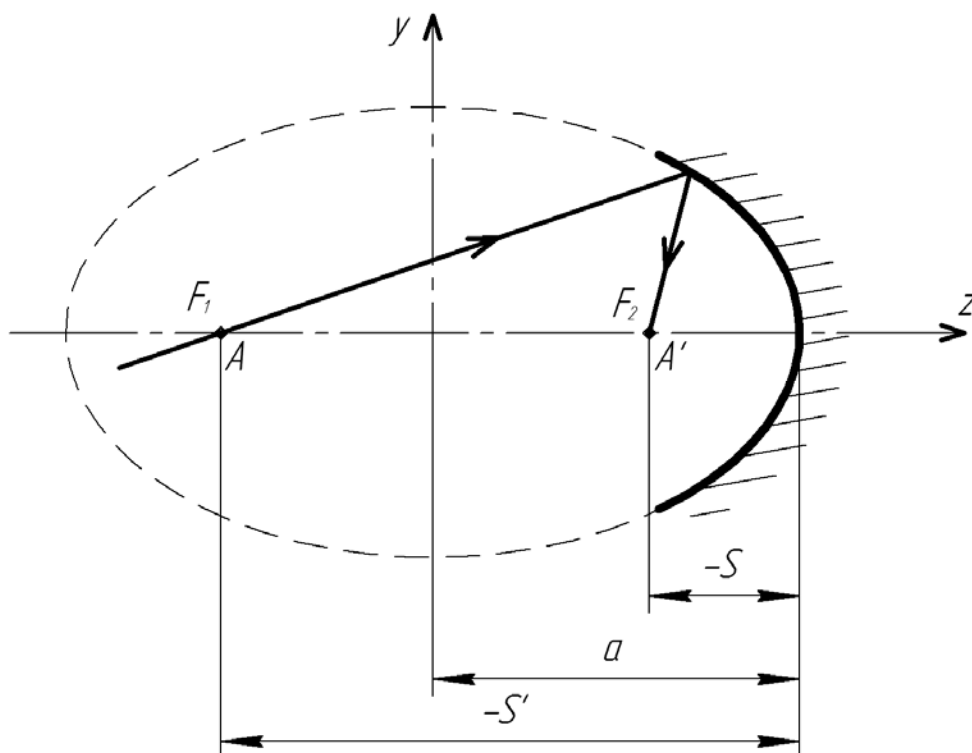


Рис. 2.24. Эллиптическая анаберрационная отражающая поверхность

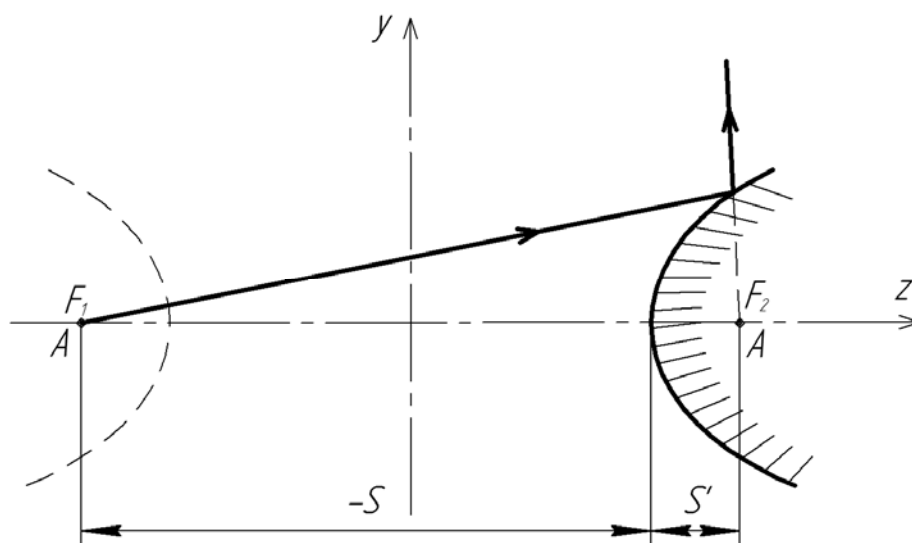


Рис. 2.25. Гиперболическая анаберрационная отражающая поверхность

Для предмета, находящегося в бесконечности, анаберрационной отражающей поверхностью является параболическая. У сферы анаберрационные точки  $A$  и  $A'$  находятся в центре кривизны поверхности и совпадают (рис. 2.26).

Таким образом, осесимметричные поверхности второго порядка имеют анаберрационные точки, которые находятся в геометрических фокусах этих поверхностей.

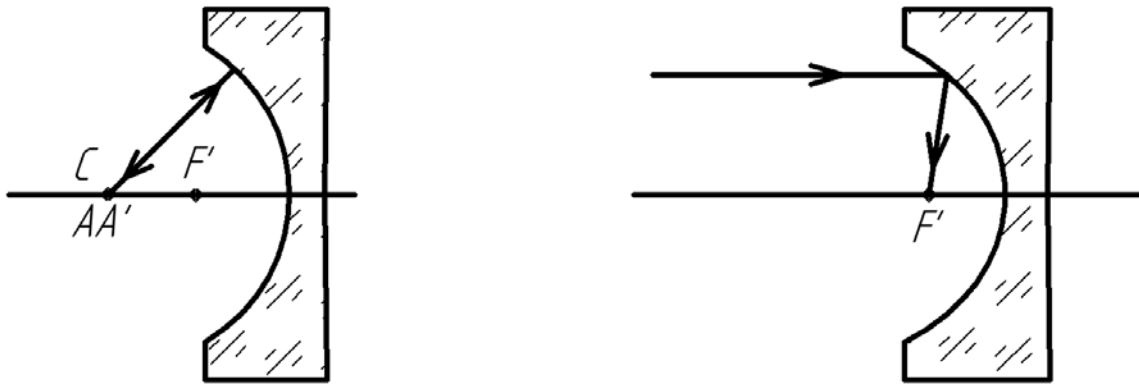


Рис. 2.26. Анаберрационные точки сферы и параболы.

Анаберрационные зеркальные системы.

В системе Кассегрена (рис. 2.27) первая поверхность параболическая, а вторая – гиперболическая.

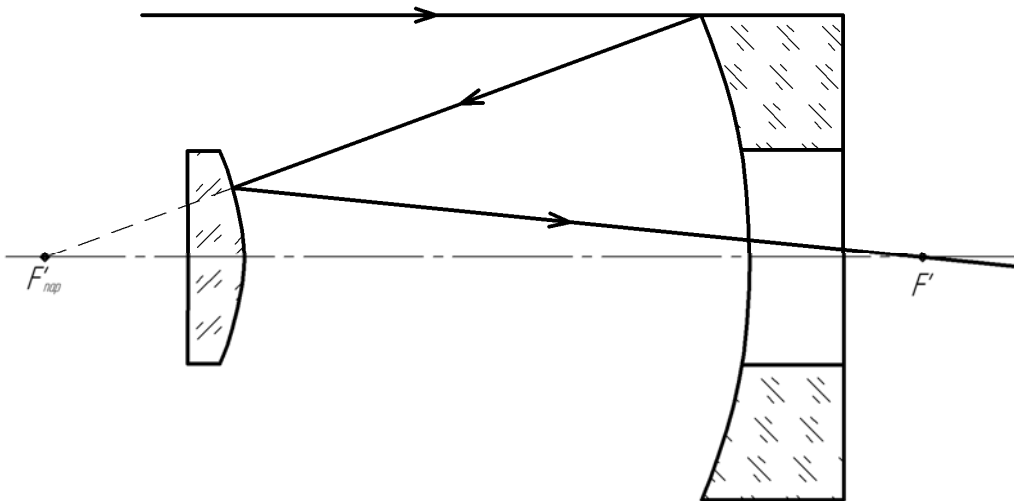


Рис. 2.27. Система Кассегрена.

Качество изображения в центре поля идеальное. Угловое поле системы небольшое из-за неисправленной комы.

В системе Грегори (рис. 2.28) первое зеркало параболическое, а второе – эллиптическое.

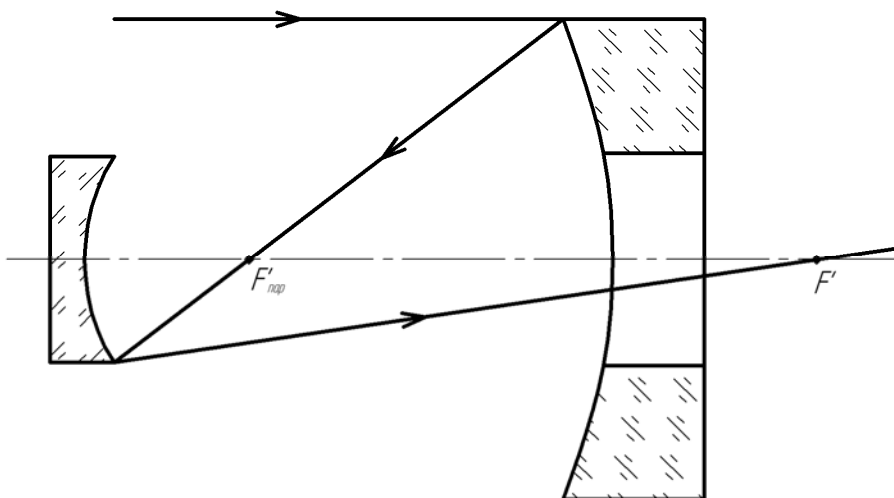


Рис. 2.28. Система Грегори.

Объектив имеет действительное промежуточное изображение в фокальной плоскости параболоида, в результате этого система даёт прямое изображение.

В системе Грегори так же, как и в системе Кассегрена, маленькое угловое поле из-за комы. Объектив Кассегрена короче объектива Грегори, поэтому находит большее применение.

Показанная на рис. 2.29 система Мерсенна является телескопической, поэтому первое и второе зеркала – параболические.

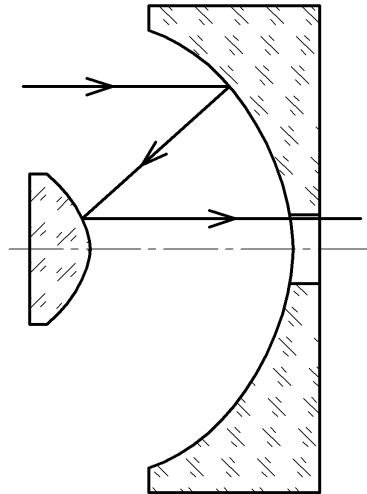


Рис. 2.29. Система Мерсенна.

Система может использоваться в качестве насадки на объектив и для уменьшения расходимости лазерных пучков.

**Апланатические точки сферической преломляющей поверхности.**

У каждой сферической поверхности есть три пары точек, в которых сферическая аберрация отсутствует. Эти точки называются анаберрационными. В дальнейшем будет показано, что эти точки являются апланатическими.

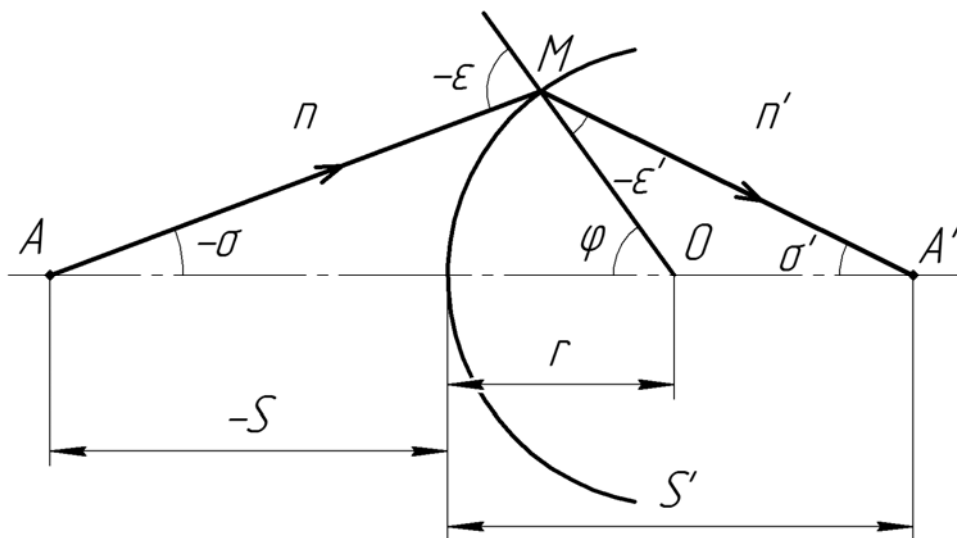


Рис. 2.30. Преломляющая сферическая поверхность

Обратимся к рис. 2.30. Из  $\triangle AMO$  следует:

$$\begin{aligned}
 -\sigma + \phi &= -\varepsilon, \\
 \frac{-S + r}{r} &= \frac{\sin \varepsilon}{\sin \sigma}, \\
 \phi &= \sigma - \varepsilon.
 \end{aligned}
 \tag{2.87}$$

Из  $\triangle OMA'$  получаем:

$$\begin{aligned}
 -\varepsilon' + \sigma' &= \phi, \\
 \frac{S' - r}{r} &= -\frac{\sin \varepsilon'}{\sin \sigma'},
 \end{aligned}
 \tag{2.88}$$

$$\phi = \sigma' - \varepsilon'.
 \tag{2.89}$$

В общем случае при изменении угла  $\sigma$  отрезок  $S'$  меняется.

Из (2.88) получаем:

$$S' = r \left( 1 - \frac{\sin \varepsilon'}{\sin \sigma'} \right).
 \tag{2.90}$$

Условие отсутствия сферической аберрации:

$$\begin{aligned}
 S' &= \text{const}, \\
 \frac{\sin \varepsilon'}{\sin \sigma'} &= m = \text{const}.
 \end{aligned}$$

Поставленное условие может быть выполнено, если  $m = -\frac{n}{n'}$  и

$$-\sin \sigma' = \sin \varepsilon, \text{ так как } \frac{\sin \varepsilon'}{\sin \varepsilon} = \frac{n}{n'}.$$

$$\frac{\sin \varepsilon'}{\sin \sigma'} = \frac{n}{n'},
 \tag{2.91}$$

$$\sigma' = -\varepsilon.
 \tag{2.92}$$

Подставляя (2.30) в (2.29), получаем:

$$\begin{aligned}
 S' &= r + r \frac{\sin \varepsilon'}{\sin \varepsilon} = r + r \frac{n}{n'} = r \frac{n' + n}{n'}, \\
 S' &= r \frac{n + n'}{n'}
 \end{aligned}
 \tag{2.93}$$

Используя инвариант Аббе для параксиальной области (2.33):



$$n' \left( \frac{1}{S'} - \frac{1}{r} \right) = n \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{r} \right), \quad (2.94)$$

находим значение переднего отрезка  $S$ :

$$S = r \frac{n'+n}{n}. \quad (2.95)$$

Приравнявая (2.87) и (2.89) и принимая во внимание  $\sigma' = -\varepsilon$ , получаем:

$$\sigma = -\varepsilon'. \quad (2.96)$$

Вторая пара анаберрационных точек находится в центре кривизны поверхности. Лучи проходят не преломляясь, сферическая аберрация отсутствует:  $S = r$ ,  $S' = r$ .

Третья пара анаберрационных точек находится в вершине поверхности:  $S = 0$ ,  $S' = 0$ .

Рассмотрим положение анаберрационных точек на примере рис. 2.31.

Пусть  $r = 50$ ,  $n = 1$  и  $n' = 1,5182$ . Применяя формулы (2.32) и (2.34), получаем  $S = 125,91$ ,  $S' = 89,93$ . Предметная точка  $A_1$  получилась мнимая, а точка изображения  $A'_1$  - действительная.

Вторая пара анаберрационных точек  $A_2$  и  $A'_2$  совпадает с центром кривизны  $O$ ,  $S = S' = 50$ .

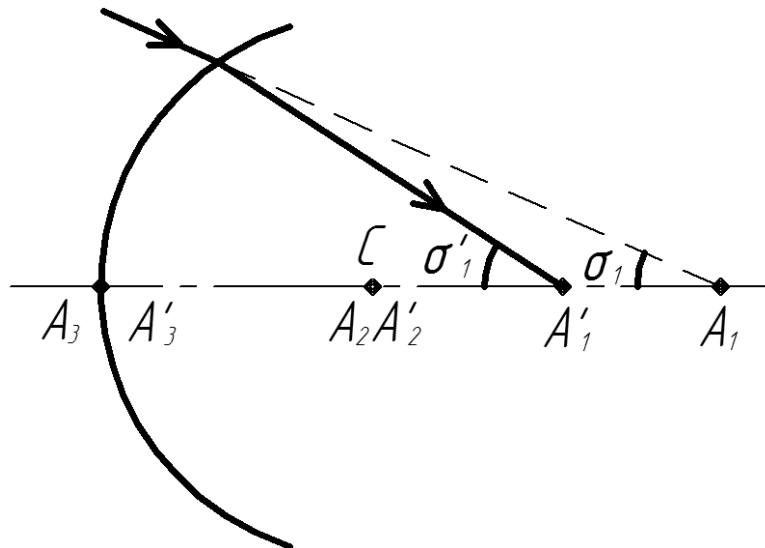


Рис. 2.31. Анаберрационные точки сферической поверхности

Третья пара  $A_3$  и  $A'_3$  находится в вершине поверхности  $S = S' = 0$ .

Определим линейное увеличение для трех пар аберрационных точек. Воспользуемся инвариантом Лагранжа-Гельмгольца. На рис. 2.32 приведена идеальная оптическая система.

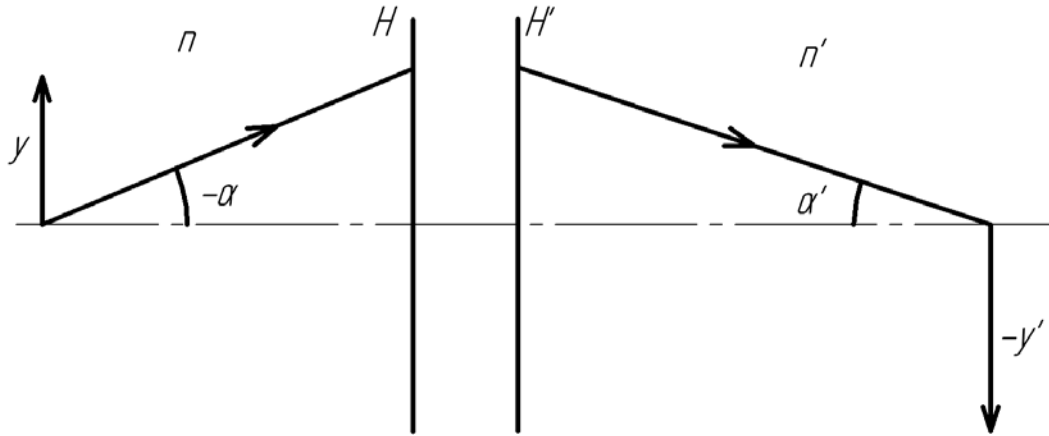


Рис. 2.32. Идеальная оптическая система

Инвариант Лагранжа-Гельмгольца имеет вид:

$$n \cdot \alpha \cdot y = n' \cdot \alpha' \cdot y'. \quad (2.97)$$

Линейное увеличение равно:

$$\beta = \frac{y}{y'} = \frac{n \cdot \alpha}{n' \cdot \alpha'}.$$

Для первой пары анаберрационных точек имеем:

$$\beta = \frac{n \cdot \sigma}{n' \cdot \sigma'} = \frac{n \cdot \varepsilon'}{n' \cdot \varepsilon} = \left( \frac{n}{n'} \right)^2,$$

$$n \cdot \varepsilon = n' \cdot \varepsilon'.$$

Для точки в вершине поверхности получаем:

$$\beta = \frac{n \cdot \varepsilon}{n' \cdot \varepsilon'} = 1.$$

Для второй пары анаберрационных точек  $\sigma = \sigma'$  и увеличение равно:

$$\beta = \frac{n \cdot \sigma}{n' \cdot \sigma'} = \frac{n}{n'}.$$

Проверим, выполняется ли условие синусов для анаберрационных точек сферической преломляющей поверхности. Если предмет находится на конечном расстоянии, то условие синусов считается выполненным, если линейное увеличение  $\beta$ , определенное по формуле (2.98), и  $\beta_0$  - линейное увеличение, найденное по формулам параксиальной оптики, равны.

$$\Delta\beta = \beta - \beta_0 = 0.$$

$$\beta = \frac{n \cdot \sin \sigma}{n' \cdot \sin \sigma'}. \quad (2.98)$$

Первая пара анаберрационных точек:

$$\beta = \left( \frac{n}{n'} \right)^2, \quad \sigma = -\varepsilon', \quad \sigma' = -\varepsilon,$$

$$\frac{n}{n'} = \frac{\sin \varepsilon'}{\sin \varepsilon} = \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'},$$

$$\beta = \frac{n \cdot \sin \sigma}{n \cdot \sin \sigma'} - \text{условие синусов выполняется;}$$

Вторая пара анаберрационных точек:

$$\beta = \frac{n}{n'}, \quad \sigma = \sigma'$$

$$\beta = \frac{n \cdot \sin \sigma}{n \cdot \sin \sigma'} - \text{условие синусов выполняется.}$$

Третья пара анаберрационных точек:

$$\beta = 1, \quad \sigma = \varepsilon, \quad \sigma' = \varepsilon',$$

$$\beta = \frac{n \cdot \sin \varepsilon}{n' \cdot \sin \varepsilon'} = \frac{n \cdot \sin \sigma}{n \cdot \sin \sigma'} - \text{условие синусов выполняется;}$$

Таким образом, доказано, что полученные анаберрационные точки являются апланатическими.

Рассмотрим линзы, построенные с использованием апланатических поверхностей. Поверхность, построенная с использованием второй пары апланатических точек, называется концентрической.

Пусть первая поверхность будет концентрической, а вторая – апланатической (рис. 2.33 а). В этой линзе для первой поверхности  $\beta_1 = \frac{1}{n}$ , для второй поверхности  $\beta_2 = n^2$ , общее увеличение  $\beta = \beta_2 \cdot \beta_1 = n$ . Этот мениск широко применяется в микрообъективах и конденсорах. Он снижает числовую апертуру последующей части оптической системы в  $n$  раз, не внося при этом сферической аберрации и комы.

Мениск, показанный на рис. 2.33 б, имеет первую поверхность апланатическую, а вторую – концентрическую. Соответственно получаем:

$$\beta_1 = \frac{1}{n^2}, \quad \beta_2 = n, \quad \beta = \beta_2 \cdot \beta_1 = \frac{1}{n}.$$

Этот мениск применяется в широкоугольных системах для увеличения угловых полей.

В мениске на рис. 2.33 в обе поверхности концентрические. В нем  $\beta_1 = \frac{1}{n}$ ,  $\beta_2 = n$ ,  $\beta = \beta_2 \cdot \beta_1 = 1$ .

В мениске на рис. 2.33 з обе поверхности апланатические. Увеличения равны:  $\beta_1 = \frac{1}{n^2}$ ,  $\beta_2 = n^2$ ,  $\beta = \beta_2 \cdot \beta_1 = 1$ .

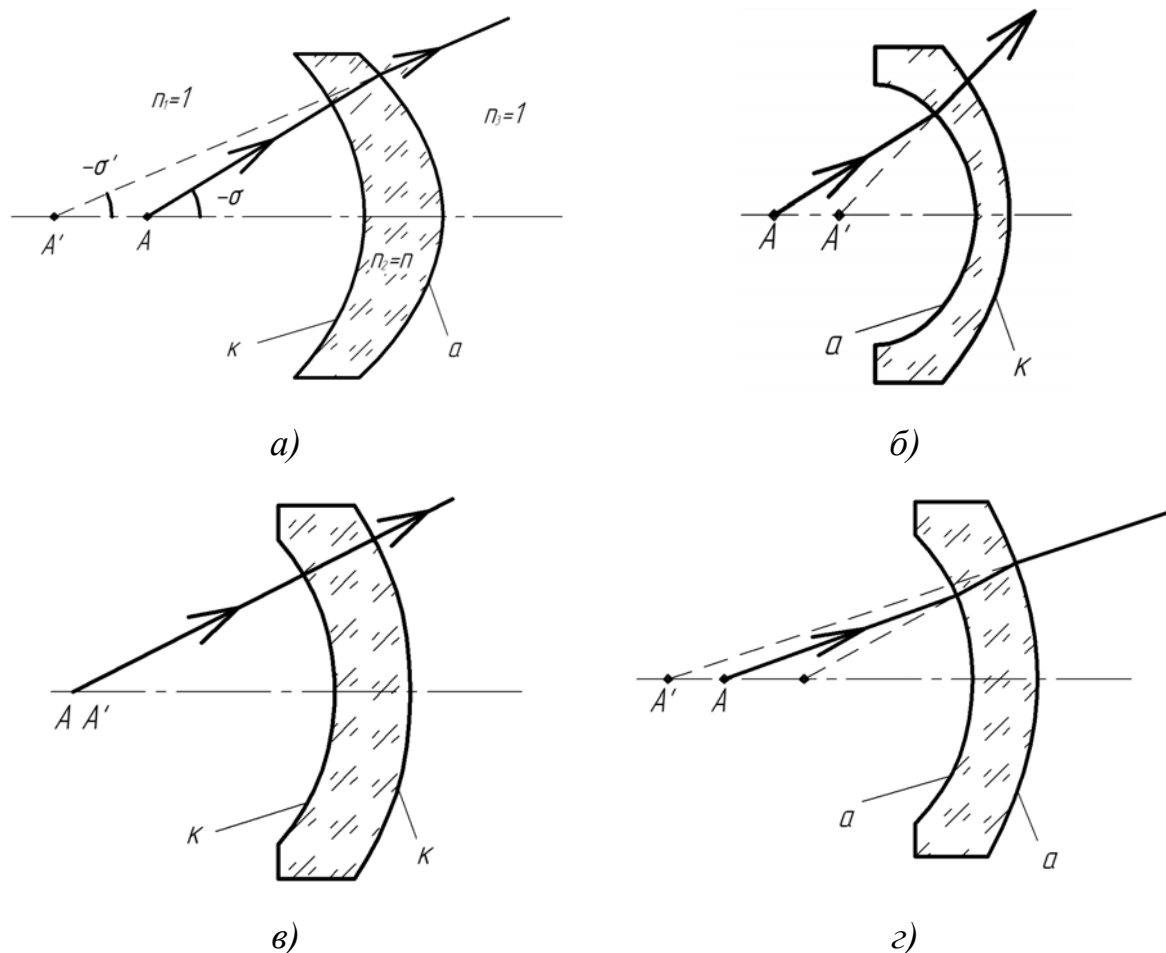


Рис. 2.33. Апланатические сферические линзы

*Сферические линзы, свободные от комы и астигматизма.*

При разработке фотообъективов и окуляров удобно исходить из простейших базовых линз, исправленных на кому и астигматизм. Одновременное исправление этих aberrаций для линз возможно в том случае, если обе поверхности будут апланатическими или концентрическими к зрачкам или к апертурной диафрагме.

Рассмотрим такие линзы:

1) плосковыпуклая линза, обращённая плоскостью к бесконечно удалённому предмету (рис.2.34). При параллельном ходе наклонного пучка лучей плоская поверхность не вносит астигматизма и комы, при

преломлении на плоской поверхности параллельность пучка не нарушается. Источником возникновения комы и астигматизма может служить только вторая сферическая поверхность. Чтобы этого не произошло нужно направить главный луч нормально к сферической поверхности. При таком ходе главного луча не нарушается симметрия строения пучка лучей и, следовательно, не возникнут астигматизм и кома.

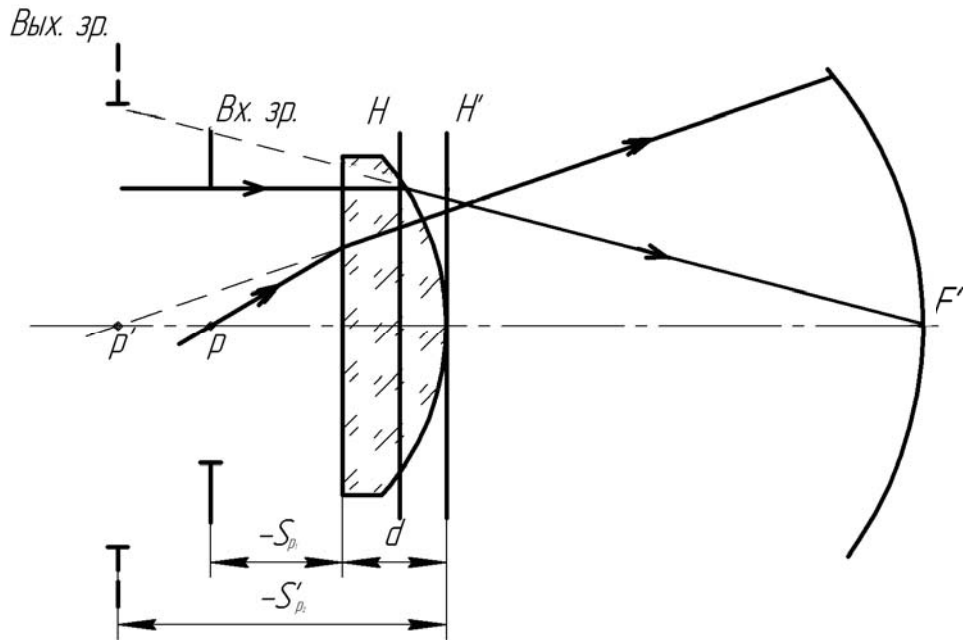


Рис.2.34 Плосковыпуклая линза с вынесенным зрачком, свободная от астигматизма и комы

Эта линза является единственной базовой линзой с вынесенным вперёд зрачком. Радиус кривизны поля равен  $R = -n \cdot f'$ , сферическая aberrация отрицательная и постоянная по полю, хроматизм положения равен  $f' / \nu$ .

Пример:

$f' = 50$  мм,  $r_2 = -25$  мм,  $S_{p_1} = -13,33$  мм,  $S'_{p_2} = -25$  мм,  $n = 1,5$ ,  $d = 5$  мм,  $\beta_p = 1,5$ , где  $\beta_p$  – увеличение в зрачках.

2) апланатический мениск с передней концентрической и второй апланатической поверхностью к зрачкам и апертурной диафрагме (рис.2.35).

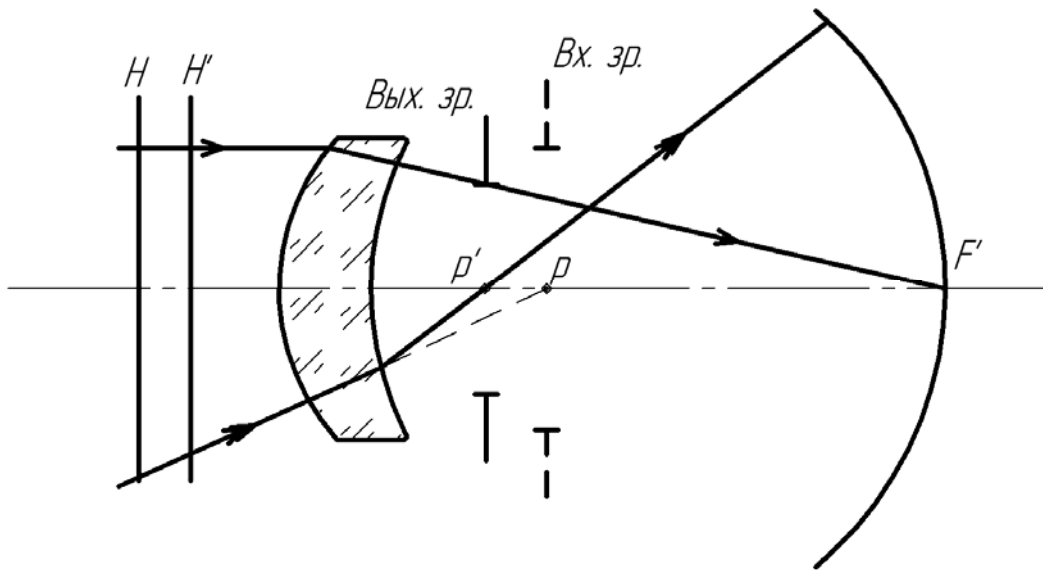


Рис. 2.35. Апланатический мениск, свободный от астигматизма и комы

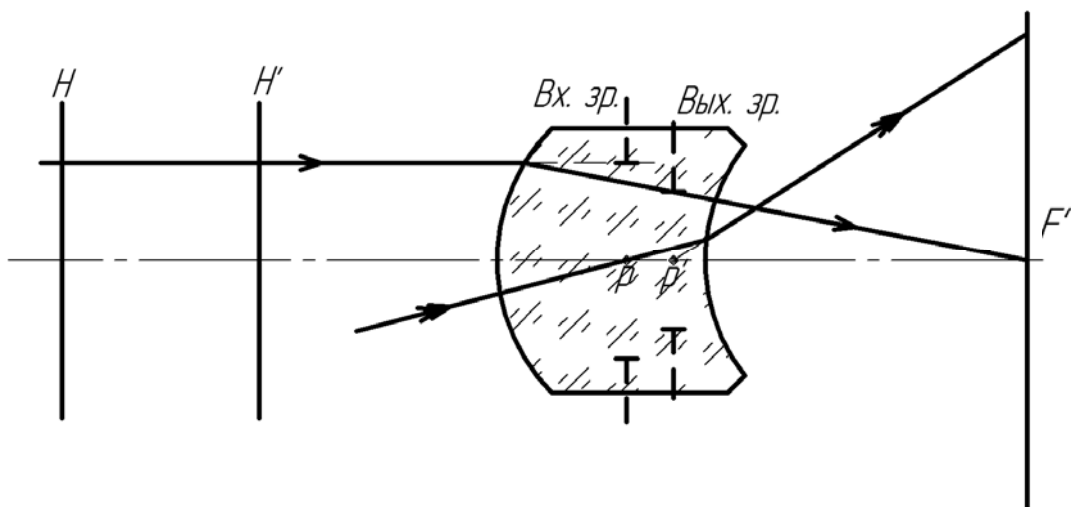
Пример:

$$f' = 100 \text{ мм}, \quad r_1 = 22,222 \text{ мм}, \quad r_2 = 33,7 \text{ мм}, \quad d = 10,5 \text{ мм}, \quad S_{p_1} = 22,22 \text{ мм}, \\ S'_{p_2} = 8,84 \text{ мм}, \quad \beta_p = 0,754, \quad n = 1,5.$$

3) толстый апланатический мениск с равными радиусами (рис.2.36). Первая поверхность концентрическая, а вторая апланатическая к зрачкам линзы. Кривизна изображения отсутствует.

Пример:

$$f' = 100, \quad n = 1,5, \quad r_1 = r_2 = 22,22 \text{ мм}, \quad d = 29,6 \text{ мм}, \quad S_{p_1} = 22,22 \text{ мм}, \\ S'_{p_2} = -4,43 \text{ мм}, \quad \beta_p = 0,6.$$





Несферические поверхности имеют в сагиттальном и меридиональном сечениях различные действующие радиусы кривизны (рис. 2.38). Это не значит, что поверхность имеет в двух взаимно перпендикулярных плоскостях разные радиусы кривизны.

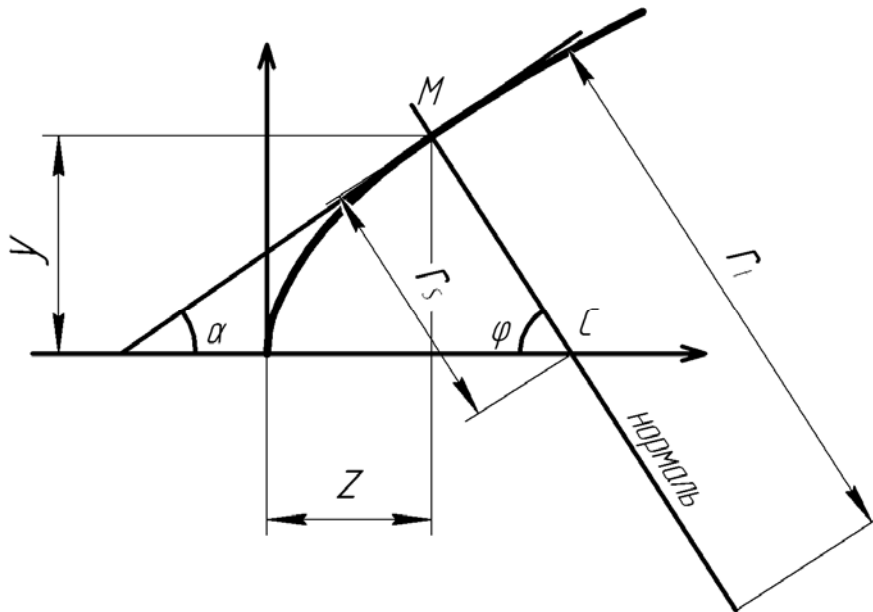


Рис. 2.38. Радиусы кривизны несферических поверхностей

Поверхность является осесимметричной и радиус кривизны поверхности определяется по формуле:

$$r_i = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{-y''}, \quad \text{где: } y' = \left(\frac{dy}{dz}\right), \quad y'' = \left(\frac{d^2y}{dz^2}\right).$$

Этот радиус кривизны называют меридиональным, он входит в меридиональный инвариант.

$r_s$  - длина нормали  $MC$ , поскольку эта величина входит в сагиттальный инвариант, ее называют сагиттальным радиусом кривизны.

Из рис. 2.38 следует:

$$r_s = \frac{y}{\sin \varphi}.$$

Из аналитической геометрии известно, что  $\operatorname{tg} \alpha = y'$ , где  $\alpha$  - угол наклона касательной к кривой.

Из рис. 2.38 следует:

$$\sin \varphi = \frac{1}{\pm \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi}}, \quad \operatorname{ctg} \varphi = y', \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{1}{y'}, \quad \sin \varphi = \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + y'^2}}.$$



Тогда  $r_s = \frac{y}{\cos \alpha} = y\sqrt{1 + y'^2}$ .

Следовательно:

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}, \quad r_t = -\frac{r_s^3}{y^3 y''}.$$

Рассмотрим радиусы кривизны кривых второго порядка.

Уравнение кривой второго порядка имеет вид:

$$y^2 = a_1 z + a_2 z^2.$$

Учитывая, что  $a_1 = 2r_0$ , можно записать:

$$y^2 = 2r_0 z + a_2 z^2.$$

Продифференцируем это уравнение, тогда получим:

$$2yy' = 2r_0 + 2a_2 z,$$

откуда:

$$y' = \frac{r_0 + a_2 z}{y}.$$

Продифференцируем уравнение второй раз, тогда будем иметь:

$$y'^2 + yy'' = a_2,$$

откуда:

$$y'' = \frac{a_2 - y'^2}{y},$$

$$yy'' = a_2 - y'^2, \text{ и:}$$

$$yy'' = \frac{a_2(2r_0 z + a_2 z^2) - (r_0 + a_2 z)^2}{y^2}.$$

После преобразования последнего выражения получим:

$$y^3 y'' = -r_0^2.$$

Подставим полученное значение  $y^3 y''$  в общую формулу, справедливую для всех несферических поверхностей:

$$r_t = -\frac{r_s^3}{y^3 y''},$$

тогда получим:

$$r_t = \frac{r_s^3}{r_0^2}. \quad (2.101)$$

При предмете в бесконечности

$$t = S = \infty$$

Условие устранения астигматизма имеет вид

$$t' = S' \quad (2.102)$$

Подставим значения  $t$  и  $S$  в (2.98) и (2.99), тогда получим:

$$S' = \frac{n' r_s}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}$$

$$t' = \frac{n' \cos^2 \varepsilon' r_m}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}$$

Принимая во внимание (2.101), получим

$$r_s = r_m \cos^2 \varepsilon' \quad (2.103)$$

Это есть условие коррекции астигматизма с помощью асферической поверхности любого порядка.

Подставляем (2.101) в (2.103) и после преобразования получаем:

$$r_0 = \pm r_s \cos \varepsilon' \quad (2.104)$$

Формула (2.104) определяет условие коррекции астигматизма с помощью кривых второго порядка.

*Определение положения зрачков, дающих исправление астигматизма*

Обратимся к рис. 2.39.  $S'_p$  – расстояние от вершины поверхности до выходного зрачка,  $MC$  – нормаль. Из чертежа 2.39 следует:

$$S'_p = +y \cdot \operatorname{ctg} \omega' = z + y \cdot \operatorname{ctg}(\phi + \varepsilon'), \text{ т.к.} \quad (2.105)$$

$$\phi = \omega' - \varepsilon', \quad \omega' = \phi + \varepsilon$$

Ранее было получено:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{y}{r_0 + \alpha_2 z},$$

$$r_s = \frac{y}{\sin \phi}, \quad (2.106)$$

$$\cos \varepsilon' = \pm \frac{r_0}{r_s} \quad (2.107)$$

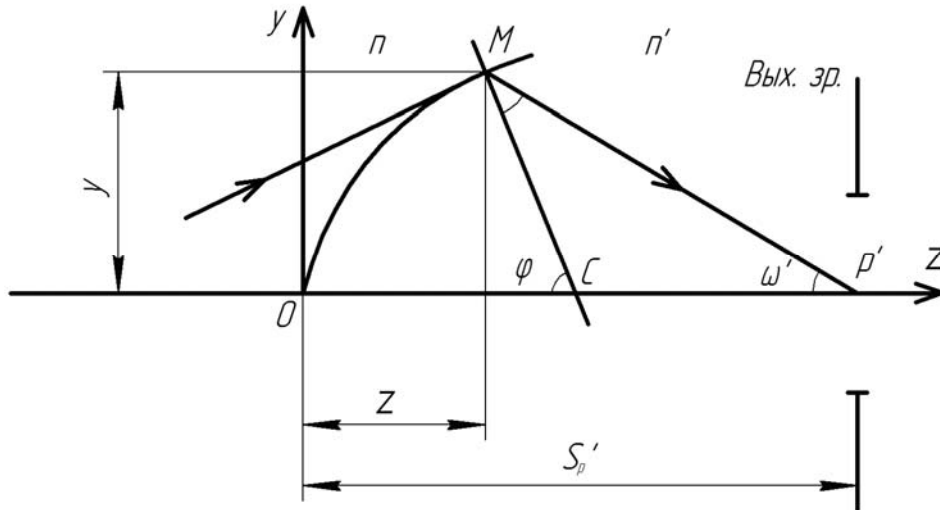


Рис. 2.39. Определение положения анастигматических зрачков

Очень часто уравнение меридиональной кривой поверхности второго порядка записывают в виде

$$y^2 = 2r_0z + Bz^2 \quad (2.108)$$

Будем применять в дальнейшем тоже такую запись, тогда

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y}{r_0 + Bz} \quad (2.109)$$

Подставим (2.106) в (2.107), в результате получим

$$\cos \varepsilon' = \pm \frac{r_0 \sin \varphi}{y} \quad (2.110)$$

Подставим значение  $y$  из уравнения (2.109) в (2.110), тогда получим

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{2r_0z + Bz^2}}{r_0 + Bz} \quad (2.111)$$

После определения  $\operatorname{tg} \varphi$  можно найти  $\sin \varphi$ .  $\sin \varphi$  подставляем в (2.110) и находим  $\cos \varepsilon'$ . Затем можно определить  $\operatorname{tg} \varepsilon'$ . Все эти преобразования делать не будем, а запишем окончательное значение  $\operatorname{tg} \varepsilon'$ .

$$\operatorname{tg} \varepsilon' = \pm \frac{1}{r_0} \sqrt{(1+B)(2r_0 + Bz) \cdot z} \quad (2.112)$$

Затем подставляем значения  $\operatorname{tg} \varepsilon'$  и в  $\operatorname{tg} \varphi$  (2.105) и определяем  $S_p'$ . Запишем окончательное значение  $S_p'$ .

$$S'_p = -\frac{r_0}{B} \left(1 \pm \sqrt{1+B}\right) \quad (2.113)$$

Полученная формула (2.113) определяет наложение выходного анастигматического зрачка для предмета в бесконечности.

Из формулы (2.113) видно, что положение зрачка не зависит от углов падения луча, это значит, что астигматизм исправлен для всех углов. Положение анастигматического зрачка не зависит также от показателей преломления.

Исследуем полученное выражение (2.113). Из него следует, что несферическая поверхность имеет не один анастигматический выходной зрачок, а два, положение которых определяется выражениями:

$$[S'_p]_1 = -\frac{r_0}{B} \left(1 + \sqrt{1+B}\right)$$

$$[S'_p]_2 = -\frac{r_0}{B} \left(1 - \sqrt{1+B}\right)$$

Получим сумму и разность

$$[S'_p]_1 + [S'_p]_2 = -\frac{2r_0}{B}$$

$$[S'_p]_1 - [S'_p]_2 = -2\frac{r_0}{B} \sqrt{1+B}$$

Ранее были получены формулы для определения  $a$ ,  $b$  и  $c$  кривых второго порядка из уравнения  $y^2 = 2r_0z + Bz^2$

$$a = -\frac{r_0}{B}, \quad b = \frac{r_0}{B} \sqrt{B}, \quad c = -\frac{r_0}{B} \sqrt{1+B}$$

Отсюда следует

$$\begin{aligned} [S'_p]_1 + [S'_p]_2 &= 2a \\ [S'_p]_1 - [S'_p]_2 &= 2c \end{aligned} \quad (2.114)$$

Обратимся к рис. 2.40. Из чертежа следует

$$\begin{aligned} l_1 + l_2 &= 2a \\ l_2 - l_1 &= 2c \end{aligned} \quad (2.115)$$

Из сравнения (2.114) и (2.115) можно сделать вывод, что анастигматические выходные зрачки лежат на месте фокусов кривых второго порядка.

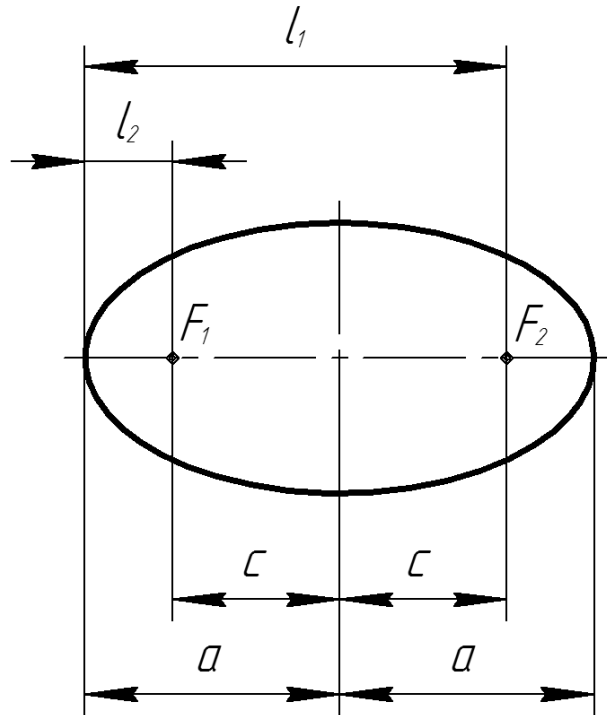


Рис. 2.40. Положение анастигматических зрачков в эллипсоиде

Положение выходных зрачков и ход главного луча после преломления или отражения на поверхностях вращения второго порядка показаны на рис. 2.41 где  $a$  и  $b$  – эллиптическая поверхность,  $v$  и  $z$  – гиперболическая поверхность,  $d$  и  $e$  – параболическая поверхность.

Для параболы  $y^2 = 2r_0z$ , следовательно  $\operatorname{tg}\varphi = \frac{y}{r_0}$ , а принимая во внимание

$$\cos \varepsilon' = \pm \frac{r_0}{r_s}, \quad r_s = \frac{y}{\sin \varphi}, \quad \text{получим}$$

$\cos \varepsilon' = \pm \cos \varphi$ , следовательно

$$\varepsilon' = \pm \varphi \tag{2.116}$$

Подставим (12) в  $S'_p = z + y \cdot \operatorname{ctg}(\varphi + \varepsilon')$ , после преобразования получим

$$[S'_p]_1 = \frac{r_0}{2}, \quad [S'_p]_2 = \infty$$

Что касается сферы, то она имеет анастигматический выходной зрачок, лежащий на месте центра кривизны.

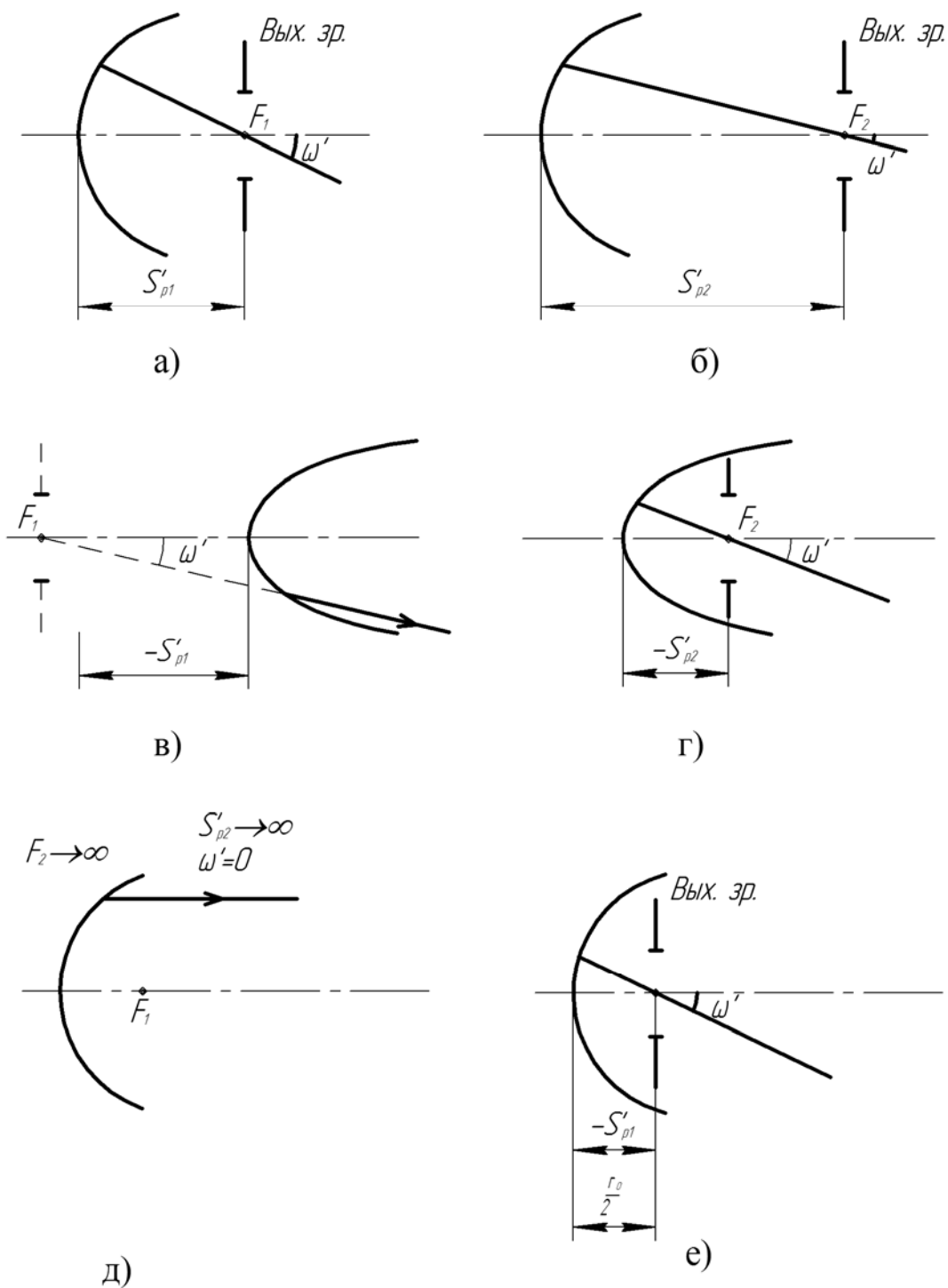


Рис. 2.41. Положение выходных анастигматических зрачков в поверхностях второго порядка

При исследовании зеркальных поверхностей оказалось, что можно задать произвольное положение предмета и получить условие отсутствия астигматизма. Это условие следующее: главный луч должен проходить через анастигматические зрачки – геометрические фокуса кривых второго порядка.

Рассмотренное свойство кривых второго порядка использовано при построении широкоугольных систем. Эти системы могут иметь угловое поле порядка  $200^\circ$ . Они состоят из зеркальной насадки, которая уменьшит угловое поле с  $200^\circ$ - $160^\circ$  до углового поля фотообъектива, не внося при этом астигматизма, потому что зрачки расположены в геометрических фокусах кривых второго порядка.

*Аберрации тонкой линзы со сферическими поверхностями для предмета, расположенного в бесконечности.*

Рассмотрим монохроматические аберрации тонкой линзы. Линзы называются тонкими, если их толщина мала по сравнению с фокусным расстоянием.

Сферическая аберрация тонкой линзы зависит от прогиба (формы) линзы, угла  $\sigma'$ , показателя преломления материала и фокусного расстояния.

Продольная сферическая аберрация третьего порядка пропорциональна квадрату угла  $\sigma'$ .

За исключением линз, содержащих анаберрационные поверхности, сферическая аберрация у положительной линзы отрицательная, а у отрицательной – положительная (рис. 2.42).

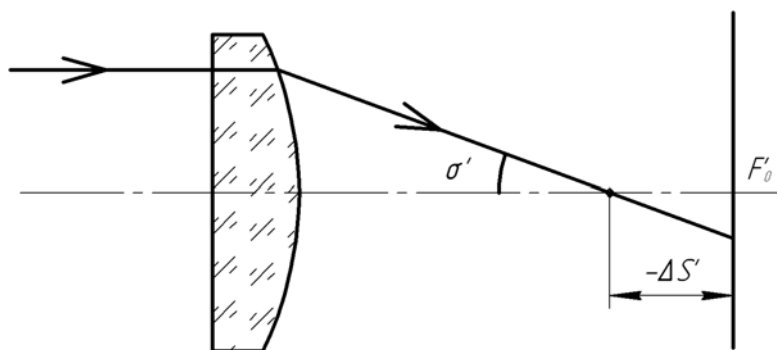


Рис. 2.42. Продольная сферическая аберрация линзы

Можно найти форму линзы с минимальной сферической аберрацией третьего порядка. Для предмета, расположенного в бесконечности  $S = -\infty$ , минимальная сферическая аберрация будет при следующем соотношении радиусов:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{2 \cdot n^2 - n - 4}{n \cdot (2n + 1)} \quad (2.117)$$

Если  $n = 1,5$ , то минимальная сферическая аберрация третьего порядка будет у линзы с соотношением радиусов:  $r_1 : r_2 = -1 : 6$  (рис.2.43).

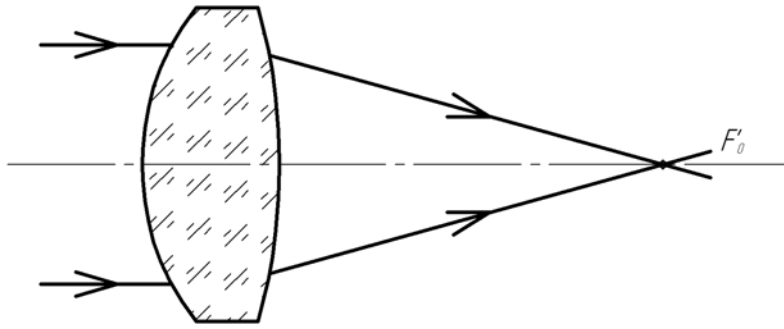


Рис. 2.43. Положительная линза с минимальной сферической aberrацией

Линза должна стоять выпуклой стороной к параллельному ходу лучей.

Способы уменьшения сферической aberrации:

- одну линзу разрезать на две (в два раза уменьшается угол  $\sigma'$ );
- комбинировать положительные и отрицательные линзы;
- строить линзы с использованием анаберрационных точек;
- применять материалы с большими значениями показателя преломления.

Кома тонкой линзы, у которой зрачок совпадает с линзой, зависит от ее прогиба.

Можно найти форму линзы с устранённой комой третьего порядка. Для предмета, расположенного в бесконечности  $S = -\infty$ , кома будет устранена при следующем соотношении радиусов:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{n^2 - n - 1}{n^2} \quad (2.118)$$

Если  $n = 1,5$ , то при  $r_1 : r_2 = -1 : 9$  отсутствует кома третьего порядка, если зрачок совпадает с линзой.

Если зрачок не находится на линзе, то кома будет зависеть от положения зрачка в том случае, если не устранена сферическая aberrация.

Астигматизм тонкой линзы, если зрачок расположен на линзе, не зависит от прогиба линзы и пропорционален фокусному расстоянию и квадрату угла  $\omega$ .

Кривизна изображения в тонкой линзе всегда присутствует. Радиус кривизны поверхности изображения для тонкой линзы равен:  $R = -f' \cdot n$ .

Дисторсия тонкой линзы, если зрачок расположен на линзе, равна нулю.

*Пример создания стартовой системы с использованием свойств линз*

Рассмотрим расчет стартовой системы фокусирующего объектива для оптической записи информации [16]. Объектив работает с лазером, поэтому ахроматизация не требуется. Фокусное расстояние не более 4 мм.



Качество изображения должно быть близким к дифракционному. Диаметр кружка рассеяния не должен превышать 0,6 – 2 мкм. Апертура объектива такая, как у микрообъективов большого увеличения, линейное поле не превышает 0,1 – 0,2 мм.

Аберрации, которые в объективе необходимо очень хорошо исправлять, это сферическая аберрация и кома.

Объектив содержит плоскопараллельную пластину (оптический диск), толщиной порядка 1 мм, который играет защитную роль и вносит положительную сферическую аберрацию, а также плосковыпуклую линзу и апланатический мениск (Рис. )

Плосковыпуклая линза для предмета в бесконечности имеет практически минимальную сферическую аберрацию. Кома, если зрачок на линзе, близка к нулю. Апланатический мениск (рис. 2.33а) имеет первую поверхность апланатическую, а вторую концентрическую по отношению к апертурному лучу, он не вносит сферической аберрации и комы, а его линейное увеличение  $\beta = \frac{1}{n}$ .

Пусть фокусное расстояние объектива равно  $f' = 4,0$  мм, линзы и плоскопараллельная пластина выполнены из стекла СТК19. Рабочая длина волны  $\lambda = 0,6328$  мкм, показатель преломления стекла СТК19 для  $\lambda = 0,6328$  мкм равен  $n = 1,7410$ . Определим фокусное расстояние плосковыпуклой линзы:  $f'_{л} = \frac{f'}{\beta} = f' \cdot n = 4 \cdot 1,7410 = 6,964$  мм. Задний фокальный отрезок  $S'_{F'} = 6,2746$  мм.

Пусть толщина линзы равна 1,2 мм, радиус кривизны первой поверхности равен:  $r_1 = f'_{л} (n - 1) = 6,964 \cdot 0,7410 = 5,160$  мм.

Пусть расстояние между линзами  $d_2 = 0,1$  мм, тогда передний отрезок для мениска  $S_M = 6,1746$  мм.

Применим формулу  $S_M = r_3 \left(1 + \frac{n'}{n}\right)$  для определения радиуса кривизны первой, апланатической поверхности мениска:  $S_M = 6,1746 = r_3 (1 + 1,7410)$ , отсюда следует  $r_3 = 2,2526$ .

Определим  $S'$  первой поверхности мениска:  
 $S'_M = r_3 \left(1 + \frac{n}{n'}\right) = 2,2526 \left(1 + \frac{1}{1,7410}\right) = 3,5465$ .

Пусть толщина мениска  $d_3 = 1$  мм, тогда второй радиус кривизны мениска равен  $r_4 = 3,5465 - 1 = 2,5465$ .

Пусть толщина плоскопараллельной пластины  $d_5 = 1,2$  мм, а расстояние между мениском и пластиной  $d_4 = 0,5$  мм.

Полученные конструктивные данные стартовой системы:

$r_1 = 5,16049$	$d_1 = 1,2$	$n_2 = 1,7410$	СТК19
$r_2 = \infty$	$d_2 = 0,1$	$n_3 = 1,0$	
$r_3 = 2,2526$	$d_3 = 1,0$	$n_4 = 1,7410$	СТК19
$r_4 = 2,5465$	$d_4 = 0,5$	$n_5 = 1,0$	
$r_5 = \infty$	$d_5 = 1,2$	$n_6 = 1,7410$	СТК19
$r_6 = \infty$			

$f' = 3,9998, S^2_{F'} = 1,3575$

На рис. 2.44 приведен вид оптической системы и графики аббераций.

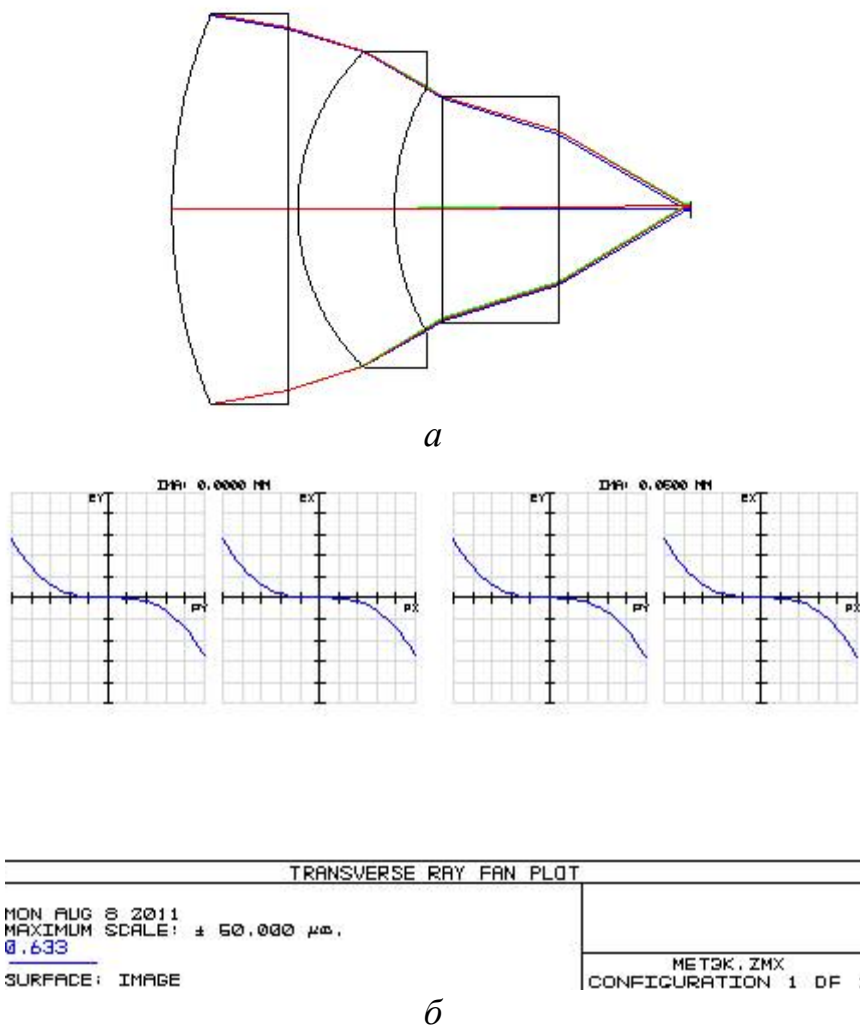


Рис. 2.44. Оптическая система для записи информации:  
 (а) вид оптической системы; (б) графики поперечных аббераций для осевого и крайнего наклонного пучка лучей

Остаточные aberrации для относительного отверстия 1:1 приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9

$m$	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta S'$	$\Delta y'$	$\eta, \%$	$W, \text{ дл. волн}$
2,0	0,5899	-0,0469	-0,273	-0,655	-5,498
1,732	0,4887	-0,0366	-0,0179	-0,56	-3,1093
1,4142	0,3825	-0,0256	-0,0098	-0,410	-1,3873
1	0,2598	-0,0135	-0,0035	-0,22	-0,3477

В качестве параметров для дальнейшей оптимизации используются радиусы кривизны поверхностей, а также показатели преломления оптических материалов. При высоких апертурах целесообразно взять вместо одной плосковыпуклой линзы две одинаковых.

Оптимизация полученной системы позволяет получить дифракционное качество изображения при относительном отверстии 1:1,5. Если первую поверхность первой линзы сделать асферической, то относительное отверстие приближается к предельно возможному для апланатических систем 1:0,5.

Использование только одной асферической линзы с плоскопараллельной пластиной позволяет хорошо исправить сферическую aberrацию, но кома при этом получается очень большой.

## 2.9. Метод проб

Широкое распространение при расчёте оптических систем имеет метод проб. В особенности часто этот метод применяется при расчёте высокоапертурных и широкоугольных оптических систем. Суть метода заключается в том, что сначала проводится патентный поиск прототипа разрабатываемой оптической системы. Для этой цели используются архивные данные организаций и предприятий, литературные источники, патенты. При выборе прототипа ориентируются на фокусное расстояние, относительное отверстие, угловое поле, рабочий спектральный диапазон и требуемое качество изображения. Отыскав подходящие прототипы, проводят пересчёт на нужное фокусное расстояние путём масштабирования. Радиусы кривизны, толщины и все отрезки умножают на коэффициент масштабирования и выполняют aberrационный расчёт. Если качество изображения неудовлетворительное или может быть улучшено, выполняют оптимизацию с помощью известных программ Zemax, ОПАЛ, САРО. На основании изучения влияния изменения конструктивных параметров системы на aberrации, выполняется кропотливая работа по поиску нужного решения.

Успех работы зависит от опыта конструктора, его умения систематизировать и обобщать большое количество вычислительного

материала. В качестве конструктивных параметров выступают радиусы кривизны поверхностей, воздушные промежутки, толщины линз, показатели преломления, коэффициенты дисперсии, относительные частные дисперсии оптических материалов. Вместо радиусов кривизны поверхностей могут использоваться углы первого параксиального луча с оптической осью, в этом случае при изменении углов в стекле не будут меняться хроматизм и кривизна изображения.

Если выбранная в качестве прототипа оптическая система после оптимизации не даёт желаемых результатов, то усложняют её или заменяют на другую. Процесс этот продолжителен по времени и утомителен и не всегда есть уверенность в том, что может быть получена система с желаемым качеством изображения, особенно, если оптические характеристики прототипа или его качество изображения существенно отличаются от требуемых. Решающим фактором является правильный выбор исходной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Большая Советская Энциклопедия 3-е изд. СПб.: Наука, 1993.
2. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ Ю.Б. Парвулюсов, С.А. Родионов, В.П. Солдатов, А.А. Шехонин; Под ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Логос, 2000.
3. Методология проектирования оптических приборов: учебное пособие. А.А.Шехонин, В.М.Домненко, О.А.Гаврилина - СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2006.
4. Системы автоматизации проектирования в радиоэлектронике: Справочник/ Е.В. Авдеев, А.Т. Еремин, И.П. Норенков, М.И. Песков; Под ред. И.П. Норенкова. М.: Радио и связь, 1986. 363 с.
5. Системы автоматизированного проектирования. В 9 кн./ И.П. Норенков. Кн. 1. Принципы построения и структура. М.: Высш. школа, 1986. 127 с.
6. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
7. Optical system design. Robert E. Fisher, Beljana Tagic-Galeb, Paul R. Yoder. 2nd ed. – NY SPIE Press. 2008. 809p.
8. Разработка и оформление конструкторской документации: Справочное пособие. Э.Г. Романычева, А.А. Иванова, А.С. Куликова, Т.П. Новикова. М.: Радио и связь, 2004. 266 с.
9. Haferkorn, Heinz: Optik, 3., bearb. und erw. Aufl.- Leipzig; Berlin; Heildelberg: Barth,1994 -690s.
10. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
11. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. (Теория, основы проектирования, оптические характеристики). Учебное пособие для киноузлов. 2-е издание. - М.: Искусство, 1978. - 543 с
12. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. М.: Логос. 2000.-581 с.
13. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. Л.: Машиностроение. 1968.
14. М.М. Русинов. Композиция оптических систем – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1989 – 383с.: ил.
15. Родионов С.А., Шехонин А.А. Методология проектирования оптических систем. Учебное пособие, СПб ИТМО, 1996.-84с.
16. Андреев Л.Н. Прикладная теория аберраций. Учебное пособие. –СПб: СПб ГИТМО(ТУ), 2002. -98с.
17. Справочник конструктора оптико-механических приборов. / В.А.Панов, М.Я.Кругер, В.В.Кулагин и др.; Под общ. ред. В.А.Панова. 3-е изд., перераб. и доп.-Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1980. – 742с., ил.
18. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989.- 221 с.: ил.

- 19.Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д., Андреев Л.Н., Агальцова Н.А., Ишанин Г.Г., Василевский О.Н., Родионов С.А. Вычислительная оптика. Справочник. Изд.2. 2008. 424 с..
- 20.Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем: Учебное пособие. 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 446с.: ил.
- 21.Цуканова Г.И., Бахолдин А.В. Специальные разделы прикладной оптики. Учебно- методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А.-СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. –79с.:ил.
- 22.Прикладная оптика / Дубовик А.С., Апенко М.И. , Дурейко Г.В. и др. М.: Недра, 1982.
- 23.Основы оптики. Конспект лекций. Под редакцией Шехонина А.А.- СПб.:СПбГУ ИТМО, 2009.- 162с.
- 24.А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин. Методы оптимизации: Учеб. для ВУЗов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. – 440с.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

---

## ЧУРИЛОВСКИЙ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ



**Чуриловский Владимир Николаевич (1898-1983)** - первый декан оптического факультета ЛИТМО. Родился 25 мая 1898 года в Петербурге в семье типографского рабочего. В 1915 году успешно закончил реальное училище. Тяга к знаниям была огромной. Несмотря на скромное материальное положение, ему удалось начать учебу в Институте инженеров путей сообщения. Но в 1918 году после третьего курса он вынужден был прервать учебу и начать трудовую жизнь. Кем и где только Владимир не работал: городским механиком отдела коммунального хозяйства города Чистополя, контролером лескома Абхазии, бухгалтером исполкома города

Сухуми. Но желание продолжать учебу не ослабевало.

В 1923 году ему удалось поступить в **Техникум точной механики и оптики**, который располагался в Демидовом переулке Петрограда. В 1925 году Владимир Николаевич закончил обучение и до 1979 года работал над теорией оптических приборов, достигнув огромных результатов.

В первые годы после окончания техникума Чуриловский трудился на заводе ГОМЗ им. ОГПУ (впоследствии ЛОМО им. В.И.Ленина) сначала старшим вычислителем, а с 1930 года - заведующим оптико-конструкторским отделом. Одновременно Владимир Николаевич начал преподавать. С 1926 года он вел занятия по теории оптических приборов в техникуме, который сам только что окончил.

Решением Главпромкадра при ВСНХ СССР в 1930 году техникум преобразовали в институт. В.Н. Чуриловского утвердили в должности профессора и заведующего кафедрой теории оптических приборов, которой он руководил 39 лет. С образованием оптического факультета Владимир Николаевич стал его первым деканом и

проработал в этой должности с перерывами более 12 лет. Здесь раскрылся его педагогический талант и талант ученого.

Звание профессора В.Н. Чуриловскому было присвоено уже в 1935 году по кафедре теории оптических приборов. В 1947 году он успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук, исследовав актуальную для теории и практики оптического приборостроения тему: "Введение поверхностей высших порядков в расчеты оптических систем". В 1966 году Владимиру Николаевичу было присвоено почетное звание "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР".

Профессор В.Н. Чуриловский был одним из пионеров современной оптической промышленности, крупнейшим специалистом в области теории оптических приборов. Им опубликовано лично и в соавторстве свыше 200 научных трудов, он автор более 50 изобретений. Научно-техническое наследие Владимира Николаевича охватывает широкий диапазон теории оптических систем, абберационной коррекции оптических систем, астрономических систем, скоростных фото- и кинокамер. Из фундаментальных работ профессора В.Н. Чуриловского особое место занимают такие труды, как "Теория оптических приборов", "Оптехника", "Курс лекций и упражнений", "Расчет призменных систем на хроматизм", "Теория хроматизма и абберации третьего порядка".

Под руководством В.Н. Чуриловского защитили диссертации и стали ведущими специалистами Г.Н. Моторин, Л.В. Романова, В.Ю. Юхтанов, К.А. Хадилулин, Б.И. Тимофеев, М.И. Миревич, Г.К. Бесчастный. Среди учеников Владимира Николаевича - доктора наук и профессора М.М. Русинов, И.А. Турыгин, Д.Ю. Гальперн, Б.Н. Бегунов, И.А. Грейм и др.

Особую любовь снискал Владимир Николаевич среди студентов как выдающийся лектор-педагог, тонкий психолог и умелый воспитатель. Высоким был его авторитет в преподавательском коллективе института, а также у работников.

Он был разносторонне одаренным человеком, круг его интересов был необычайно широк. На протяжении всей жизни Владимир Николаевич занимался литературой, увлекался поэзией. Многие из написанных им 2000 стихотворений были напечатаны в газете "Кадры приборостроению". Он свободно владел немецким языком, а с английского и французского переводил без словаря.

Напряженная работа не могла не сказаться на состоянии здоровья профессора В.Н. Чуриловского. 10 марта 1953 года он оставил должность декана оптического факультета. В заявлении на им директора института он написал: "С 20-го февраля тяжело болен нарушением мозгового и коронарного кровообращения и еще в течение некоторого времени не смогу приступить к своим обязанностям. Поэтому во избежание срыва работы деканата я прошу Вас, еще до моего выхода на работу после болезни освободить меня от обязанностей декана оптического факультета".

Просьба Владимира Николаевича была удовлетворена, а в должности заведующего кафедрой теории оптических приборов он продолжал работать еще 16 лет.

В октябре 1969 года В.Н. Чуриловский вышел на пенсию, но с институтом и факультетом не расстался. Он продолжал работу в должности профессора-консультанта вплоть до февраля 1979 года.

11 ноября 1983 года Владимира Николаевича не стало. Ушел из жизни интеллигентный благороднейший человек, талантливый педагог, крупный ученый-оптик. После себя он оставил богатое научное наследие и целую плеяду выдающихся учеников. В том, что сегодня оптический факультет успешно решает задачи по подготовке квалифицированных инженеров-оптиков, умело продолжает совершенствовать учебный процесс - немалая заслуга этого замечательного человека.



## О СЕБЕ САМОМ

Я крайности объединить могу:  
Мои стихи и книги - в том порукой!  
Я чувствую, что у меня в мозгу  
Поэзия сплетается с наукой.

В уме моем границ меж ними нет.  
Есть в интервалах джазовые ритмы,  
Внедрилась кибернетика в сонет,  
Поэмы превратились в алгоритмы.

Механика - и женское бедро!  
Подумаешь - дыханье участится!  
Поэзия вторгается в ядро  
И вырывает тайну у частицы!

Как это так? Да это - не секрет.  
Я признаюсь, немного удрученный:  
Среди ученых я - почти поэт,  
А среди поэтов - видимо, ученый!

*Владимир Чуриловский – Учёный и Поэт*



Бахолдин Алексей Валентинович,  
Романова Галина Ивановна,  
Цуканова Галина Ивановна

## **Теория и методы проектирования оптических систем. Часть I**

**Учебное пособие  
под редакцией проф. А.А. Шехонина**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО  
Зав. РИО  
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.1999  
Подписано к печати 19.12.2011  
Заказ № 2432  
Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова



**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского национального  
исследовательского университета  
информационных технологий, механики  
и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

