

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ**



**ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ**

**ЦУКАНОВА Г.И., БАХОЛДИН А.В.**



**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
ПОД РЕДАКЦИЕЙ ПРОФЕССОРА ШЕХОНИНА А.А.**

**Санкт-Петербург  
2008**

Цуканова Г.И., Бахолдин А.В.

Спецразделы прикладной оптики. Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А. – СПб: СПб ГУИТМО, 2008. – 77 с.

В учебно-методическом пособии приводятся краткие теоретические сведения, варианты индивидуальных заданий, указания по выполнению 5 лабораторных работ на компьютерах по курсам «Спецразделы прикладной оптики», «Оценка качества изображения и расчёт допусков», «Прикладная оптика».

Для студентов направления подготовки 200200 «Оптотехника» и специальности 200203.65 «Оптико-электронные приборы и системы».

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 200200 – «Оптотехника» и направлению подготовки дипломированных специалистов 200203.65 – «Оптико-электронные приборы и системы».

Рецензенты: д.т.н., проф. Путилин Э.С., кафедра ОТ СПбГУИТМО  
к.т.н., ст. н. сотр. Стариченкова В.Д. ГОИ им. С.И. Вавилова

Одобрено на заседании кафедры Прикладной и компьютерной оптики 30 ноября 2007 г., протокол №3.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2008

## **Введение**

Пособие охватывает материалы трёх курсов: 1) «Спецразделы прикладной оптики», 2) «Оценка качества изображения и расчёт допусков», 3) «Прикладная оптика». В пособии рассматриваются следующие разделы: а) «Оптические системы для преобразования лазерных пучков», б) «Оптические зеркальные системы с асферическими поверхностями», в) «Анализ качества изображения геометрически-ограниченных и дифракционно-ограниченных систем», г) «Простые телескопические системы», д) «Расчёт влияния изменения параметров, децентрировок и допусков на примере телескопической системы», е) «Расчёт технологических параметров асферических поверхностей».

В пособии даются краткие теоретические положения, указания по выполнению 5 работ на компьютерах, варианты индивидуальных заданий, требования к оформлению работ, вопросы для защиты.

На выполнение лабораторных работ: «Оптическая система для коллимации лазерного излучения», «Оптическая система для концентрации лазерного излучения», «Синтез и анализ качества изображения апланатического двухзеркального объектива», «Расчёт технологических показателей схем контроля асферических поверхностей двухзеркального апланатического объектива» требуется 6 аудиторных часов, на выполнение работы «Разработка, анализ качества изображения, определение влияния параметров и расчёт допусков телескопической системы» требуется 8 аудиторных часов.

# Лабораторная работа №1

## «Оптическая система для коллимации лазерного излучения»

**Цель работы:** Изучение методов расчёта оптических систем, работающих с лазерным излучением.

### 1. Задание для работы

- 1.1. В соответствии с заданием (таблица 1.1) выполнить габаритный расчёт телескопической системы.
- 1.2. Провести расчёт конструктивных параметров системы.
- 1.3. Провести оценку качества рассчитанной оптической системы.
- 1.4. Выполнить абберрационную коррекцию всей системы.

### 2. Теоретическая часть

Лазеры – источники оптического излучения, которые имеют специфические характеристики и параметры. Вследствие этого к оптическим системам, передающим и преобразующим лазерное излучение, предъявляются особенные требования. При формировании технического задания на разработку таких систем не могут не учитывать свойства излучения лазеров.

Лазеры являются монохроматическими источниками излучения. В большинстве задач расчёт ведётся на одну основную длину волны излучения.

Многие лазеры генерируют излучение большой мощности. Высокая плотность потока излучения может приводить к нагреву элементов конструкции оптической системы и к так называемому «пробоем линз». Поэтому уже на этапе выбора принципиальной оптической схемы необходимо исключать варианты с промежуточным действительным изображением. Не допускается использование коллективов.

Структура лазерного пучка такова, что после выходного торца имеется область перетяжки, в которой поперечный размер пучка  $D_{\Pi}$  минимален. Далее пучок начинает расходиться. Основными параметрами лазера являются угол расходимости пучка  $2\varphi$  и размер перетяжки  $D_{\Pi}$  показанные на рисунке 1.1.

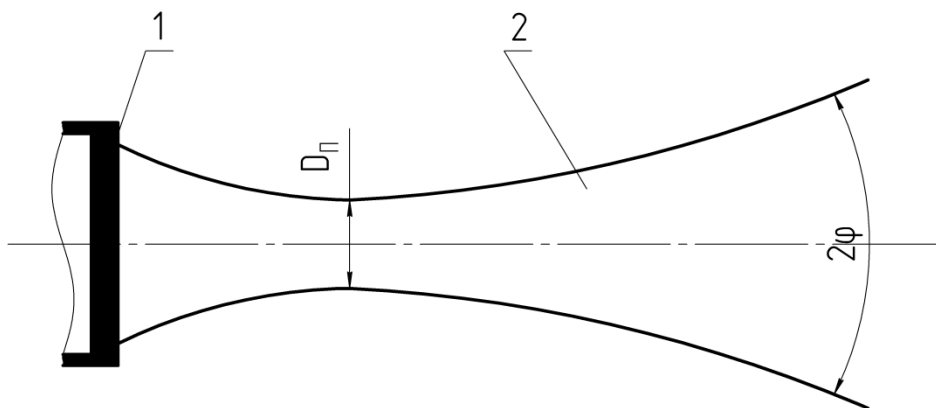


Рисунок 1.1. Структура лазерного пучка.  
1 – выходной торец лазера, 2 – лазерный пучок.

Лазер является источником излучения. В подавляющем большинстве задач необходимо передать световую энергию от источника к приёмнику, каким-либо образом трансформировав геометрию пучка.

В процессе расчёта оптической системы удобно принять, что излучающий предмет находится на бесконечности. Его угловые размеры определяются углом  $2\omega$ , равным углу расходимости  $2\varphi$ . Чтобы добиться наилучшего сопряжения лазера с последующей оптической системой входной зрачок последней должен находиться в области перетяжки, как это показано на рисунке 1.2.

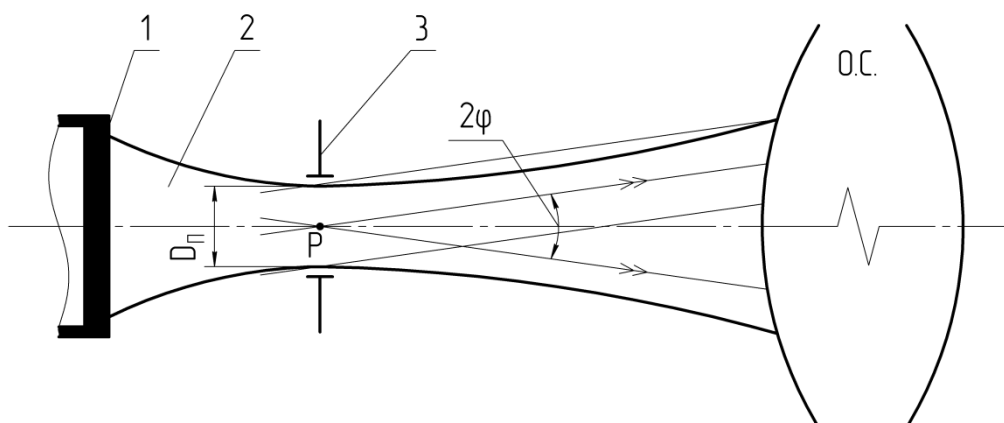


Рисунок 1.2. Сопряжение лазера и оптической системы.

1 – выходной торец лазера, 2 – лазерный пучок, 3 – входной зрачок оптической системы.

Лазеры испускают достаточно узкий пучок лучей. Во многих практических приложениях необходимо иметь пучок в несколько раз большего поперечного размера. При этом желательно уменьшить расходимость пучка. Подобное преобразование пучка выполняет телескопическая система, представленная на рисунке 1.3.

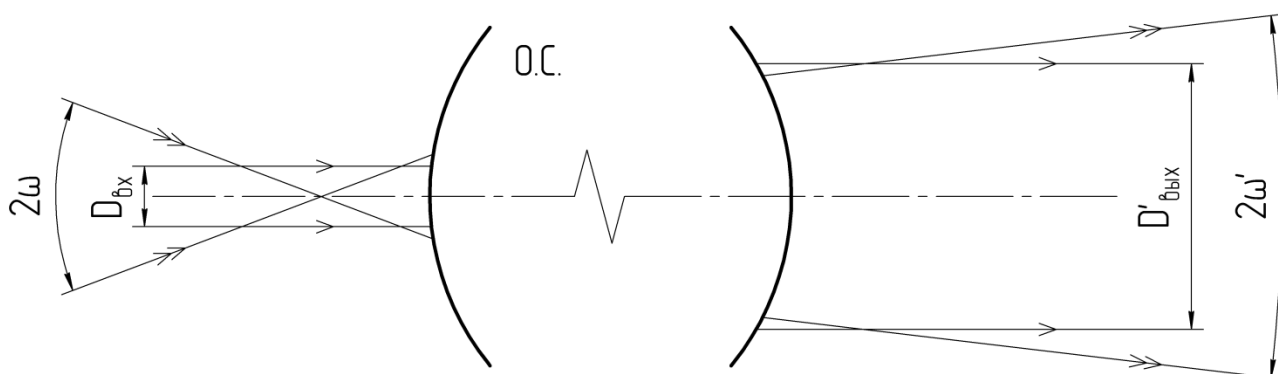


Рисунок 1.3. Преобразование светового пучка телескопической системой.

Линзовые телескопические системы строятся по схемам Галилея и Кеплера. Ход апертурного луча в них представлен на рисунке 1.4.

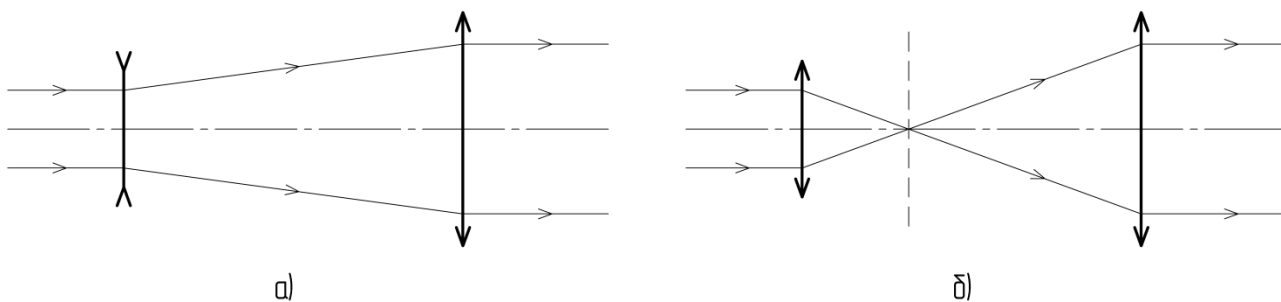


Рисунок 1.4. Двухлинзовые перевёрнутые телескопические системы:  
 а) система Галилея, б) система Кеплера.

Пунктирной линией обозначена плоскость промежуточного действительного изображения.

Схема Кеплера не удовлетворяет требованиям задания, имея промежуточное действительное изображение внутри системы. Таким образом, разработка оптической системы для коллимации лазерного излучения сводится к расчёту перевёрнутой телескопической системы Галилея.

### 2.1. Габаритный расчёт

Задачей габаритного расчёта является определение оптических сил и основных характеристик всей системы и каждого её компонента.

Принципиальная оптическая схема с ходом апертурного луча и главного лучей в перевёрнутой системе Галилея приведена на рисунке 1.5.

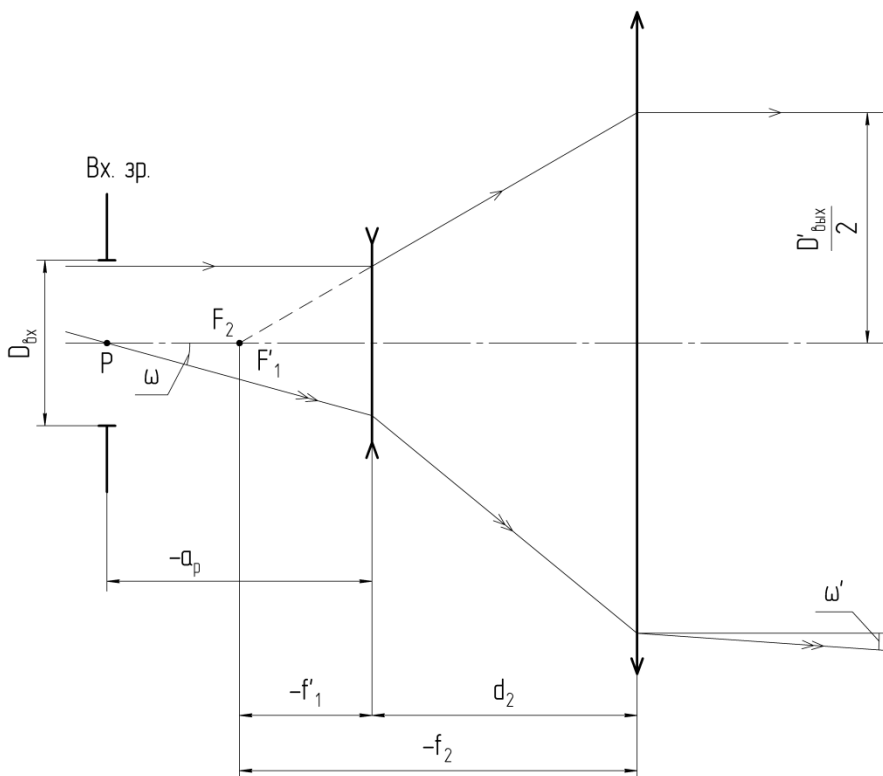


Рисунок 1.5. Принципиальная оптическая схема перевёрнутой системы Галилея

Основные характеристики телескопической системы Галилея взаимосвязаны следующим соотношением:

$$\Gamma = \frac{D_{ex}}{D'_{вых}} = \frac{tg \omega'}{tg \omega} = \frac{-f'_1}{f'_2}, \quad (1.1)$$

где:  $\Gamma$  – угловое увеличение телескопической системы;

$D_{ex}$  – диаметр входного зрачка системы;

$D'_{вых}$  – диаметр выходного зрачка системы;

$2\omega$  – угловое поле оптической системы в пространстве предметов;

$2\omega'$  – угловое поле оптической системы в пространстве изображений;

$f'_1$  – фокусное расстояние первого компонента;

$f'_2$  – фокусное расстояние второго компонента.

## 2.2. Расчёт конструктивных параметров

В дальнейшем, по результатам габаритного расчёта, производится расчёт конструктивных параметров каждого компонента системы. К конструктивным параметрам относятся радиусы поверхностей, осевые расстояния, показатели преломления материалов и, если в системе есть несферические поверхности, коэффициенты асферики. При расчёте должны быть учтены требования к качеству выходных параметров системы. В насадке коллимации лазерного излучения основным требованием является уменьшение расходимости светового пучка. На расходимость влияют увеличение системы и её абберрационные характеристики. Увеличение системы определяется на этапе габаритного расчёта. Абберрации же системы зависят от конструктивных параметров. Их разумным выбором можно повысить качество выходных параметров. В первую очередь следует исправить искажение осевой точки – сферическую абберрацию. Абберрации внеосевых пучков из-за малости полевого угла  $\omega$  слабо сказываются на расходимости излучения.

Положительные линзы имеют отрицательное значение сферической абберрации, а отрицательные – положительное. Для устранения сферической абберрации во всей системе нужно, чтобы сферические абберрации компонентов были бы равны по модулю и противоположны по знаку. Абберрации при одинаковом относительном отверстии пропорциональны фокусному расстоянию. Фокусное расстояние первого отрицательного компонента значительно меньше фокусного расстояния второго положительного компонента. Отсюда следует, что необходимо уменьшать сферическую абберрацию положительного компонента и увеличивать значение сферической абберрации отрицательного компонента. Для этого нужно выполнить вторую линзу из стекла с более высоким показателем преломления, а первую с более низким.

Расчёт положительной линзы на минимум сферической aberrации удобно провести с помощью первого параксиального луча, ход которого в линзе показан на рисунке 1.6.

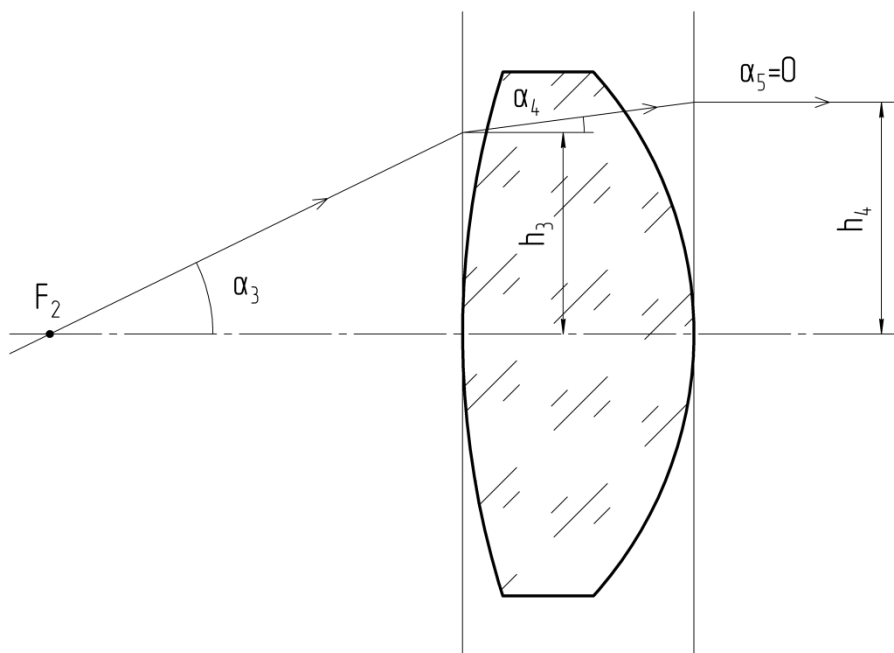


Рисунок 1.6. Ход первого параксиального луча в положительной линзе.

Параксиальные лучи преломляются на главных плоскостях поверхностей линзы. Для упрощения расчёта вводится нормировка:  $\alpha_3 = -1$ ,  $\alpha_5 = 0$ ,  $h_4 = f'_2$ . Условие минимизации сферической aberrации выполняется, когда угол  $\alpha_4$  внутри линзы равен:

$$\alpha_4 = \frac{2n_4 + 1}{2n_4 + 4}, \quad (1.2)$$

где  $n_4$  – показатель преломления материала положительной линзы для заданной длины волны.

Определив углы первого параксиального луча, можно рассчитать радиусы кривизны поверхностей положительной линзы по формуле:

$$r_k = h_k \cdot \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1}\alpha_{k+1} - n_k\alpha_k}, \quad (1.3)$$

где  $k$  – номер поверхности в системе;

$h_k$  – высота первого параксиального луча на главной плоскости соответствующей поверхности, рассчитываемая по формуле:

$$h_k = h_{k+1} + \alpha_{k+1}d_k. \quad (1.4)$$



Толщину положительной линзы  $d_3$  определяют из условия, что линзу следует считать «тонким компонентом». Тогда:  $d_3 \approx (1/5 \div 1/10)h_4$ .

Отрицательный компонент должен иметь значительную сферическую aberrацию, чтобы компенсировать остаточную aberrацию положительной линзы. Конструктивные параметры первой линзы можно определить, исследуя её влияние на aberrацию всей системы с помощью программы «ОПАЛ». Ход лучей первого параксиального луча в системе показан на рисунке 1.7.

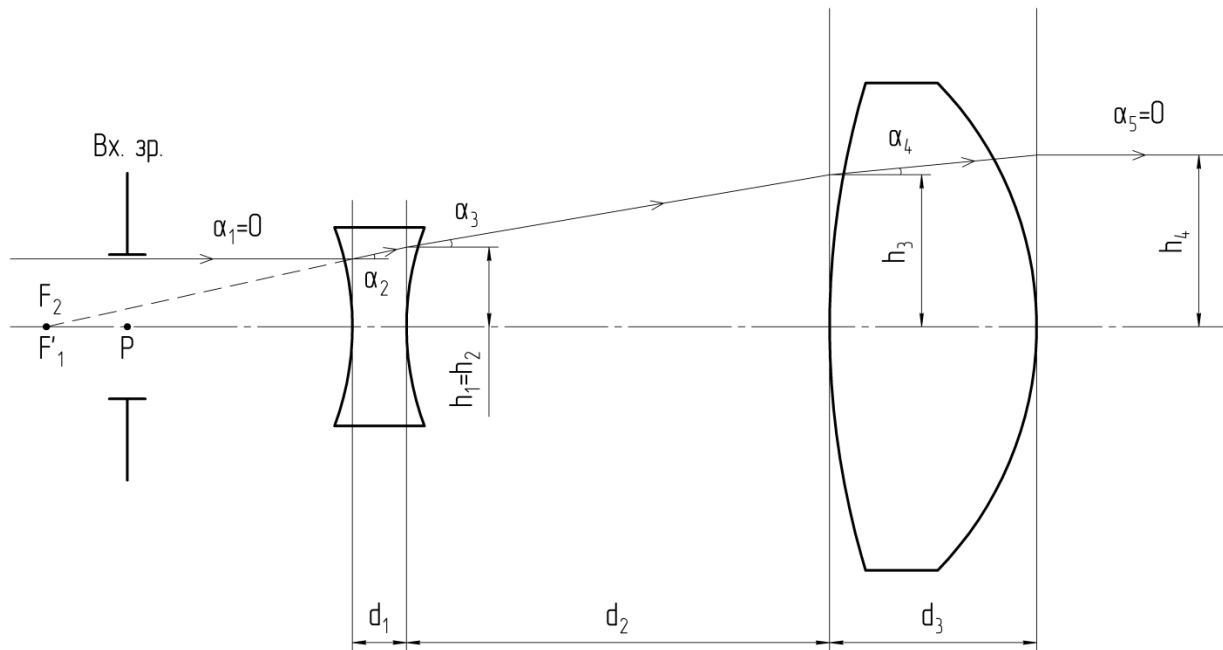


Рисунок 1.7. Ход первого параксиального луча в системе.

В качестве начального варианта рассмотрим случай, когда первая линза имеет плоско-вогнутую форму. При этом угол внутри линзы равен нулю  $\alpha_2 = 0$ . Радиус первой поверхности равен бесконечности  $r_1 = \infty$ , а её кривизна равна нулю  $c_1 = 1/r_1 = 0$ .

Радиус второй поверхности легко определить из формулы:

$$r_2 = (1 - n_2) f'_1, \quad (1.5)$$

где  $n_2$  – показатель преломления материала отрицательной линзы для заданной длины волны.

Толщину по оси первой линзы примем  $d_1 \geq 1$  мм.

Расстояние  $d_2$  между компонентами равно:

$$d_2 = S'_{F1} - S_{F2}. \quad (1.6)$$

Задавая в программе «ОПАЛ» рассчитанные параметры, получаем значение поперечной сферической aberrации системы  $\Delta\sigma'$ .

Следует заметить, что, положительная линза имеет отрицательную величину сферической aberrации, а отрицательная линза – положительную aberrацию. По знаку остаточной aberrации  $\Delta\sigma'$  можно судить о том, какая линза вносит больший вклад в суммарную ошибку.

При небольшом изменении угла  $\alpha_2$  в первой линзе величина сферической aberrации  $\Delta\sigma'$  меняется линейно. Остаточную ошибку сферической aberrации всей системы можно скорректировать, проведя исследование зависимости её от величины угла нулевого луча внутри первого компонента. В первом случае, когда используется отрицательный компонент в форме плоско-вогнутой линзы  $\alpha_{2,1} = 0$ . Величина остаточной aberrации системы определяется величиной  $\Delta\sigma'$ .

Далее рассмотрим случай, когда отрицательная линза имеет другую форму поверхностей при том же фокусном расстоянии  $f'_1$ . Задаваясь величиной  $\alpha_2 \neq 0$ , определяем значения радиусов линзы ( $r_1, r_2$ ) и осевого расстояния между компонентами системы ( $d_2$ ) по формулам 1.3, 1.4 и 1.6.

Моделируя в программе «ОПАЛ» второй вариант системы, получаем при  $\alpha_{2,2}$  значение остаточной сферической aberrации  $\Delta\sigma'_2$ .

Необходимо построить график зависимости  $\Delta\sigma'$  от  $\alpha_2$ . График будет иметь почти линейную форму, как показано на рисунке 1.8. Возможное отклонение от прямой зависимости свидетельствует о наличии aberrаций высших порядков. По графику можно определить то значение угла нулевого луча  $\alpha_{2,0}$ , при котором произойдёт взаимная компенсация aberrаций первого и второго компонентов системы:

$$\alpha_{2,0} = \frac{\alpha_{2,2}}{1 - \frac{\Delta\sigma'_2}{\Delta\sigma'_1}}. \quad (1.7)$$

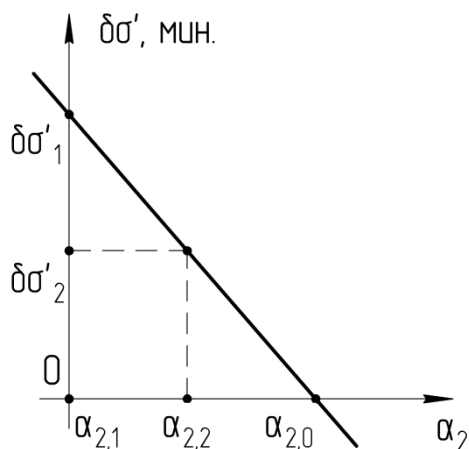


Рисунок 1.8. Зависимость величины поперечной составляющей сферической aberrации  $\Delta\sigma'$  от угла первого параксиального луча внутри отрицательного компонента  $\alpha_2$ .

Таким образом, окончательным решением является сочетание отрицательной линзы с углом нулевого луча внутри линзы равным  $\alpha_{2,0}$  и положительной линзы, рассчитанной на минимум сферической аберрации.

### 2.3. Оценка качества рассчитанной системы

Вследствие того, что оптическая система коллиматора не создаёт изображение сложного объекта, а лишь является передатчиком энергии лазера, требований к качеству передачи структуры изображения не предъявляются. Основным требованием является минимизация угла расходимости светового пучка на выходе. В первом параксиальном приближении расходимость связана с полевым углом  $\omega'$ . Меньше этого угла величина расходимости не будет даже при полной абберационной коррекции системы. Неисправленная сферическая аберрация увеличит угол расходимости, что проиллюстрировано на рисунке 1.9.

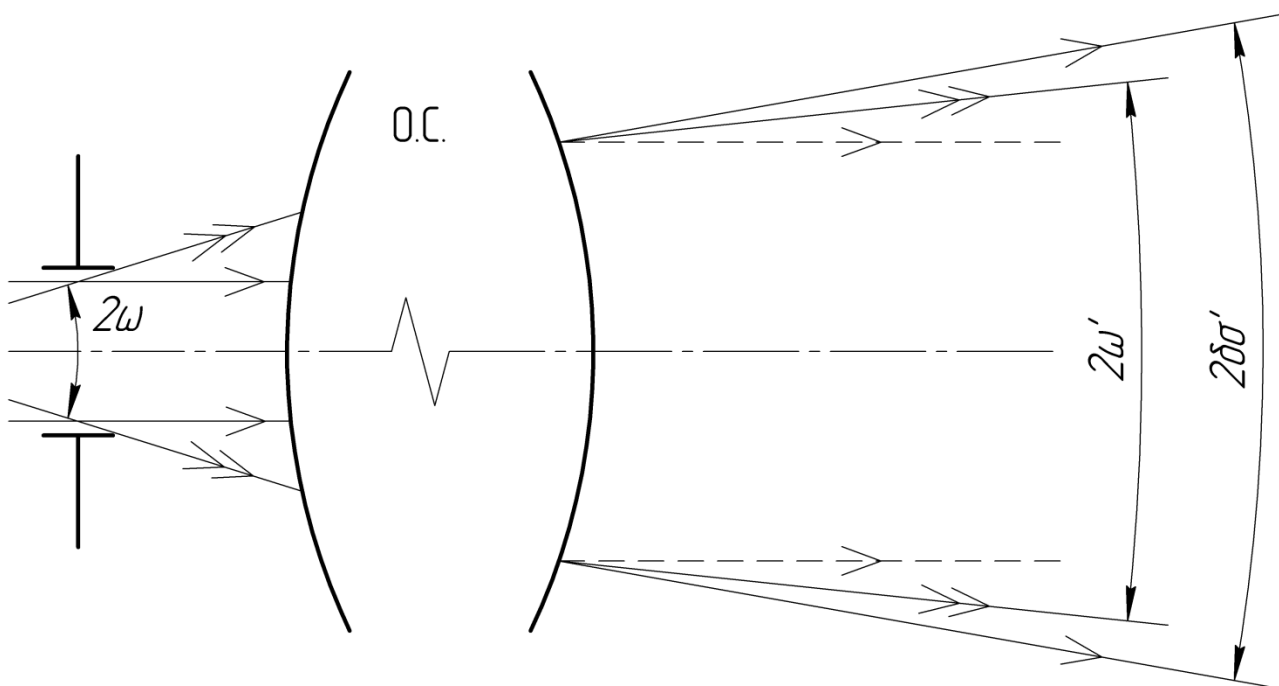


Рисунок 1.9. Расходимость лазерного пучка после оптической системы.

Допустимое значение остаточной сферической аберрации не должно превышать  $0,25\omega'$ .

Если рассчитанная система не удовлетворяет установленному требованию, необходимо провести оптимизацию, в процессе которой численными методами будут скомпенсированы остаточные аберрации как третьего, так и высших порядков.

## 2.4. Оптимизация

Чтобы провести оптимизацию с помощью пакета «ОПАЛ», необходимо написать программу оптимизации, в которой должны быть указаны следующие три группы параметров:

### 2.4.1. Параметры оптимизации.

Под параметрами оптимизации понимаются характеристики системы, изменение которых будет происходить в процессе оптимизации. В первую очередь к ним относятся конструктивные параметры – кривизны поверхностей (C), осевые расстояния (D). Так же в качестве параметров оптимизации могут быть заданы, например, положение предмета и входного зрачка.

Запись необходимых параметров осуществляется в следующем виде:

**PAR(\*) = C/1, C/2, D/2;**

Данная строчка означает, что в качестве изменяемых параметров будут использоваться кривизны первой (C/1) и второй (C/2) поверхностей, а так же второе осевое расстояние (D/2). Параметры записываются через запятую, в конце ставится точка с запятой.

Чтобы осевое расстояние в процессе оптимизации не принимало отрицательное, или слишком большое значение, необходимо дополнительно задать интервал изменения параметра:

**D>(2) = 100;**

**D<(2) = 50;**

Приведённые в качестве примера строчки означают, что второе осевое расстояние не может принимать значения больше 100 мм и меньше 50 мм. Важно, чтобы значение данного параметра изначально оказывалось в заявленном интервале.

### 2.4.2. Равенства-ограничения.

В процессе оптимизации иногда важно, чтобы какая-то характеристика не изменяла своего значения. Тогда её необходимо задать в программе оптимизации. Например, важно, чтобы не изменялось увеличение системы (VG0), или положение заднего отрезка (SG'). Тогда следует записать:

**EQF(\*) = VG0, SG';**

В процессе оптимизации на каждом шаге после изменения одного из параметров будет проверяться соответствующая величина. Если на очередном шаге значение характеристики не равно заданной величине, то программно она будет восстановлена изменением другого параметра оптимизации.

### 2.4.3. Минимизируемые функции.

Под минимизируемыми функциями понимаются абберационные характеристики системы. Например, при исправлении поперечной составляющей сферической абберации необходимо записать:

$$MF(*) = DYA/01;$$

В таком случае будет корректироваться поперечная составляющая сферической абберации для луча нулевой длины волны, проходящего через крайнюю точку зрачка. Если необходимо минимизировать абберацию по всему зрачку, то можно использовать следующую запись:

$$MF(*) = DYA/0*;$$

Знак \* означает, что данная функция задаётся для всех точек зрачка.

### 3. Указания по выполнению работы

3.1. При выполнении пункта 1.1 определяются основные характеристики телескопической системы Галилея по формуле 1.1.

Диафрагменное число  $k$  связывает между собой фокусное расстояние первого компонента и диаметр входного зрачка:

$$k = \frac{|f'_1|}{D_{вх}}. \quad (1.8)$$

3.2. Пункт 1.2 выполняется на основе габаритного расчёта системы по методике, описанной в пункте 2.2.

Абберационные свойства компонентов необходимо исследовать для разных марок материалов, сохраняя при этом фокусные расстояния за счёт изменения радиусов. После того, как будут использованы возможности коррекции сферической абберации за счёт выбора материалов и минимизации абберации положительной линзы, следует использовать возможности оптимизации системы программными средствами.

3.3. При выполнении пункта 1.3 необходимо оценить величину сферической абберации системы в соответствии с пунктом 2.3. В зависимости от полученного результата может потребоваться дальнейшая оптимизация системы, которая описана в пункте 2.4.

### 4. Оформление работы

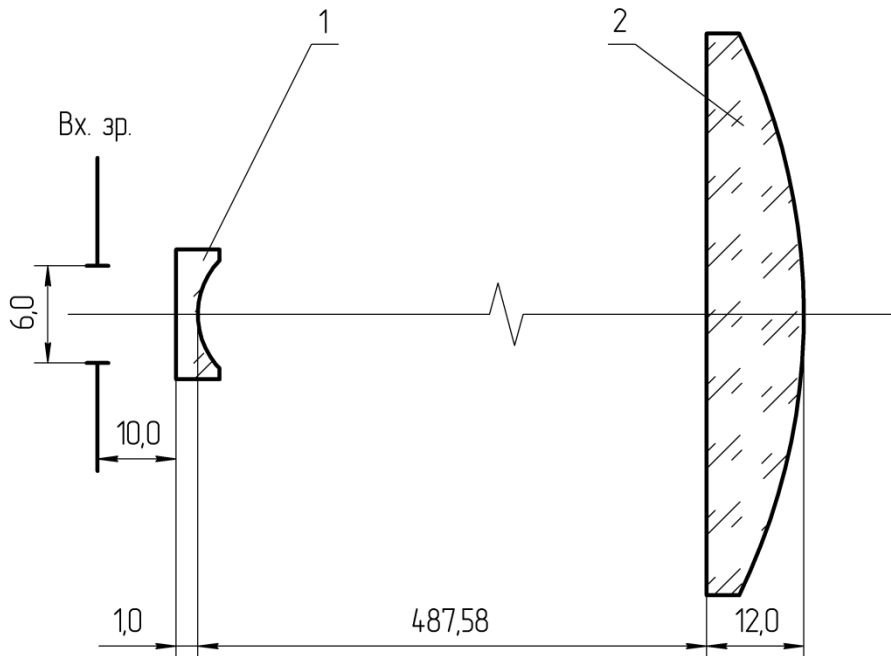
В отчёте должны быть представлены:

4.1. Габаритный расчёт и расчёт конструктивных параметров оптической системы.

4.2. Таблицы и графики сферической абберации компонентов и всей телескопической системы.

4.3. Оптическая схема с указанием необходимых параметров и размеров. Пример оформления схемы оптической принципиальной приведён на рисунке 1.10.

Длина волны:  $\lambda=0,6328$  мкм  
 Видимое увеличение:  $\Gamma=0,0667$   
 Диаметр входного зрачка:  $D=6$  мм  
 Узловое поле в пространстве предметов:  $2\omega=12'$



Фокусные расстояния и фокальные отрезки для  $\lambda=0,6328$  мкм

№ позиции	$f'$	$S_F$	$S'_F$
1	-34,233	35,131	-34,034
2	528,798	-521,610	529,383
Система	0	0	0

№ позиции	св. $\varnothing_1$	Стрелка по св. $\varnothing_1$	св. $\varnothing_2$	Стрелка по св. $\varnothing_2$	Толщина по оси
1	6,036	0,087	5,862	-0,239	1
2	96,618	0,374	96,868	-2,970	12

Рисунок 1.10. Пример оформления оптической схемы принципиальной.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<i>Схема оптическая принципиальная</i>	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.								
Пров.						Лист	Листов	
Т.контр.						<i>СПбГУИТМО</i>		
Н.контр.								
Утв.								

## 5. Вопросы для защиты

- 5.1. Укажите основные особенности оптических систем, работающих с лазерным излучением.
- 5.2. Какие характеристики оптической системы определяют габаритным расчётом?
- 5.3. Назовите основные характеристики телескопической системы.
- 5.4. Как сферическая aberrация линзы зависит от показателя преломления материала, из которого она изготовлена?
- 5.5. Как сферическая aberrация линзы зависит от её формы?
- 5.6. Какими способами можно уменьшить сферическую aberrацию в телескопической системе Галилея?
- 5.7. Укажите критерий, по которому можно оценить качество работы системы для коллимации лазерного излучения.

## 6. Литература

- 6.1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.А. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992.
- 6.2. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчёт и проектирование оптических систем. Учебник для ВУЗов. М.: Логос, 2000.
- 6.3. Русинов М.М., Грамматин А.П. и др. Вычислительная оптика. Под ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984.
- 6.4. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2000.

## 7. Варианты заданий для работы

Таблица 1.1.

№	$\lambda$ , МКМ	$2\omega$ , МИН	$2\omega'$ , МИН	D, ММ	- $a_p$ , ММ	D/f <sub>1</sub>
1	3	15	3	5	20	1/3,2
2	0,6328	10	2	5	10	1/3
3	0,4416	8	1	2	5	1/3
4	1,543	20	1	2	0	1/3
5	0,526	12	1	3	10	1/3,2
6	0,885	12	2	6	6	1/3,5
7	0,6328	10	1	3	12	1/4

8	1,543	20	2	2	0	1/3
9	4	15	2,5	6	15	1/4,5
10	2,5	12	2	8	25	1/3,2
11	0,6328	12	0,8	3	8	1/4
12	0,526	10	2	6	12	1/3,5
13	1,064	16	1,6	5	0	1/3
14	0,4416	10	0,5	3	10	1/4
15	0,526	10	0,8	2	14	1/3,5
16	0,4416	12	2	5	15	1/3
17	0,885	15	2,5	5	8	1/4
18	0,5397	8	0,8	4	15	1/2,8
19	0,6328	10	0,9	4	14	1/4
20	0,6328	12	1,5	6	15	1/3
21	0,6328	8	1	2	6	1/3,6
22	3	12	1	4	20	1/3
23	4	12	2,5	8	15	1/2,8
24	1,064	20	4	6	0	1/3
25	4	15	2	4	0	1/3,3
26	0,5397	20	1,5	3	10	1/3
27	4	12	2,5	2	0	1/3,5
28	0,6328	10	2	6	12	1/3,2
29	2,5	10	3	2	5	1/3
30	0,4416	8	2	2	10	1/2,8



## **Лабораторная работа №2**

### **«Оптическая система для концентрации лазерного излучения»**

**Цель работы:** Углубление знаний по разделу «преобразование лазерных пучков» и приобретение практических навыков расчёта систем для концентрации лазерного излучения.

#### **1. Задание для работы**

- 1.1. В соответствии с заданием (таблица 2.1) выполнить габаритный расчёт системы.
- 1.2. Определить конструктивные параметры компонентов системы.
- 1.3. Исследовать абберационные свойства системы.
- 1.4. Выполнить абберационную коррекцию всей системы.

#### **2. Теоретическая часть**

Системы для концентрации лазерного излучения предназначены для получения наибольшей поверхностной плотности потока излучения на площадке малых размеров. Подобные системы применяются в режущих и сверлильных станках, где собранное в малой площадке излучение мощного лазера выпаривает материал из детали. Сварка с помощью лазера двух деталей подразумевает нагрев соединяемых поверхностей на всю глубину и в дальнейшем их спекание. Восстановление изношенных поверхностей деталей трения, например, валов, производится так же помощи концентрации лазерного излучения. В этом случае последовательно напыляют на изношенную поверхность тонкие слои порошкообразного вещества, которое нагревают лазером. Детали, восстановленные подобным образом, имеют высокую износоустойчивость. Концентрируя лазерное излучение определённых длин волн можно проводить хирургические операции с высокой степенью точности при малых повреждениях окружающих тканей.

Оптическая система для концентрации лазерного излучения ввиду специфики работы имеют особенные свойства и должны удовлетворять специальным требованиям, предъявляемым к ним.

Лазеры являются монохроматическими источниками излучения, поэтому расчёт оптической системы концентратора ведётся на одну основную длину волны.

Лазеры генерируют излучение большой мощности. Не допускается промежуточное действительное изображение внутри оптической системы, передающей излучение. В противном случае нагрев в области перетяжки может спровоцировать поломку прибора.

Оптическая система концентратора должна иметь большую оптическую силу для того, чтобы собрать излучение на площадке малого размера. Следовательно, фокусное расстояние системы должно быть как можно меньше. Если использовать обычный короткофокусный объектив, то у него расстояние

от последней поверхности до места фокусировки будет приблизительно равно или меньше фокусного расстояния объектива, что недопустимо при эксплуатации. Место фокусировки лазерного излучения должно находиться на значительном расстоянии от объектива. Однокомпонентная система не может удовлетворить этим двум взаимоисключающим требованиям: большой задний отрезок при малом фокусном расстоянии. Для решения этой задачи используются или двухкомпонентные системы в виде перевёрнутого телеобъектива, или трёхкомпонентные, состоящие из перевёрнутой телескопической системы и линзы. Принципиальная оптическая схема трёхкомпонентной системы для концентрации лазерного излучения приведена на рисунке 2.1.

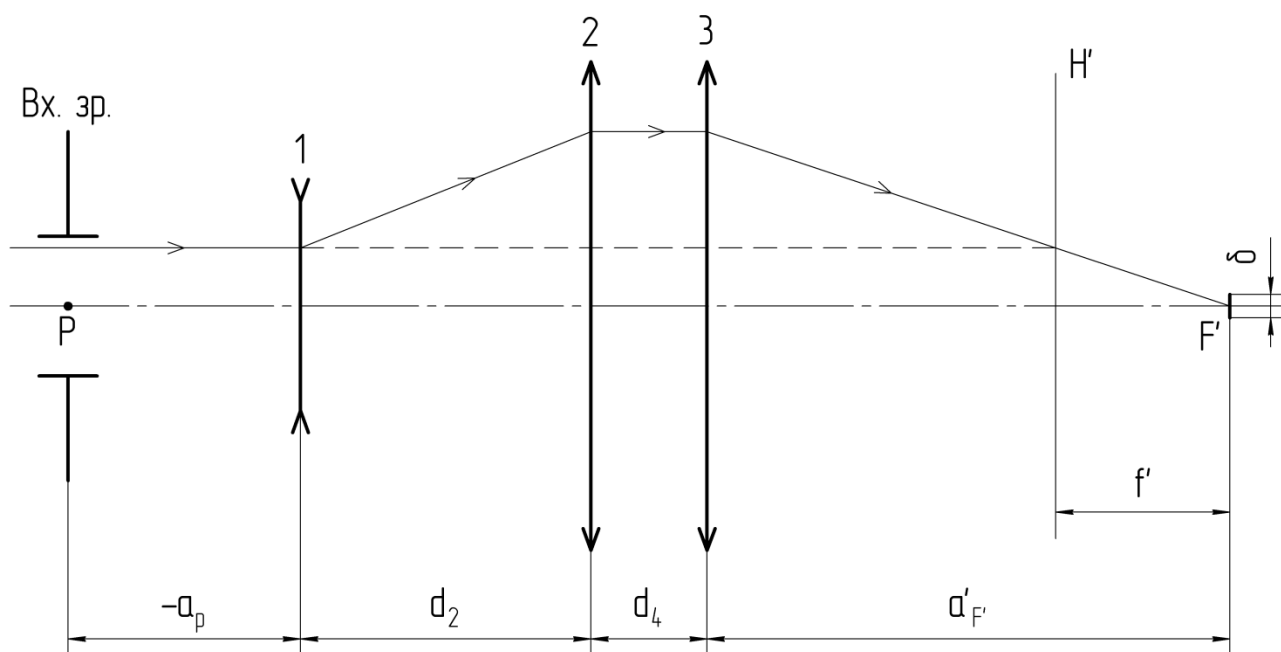


Рисунок 2.1. Принципиальная оптическая схема трёхкомпонентной системы для концентрации лазерного излучения.

В процессе расчёта оптической системы удобно принять, что излучающий предмет находится на бесконечности. Его угловые размеры определяются углом  $2\omega$ , равным углу расходимости. Чтобы добиться наилучшего сопряжения лазера с последующей оптической системой входной зрачок последней должен находиться в области перетяжки лазера.

Основными характеристиками системы для концентрации лазерного излучения являются:

- фокусное расстояние  $f'$ ,
- диаметр входного зрачка  $D$ , равный или несколько больший диаметру перетяжки лазера,
- угловое поле в пространстве предметов  $2\omega$ , равное или несколько большее расходимости лазерного пучка,
- расстояние от третьего компонента до места фокусировки  $a'_{F'}$ .

## 2.1. Габаритный расчёт

Задачей габаритного расчёта является определение оптических сил и основных характеристик всей системы и каждого её компонента. Основные формулы для габаритного расчёта:

$$f' = \frac{D}{2A'} = \frac{\delta}{2tg\omega} = \Gamma_{12}f'_3, \quad (2.1)$$

где:  $A'$  – задняя апертура системы;

$\omega$  – угловой размер предмета;

$\delta$  – линейный размер изображения – диаметр площадки для фокусировки лазерного излучения;

$f'_3$  – фокусное расстояние третьего компонента, можно принять приблизительно равным заднему отрезку системы  $f'_3 \approx a'_{F'}$ ;

$\Gamma_{12}$  – угловое увеличение телескопической системы, состоящей из первого и второго компонента, которое равно:

$$\Gamma_{12} = \frac{f'_1}{f'_2}, \quad (2.2)$$

где:  $f'_1$  – фокусное расстояние первого компонента;

$f'_2$  – фокусное расстояние второго компонента.

Расстояние между компонентами телескопической системы  $d_2$  равно:

$$d_2 = f'_1 + f'_2. \quad (2.3)$$

## 2.2. Расчёт конструктивных параметров

В дальнейшем, по результатам габаритного расчёта, производится расчёт конструктивных параметров каждого компонента системы. К конструктивным параметрам относятся радиусы поверхностей, осевые расстояния, показатели преломления материалов и, если в системе есть несферические поверхности, коэффициенты асферики.

Положительные линзы имеют отрицательное значение сферической абберации, а отрицательные – положительное. Для устранения сферической абберации во всей системе нужно, чтобы суммарная сферическая абберация положительных компонентов была бы равна по модулю и противоположна по знаку сферической абберации отрицательного компонента. Абберации при одинаковом относительном отверстии пропорциональны фокусному расстоянию. Фокусное расстояние первого отрицательного компонента значительно меньше фокусных расстояний второго и третьего положительных компонентов. Отсюда следует, что необходимо уменьшать сферическую

аберрацию положительных компонентов и увеличивать значение сферической aberrации отрицательного компонента. Для этого нужно выполнить вторую и третью линзы из материала с более высоким показателем преломления, а первую – с более низким.

Сначала можно выполнить все линзы с одной плоской поверхностью. Первая линза должна иметь максимальную сферическую aberrацию и для этого её нужно поставить плоской стороной к параллельному ходу лучей. Вторая и третья линзы должны вносить минимальную сферическую aberrацию, следовательно, их необходимо расположить выпуклой стороной к параллельному ходу лучей. Отсюда следует, что радиусы линз равны:

$$r_1 = \infty$$

$$r_2 = (1 - n_2) f'_1$$

$$r_3 = \infty$$

$$r_4 = (1 - n_4) f'_2$$

$$r_5 = (n_2 - 1) f'_3$$

$$r_6 = \infty$$

Осевое расстояние между вторым и третьим элементами не оказывает существенного влияния на качество работы системы. Его можно принять равным  $d_2 = 1$  мм.

Толщины линз определяются исходя из условия тонких компонентов, т.е. они в 5 – 20 раз меньше световых диаметров компонентов. При этом толщина отрицательной линзы из технологических соображений должна быть не менее 1 мм. Толщина по краю положительных линз должна быть не менее 0,05 от их светового диаметра.

Система для концентрации лазерного излучения требует коррекции искажений осевой точки – сферической aberrации, а также aberrации в приосевой зоне – комы.

### 2.3. Оценка качества работы системы

Критерием качества работы системы являются размеры пятен рассеяния. Пятно рассеяния не должно превышать заданных параметров площадки  $\delta$ . В противном случае плотность потока излучения может оказаться недостаточной.

Если рассчитанная система не удовлетворяет установленным требованиям, необходимо провести оптимизацию, в процессе которой численными методами будут скомпенсированы остаточные aberrации как третьего, так и высших порядков.

## 2.4. Оптимизация

Чтобы провести оптимизацию с помощью пакета «ОПАЛ», необходимо написать программу оптимизации, в которой должны быть указаны следующие три группы параметров:

### 2.4.1. Параметры оптимизации.

Под параметрами оптимизации понимаются характеристики системы, изменение которых будет происходить в процессе оптимизации. В первую очередь к ним относятся конструктивные параметры – кривизны поверхности (C), осевые расстояния (D). Так же в качестве параметров оптимизации могут быть заданы, например, положение предмета и входного зрачка.

Запись необходимых параметров осуществляется в следующем виде:

**PAR(\*) = C/1, C/2-6, D/2;**

Данная строчка означает, что в качестве изменяемых параметров будут использоваться кривизны всех шести поверхностей системы (C/1, C/2-6), а также второе осевое расстояние (D/2). Параметры записываются через запятую, в конце ставится точка с запятой. Параметры можно записывать как отдельными марками (C/1, D/2), так и групповой маркой (C/2-6).

Чтобы осевое расстояние в процессе оптимизации не принимало отрицательное, или слишком большое значение, необходимо дополнительно задать интервал изменения данного параметра:

**D>(2) = 250;**

**D<(2) = 200;**

Приведённые в качестве примера строчки означают, что второе осевое расстояние не может принимать значение больше 250 мм и меньше 200 мм. Важно, чтобы значение данного параметра изначально оказывалось в заявленном интервале.

### 2.4.2. Равенства-ограничения.

В процессе оптимизации иногда важно, чтобы какая-то характеристика не изменяла своего значения. Тогда её необходимо задать в программе оптимизации. Например, важно, чтобы не изменялось увеличение системы (VG0), или положение заднего отрезка (SG'). Тогда следует записать:

**EQF(\*) = VG0, SG';**

В процессе оптимизации на каждом шаге после изменения одного из параметров будет проверяться соответствующая величина. Если на очередном шаге значение характеристики не равно заданной величине, то программно она будет восстановлена изменением другого параметра оптимизации.

### 2.4.3. Минимизируемые функции.

Под минимизируемыми функциями понимаются абберационные характеристики системы. Например, при исправлении поперечной составляющей сферической абберации необходимо записать:

$$MF(*) = DYA/01;$$

В таком случае будет корректироваться поперечная составляющая сферической абберации для луча нулевой длины волны, проходящего через крайнюю точку зрачка. Если необходимо минимизировать абберацию по всему зрачку, то можно использовать следующую запись:

$$MF(*) = DYA/0*;$$

Знак \* означает, что данная функция задаётся для всех точек зрачка.

Можно задать сразу несколько различных функций:

$$MF(*) = DYA/0*, DPA/0*;$$

Приведённая строчка означает, что будут минимизированы поперечная составляющая сферической абберации (DYA) и величина неизопланатизма (DPA) для нулевой длины волны для всех точек на зрачке.

### 3. Указания по выполнению работы

3.1. При выполнении пункта 1.1 определяются основные характеристики системы по формулам 2.1 – 2.3.

Диафрагменное число  $k$  связывает между собой фокусное расстояние первого компонента и диаметр входного зрачка:

$$k = \frac{|f'_1|}{D} \quad (2.4)$$

3.2. Пункт 1.2 выполняется на основе габаритного расчёта системы по методике, описанной в пункте 2.2.

Абберационные свойства компонентов необходимо исследовать для разных марок материалов, сохраняя при этом фокусные расстояния за счёт изменения радиусов. После того, как будут использованы возможности коррекции сферической абберации за счёт выбора материалов и минимизации абберации системы положительных линз, следует использовать возможность оптимизации системы программными средствами.

3.3. При выполнении пункта 1.3 необходимо оценить величину сферической абберации системы и неизопланатизма в соответствии с пунктом 2.3. В зависимости от полученного результата может потребоваться дальнейшая оптимизация системы, которая описана в пункте 2.4.

### 4. Оформление работы

В отчёте должны быть представлены:

- 4.1. Габаритный расчёт и расчёт конструктивных параметров оптической системы
- 4.2. Таблицы и графики сферических aberrаций компонентов и всей системы.
- 4.3. Оптическая схема с указанием необходимых параметров и размеров. Пример оформления схемы оптической принципиальной приведён на рисунке 2.2.

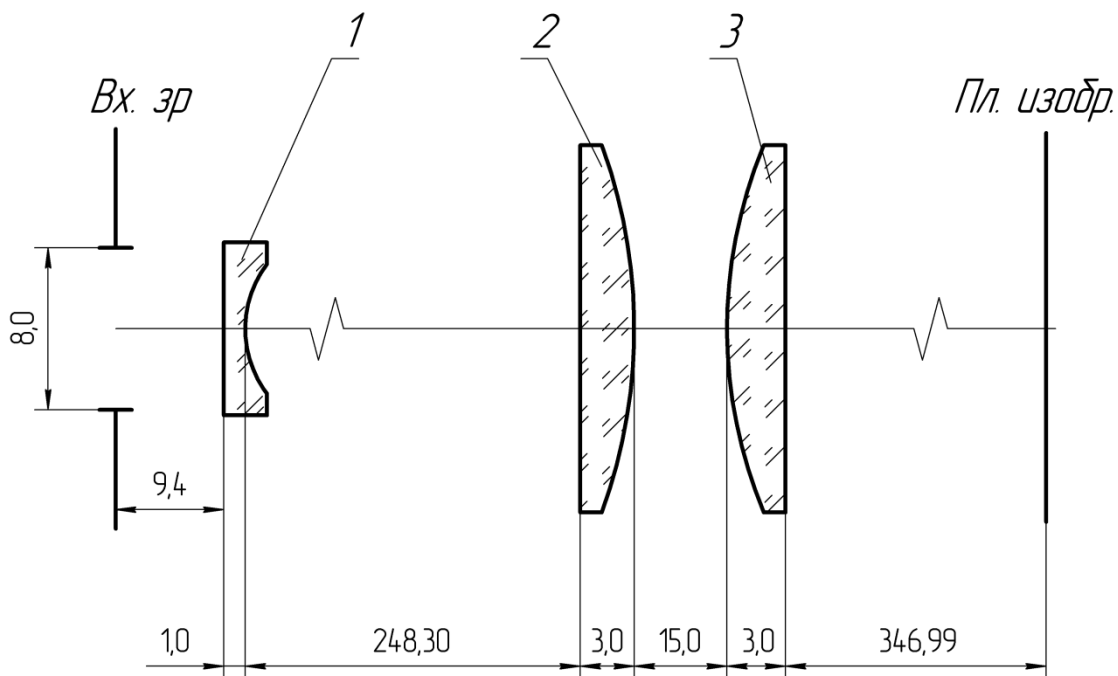
## **5. Вопросы для защиты**

- 5.1. Укажите основные особенности оптических систем, работающих с лазерным излучением.
- 5.2. В каких областях используются системы для концентрации лазерного излучения?
- 5.3. Назовите основные характеристики фотографической системы.
- 5.4. Что понимается под конструктивными параметрами оптической системы?
- 5.5. Какие равенства-ограничения накладываются на систему в процессе оптимизации и почему?
- 5.6. Какие aberrации необходимо исправить в рассчитываемой системе?
- 5.7. Укажите критерий, по которому можно оценить качество работы системы для концентрации лазерного излучения.

## **6. Литература**

- 6.1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.А. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992.
- 6.2. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчёт и проектирование оптических систем. Учебник для ВУЗов. М.: Логос, 2000.
- 6.3. Русинов М.М., Грамматин А.П. и др. Вычислительная оптика. Под ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984.
- 6.4. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2000.

Длина волны:  $\lambda=0,448$  мкм  
 Эквивалентное фокусное расстояние:  $f'=137,51$  мм  
 Диаметр входного зрачка:  $D=8$  мм  
 Угловое поле в пространстве предметов:  $2\omega=10'$



Фокусные расстояния и фокальные отрезки для  $\lambda=0,448$  мкм

№ позиции	$f'$	$S_F$	$S'_F$
1	-161,961	162,653	-161,961
2	411,9	-410,259	411,9
3	349,729	-349,729	348,088
Система	137,5146	47,2174	346,9941

№ позиции	Св. $\varnothing_1$	Стрелка по св. $\varnothing_1$	Св. $\varnothing_2$	Стрелка по св. $\varnothing_2$	Толщина по оси
1	8	0	8,002	0,111	1
2	21,048	0	21,102	-0,163	3
3	21,120	0,193	20,964	0	3

Рисунок 2.2. Пример оформления оптической схемы принципиальной.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Схема оптическая принципиальная	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.								
Пров.						Лист	Листов	
Т.контр.						СПбГУИТМО		
Н.контр.								
Утв.								



## 7. Варианты заданий для работы

Таблица 2.1.

№	$\lambda$ мкм	$2\omega$ мин	$\delta$ мм	$D$ мм	$-a_p$ мм	$a'_F$	$k$
1	3	15	0,4	5	20	200	7
2	0,6328	10	0,1	1,5	10	300	3
3	0,4416	8	0,08	2	5	500	6
4	0,526	12	0,2	3	10	350	8
5	0,885	12	0,1	2,5	0	250	5
6	0,6328	10	0,15	3	12	400	6
7	4	8	0,3	6	15	300	8
8	2,5	12	0,25	8	25	200	4
9	0,6328	12	0,2	3	0	200	8
10	0,526	10	0,1	6	12	250	4
11	0,4416	10	0,1	3,5	10	300	5
12	0,526	10	0,15	2	14	500	4
13	0,4416	12	0,15	5	15	450	3
14	0,885	15	0,25	1,5	8	300	4
15	0,5397	5	0,1	4	15	250	6
16	0,6328	10	0,08	4	14	350	4
17	0,6328	12	0,12	3,5	15	450	5
18	0,6328	5	0,15	2	6	200	7
19	3	12	0,25	4	20	350	7
20	4	12	0,4	2,5	15	400	3
21	1,064	10	0,25	3	0	300	5
22	2,5	5	0,3	2	8	250	6
23	2,5	12	0,1	1,5	0	400	3
24	0,4416	12	0,25	4	6	400	4,5
25	3	5	0,2	4	10	350	5
26	1,064	15	0,1	2,5	12	300	4,5
27	0,526	12	0,2	3	0	200	6
28	0,885	10	0,15	2	15	200	4
29	0,526	10	0,15	1,5	8	250	3
30	1,064	15	0,25	3	0	300	5

## Лабораторная работа №3

### «Разработка, анализ качества изображения, определение влияния параметров и расчёт допусков телескопической системы»

**Цель работы:** Приобретение практических навыков разработки телескопической системы от габаритного расчёта до расчёта допусков и создания конструкторской документации.

#### 1. Задание для работы

- 1.1. В соответствии с заданием (таблица 3.1) выполнить габаритный расчёт и выбор компонентов телескопической системы Кеплера.
- 1.2. Провести анализ качества изображения и абберационную коррекцию системы.
- 1.3. Исследовать влияние конструктивных параметров и децентрировок на абберации оптического изображения.
- 1.4. Рассчитать допуски на изготовление и сборку телескопической системы.

#### 2. Теоретическая часть

Телескопическая система Кеплера используется как основная схема наблюдательной системы в биноклях, зрительных трубах, визирах, прицелах, дальномерах, а также как одна из составляющих в сложных оптических системах геодезических, стереоскопических, контрольно-измерительных, астрономических и других приборах.

Достоинством системы Кеплера является наличие действительного промежуточного изображения. В задней фокальной плоскости объектива устанавливается сетка или шкала, что превращает прибор из наблюдательного в измерительный.

Особенностью схемы является перевернутое изображение объектов. Получение прямого изображения достигается введением призмённых оборачивающих систем различной конструкции.

В качестве входного зрачка системы часто выступает оправка объектива, либо он может быть несколько вынесен перед первым компонентом.

Основные характеристики телескопической системы: угловое увеличение  $\Gamma$ , угловое поле в пространстве предметов  $2\omega$  и диаметр входного зрачка  $D$ . Другими важными характеристиками являются длина системы  $L$ , удаление выходного зрачка  $a'_p$ .

#### 3. Указания по выполнению работы

- 3.1. Габаритный расчёт телескопической системы Кеплера.

Задачей габаритного расчета является определение оптических сил и основных характеристик всей системы и каждого ее компонента.

Принципиальная оптическая схема с ходом апертурного и главного лучей в системе Кеплера приведена на рисунке 3.1.

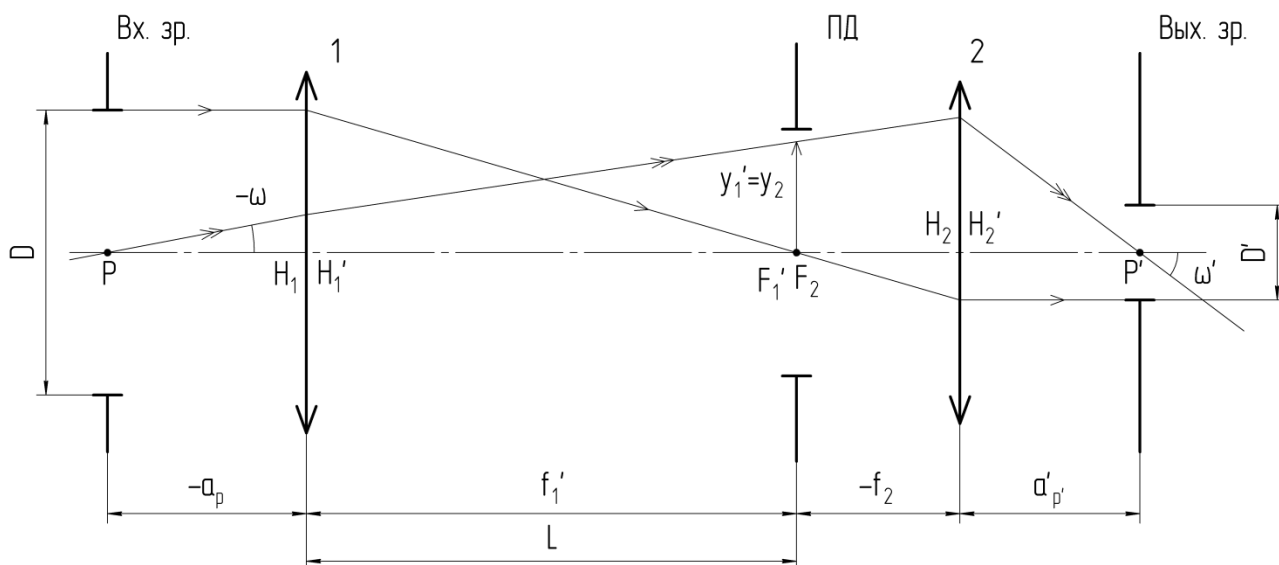


Рисунок 3.1. Принципиальная оптическая схема телескопической системы Кеплера с ходом апертурного и главного лучей.

Основные характеристики телескопической системы Кеплера взаимосвязаны следующим соотношением:

$$-\Gamma = -\frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{D}{D'} = \frac{f_1'}{f_2'}, \quad (3.1)$$

где:  $\Gamma$  – видимое увеличение телескопической системы;

$2\omega$  (град)– угловое поле оптической системы в пространстве предмета;

$2\omega'$  (град) – угловое поле оптической системы в пространстве изображения;

$D$  (мм) – диаметр входного зрачка системы;

$D'$  (мм) – диаметр выходного зрачка системы;

$f_1'$  (мм) – фокусное расстояние объектива;

$f_2'$  (мм) – фокусное расстояние окуляра.

Удаление выходного зрачка от совмещенных главных плоскостей окуляра  $a'_{P'}$  можно определить из соотношения:

$$\Gamma^2 = \frac{a_P + f_1'}{a'_{P'} - f_2'}, \quad (3.2)$$

где  $a_p$  – расстояние от совмещенных главных плоскостей объектива до входного зрачка.

Длина системы  $L$  равна:

$$L = f'_1 + f'_2. \quad (3.3)$$

Диаметр полевой диафрагмы  $D_{ПД}$  можно рассчитать по формуле:

$$D_{ПД} = 2 f'_1 \cdot \operatorname{tg} \omega = 2 f'_2 \cdot \operatorname{tg} \omega'. \quad (3.4)$$

Выбор компонентов системы производится из каталогов по рассчитанным основным характеристикам.

### 3.2. Выбор окуляра.

Окуляры выбирают по фокусному расстоянию  $f'_2$ , угловому полю в пространстве изображений  $2\omega'$  и диаметру выходного зрачка  $D'$ .

Конструктивные параметры окуляров можно найти в библиотеке оптических систем программы «ОПАЛ» (подкаталог OKULAR), либо выбрать в методических указаниях [6.5]. Следует помнить, что окуляры в библиотеке «ОПАЛ» заданы в обратном ходе. Их следует обернуть.

Значение фокусного расстояния  $f'_2$  должно быть как можно ближе к расчетной величине.

Угловое поле  $2\omega'$  окуляра из каталога должно быть не менее рассчитанного значения.

Следует выбирать окуляр с диаметром выходного зрачка  $D'$  равным, либо немного больше определенного из габаритного расчета значения.

В полученном таким образом окуляре необходимо проверить правильность значения положения выходного зрачка  $S'_p$ .

В отчете должны быть приведены конструктивные данные и чертеж окуляра с указанием фокусных расстояний  $f$  и  $f'$ , фокальных отрезков  $S_F$  и  $S'_F$ , линейного поля в пространстве предмета  $2y$ , углового поля в пространстве изображения  $2\omega'$ , диаметра  $D'$  и положения  $S'_p$  выходного зрачка.

### 3.3. Выбор и пересчет объектива.

Вследствие того, что фокусное расстояние выбранного из каталога окуляра  $f'_{2 \text{ каталог}}$  будет отличаться от расчетного значения  $f'_2$ , а окуляры не принято масштабировать, предварительно необходимо провести пересчет значения фокусного расстояния объектива  $f'_1$  по формуле:

$$f'_{1 \text{ пересчет}} = -\Gamma f'_{2 \text{ каталог}} \quad (3.5)$$

Объективы выбирают по пересчитанному значению фокусного расстояния  $f'_{1 \text{ пересчет}}$ , угловому полю в пространстве предметов  $2\omega$  и относительному отверстию  $D/f'_{1 \text{ пересчет}} = 1/k$ .

В качестве объективов простых зрительных труб целесообразно использовать двухлинзовые склеенные объективы. Конструктивные параметры объективов можно найти в библиотеке программы «ОПАЛ» (подкаталог SKL\_ОВ) и в литературных источниках [6.3, 6.5].

При выборе следует руководствоваться условиями:

- фокусное расстояние выбираемого объектива должно быть как можно ближе к пересчитанному значению  $f'_{1\text{пересчет}}$ ;
- угловое поле  $2\omega$  в пространстве предмета должно быть равно, либо несколько больше расчетного;
- диаметр входного зрачка  $D$  должен быть равен, либо несколько больше расчетного. Соответственно, величина диафрагменного числа  $k$  должна быть не более чем заданное значение.

Фокусное расстояние выбранного из каталога объектива  $f'_{1\text{каталог}}$  обычно не совпадает с пересчитанным  $f'_{1\text{пересчет}}$ , поэтому проводят масштабирование объектива. Для этого определяют коэффициент масштабирования  $k_M$ :

$$k_M = \frac{f'_{1\text{пересчет}}}{f'_{1\text{каталог}}}. \quad (3.6)$$

Желательно, чтобы коэффициент масштаба был в пределах от 0.5 до 2.5.

В полученном таким образом объективе необходимо проверить правильность значения выноса входного зрачка  $S_P$ .

В отчете должны быть приведены конструктивные данные и чертеж объектива с указанием фокусных расстояний  $f$  и  $f'$ , фокальных отрезков  $S_F$  и  $S'_{F'}$ , углового поля в пространстве предмета  $2\omega$ , линейного поля в пространстве изображения  $2y'$ , диаметра  $D$  и положения  $S_P$  входного зрачка.

Далее следует присоединить к объективу окуляр. Расстояние между объективом и окуляром  $d_3$  рассчитывается по формуле:

$$d_3 = S'_{F'1} - S_{F2}, \quad (3.7)$$

где  $S'_{F'1}$  – задний фокальный отрезок объектива,  
 $S_{F2}$  – передний фокальный отрезок окуляра.

Проверкой правильности задания системы является совпадение углового увеличения  $\Gamma$  с расчетным значением и величина заднего отрезка всей системы  $L'=0$  дптр.

### 3.4. Расчёт призмы.

Призма или призмённые системы вводятся в простую зрительную трубу Кеплера для получения прямого изображения, сокращения габаритов оптической системы, компенсации вращения изображения, получения заданного угла между оптическими осями объектива и окуляра, который должен обеспечить удобное положение головы наблюдателя.

Особенность габаритного расчёта оптической системы с призмами состоит в том, что необходимо определить положение и габариты призм. Для этого необходимо: 1) найти задний фокальный отрезок объектива  $S'_{F_1}$ ; 2) световой диаметр объектива; 3) размер полевой диафрагмы; 4) передний фокальный отрезок окуляра  $S_{F_1}$  и фокусное расстояние окуляра; 5) учесть, что в процессе расчёта призмы заменяются эквивалентными плоскопараллельными пластинами, которые затем редуцируются, т.е. заменяются эквивалентными воздушными пластинами, причём:

$$d_{\text{возд}} = \frac{d}{n}. \quad (3.8)$$

Такие замены возможны, если первая и последняя грани призмы перпендикулярны к оптической оси;

Положение призмы в заданном коническом пучке зависит от различных конструктивных требований.

Для получения наименьших габаритов призмы её нужно помещать ближе к узкой части светового конуса. Когда призма создает перископичность, её положение определяется необходимостью обеспечения значения перископичности. Заднюю грань призмы не следует располагать слишком близко к передней фокальной плоскости окуляра, т.к. все дефекты стекла (пузыри, мелкие царапины, пылинки) видны и мешают наблюдению. Оптимальное положение призмы, определяемое отрезком  $z$ , будет таким, при котором её последняя поверхность размещается перед окуляром так, что изображение поверхности в поле окуляра получается вне пределов аккомодации глаза наблюдателя:

$$z \geq 0,01 f_2'^2. \quad (3.9)$$

Выбрав положение выходной грани, проводят вспомогательную прямую под углом  $\gamma$  к оси до пересечения с краем пучка лучей (рисунок 3.2). Угол  $\gamma$  находим по формуле:

$$\text{tg} \gamma = \frac{n}{2k}, \quad (3.10)$$

где  $n$  – показатель преломления стекла;

$k$  – коэффициент, характеризующий тип призмы, он определяется из справочника [6.6].

Добавляя 1 ÷ 2 мм на крепление и юстировку призмы, проводят прямую, определяющую положение входной грани. Диаметр призмы снимаем с чертежа. Затем определяем длину хода луча в призме:

$$d = k \cdot D_{\text{призмы}} \cdot \quad (3.11)$$

Ширина редуцированной воздушной пластинки равна:

$$d_{\text{возд}} = \frac{d}{n}. \quad (3.12)$$

Её сравнивают для проверки с толщиной пластинки, измеренной по чертежу.

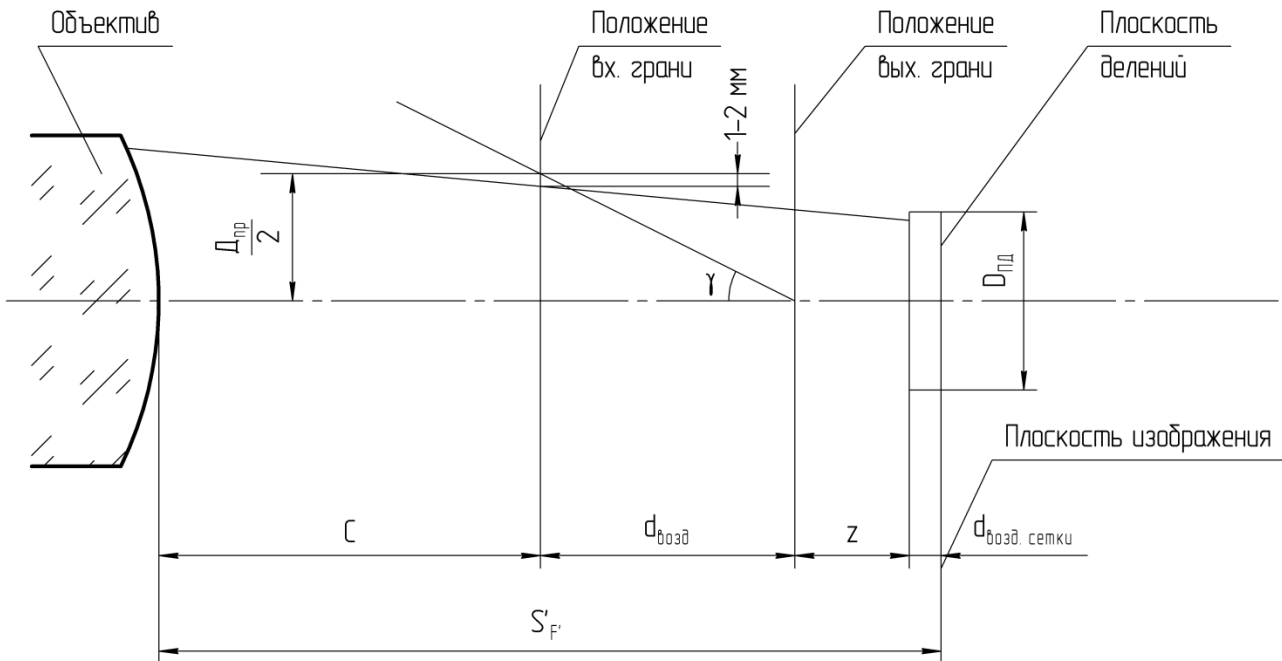


Рисунок 3.2. Определение размеров граней призмы.

Расстояние от последней поверхности объектива до входной грани призмы определяется по формуле:

$$c = S'_{F_1} - d_{\text{возд.сетки}} - z - d_{\text{возд}}. \quad (3.13)$$

Если изображение находится на первой поверхности сетки (т.е. плоскость делений на 1-ой поверхности), отрезок определяется, по формуле:

$$c = S'_{F_1} - z - d_{\text{возд}}. \quad (3.14)$$

Как только будут определены диаметры пучков, которые должны пропустить призмы, остальные размеры отражательных призм определяются из справочника. Затем дается чертёж призмы со всеми размерами.

### 3.5. Расчёт сетки.

Сетка или шкала устанавливается в плоскость промежуточного изображения для измерения размеров объектов и определения их дальности. Сетка представляет собой плоскопараллельную пластину из стекла марок БК10 или К8. Для уменьшения влияния на качество изображения дефектов стекла, саму шкалу, в основном, располагают на второй поверхности пластинки. Диаметр сетки определяется по формуле (3.4). Толщина пластин выбирается 2 – 2.5 мм, при большом диаметре в широкопольных окулярах ( $D_{\text{пд}} \geq 25$  мм) может выбираться 2.8 мм. Аналогично призме определяется толщина эквивалентной воздушной пластинки по формуле (3.8).

При правильно рассчитанных и заданных положениях призмы и сетки значения увеличения  $\Gamma$  и заднего отрезка  $L'$  системы не изменяются. Отклонение данных параксиальных характеристик от начальных значений свидетельствует о допущенной в ходе расчета ошибке.

### 3.6. Анализ качества изображения.

Анализ качества изображения следует проводить по значениям остаточных aberrаций телескопической системы.

Телескопическая система работает непосредственно с глазом наблюдателя. Остаточные aberrации зрительной трубы не снижают качество изображения, если их величина не превышает разрешающую способность глаза. Следовательно, поперечная составляющая сферической aberrации для основной длины волны не должна превышать  $1'$ . Хроматическое искажение изображения до  $3'$  не приводит к заметному ухудшению качества. Величина поперечной составляющей сферической aberrации для крайних значений спектрального диапазона не должна превышать  $3'$ . На краю поля зрения качество изображения может быть несколько ниже. Поперечная aberrация внеосевых точек для основной длины волны не должна превышать  $5'$ , а для крайних значений спектрального диапазона –  $10'$ . Если остаточные aberrации системы меньше указанных значений, то система строит изображение с вполне удовлетворительным качеством. В противном случае требуется оптимизация конструктивных параметров системы с целью повышения качества изображения.

### 3.7. Оптимизация.

Чтобы провести оптимизацию с помощью пакета «ОПАЛ», необходимо написать программу оптимизации. Вследствие больших aberrаций целесообразно проводить оптимизацию по геометрическим aberrациям. В программе оптимизации должны быть указаны следующие три группы параметров:

#### 3.7.1. Параметры оптимизации.



Под параметрами оптимизации понимаются характеристики системы, изменение которых будет происходить в процессе оптимизации. В первую очередь к ним относятся конструктивные параметры – кривизны поверхностей (C), осевые расстояния (D). Так же в качестве параметров оптимизации могут быть заданы, например, положение предмета и входного зрачка.

Запись необходимых параметров осуществляется в следующем виде:

$$\mathbf{PAR(*) = C/1-3, D/3;}$$

Данная строчка означает, что в качестве изменяемых параметров будут использоваться кривизны поверхностей склеенного объектива (C/1, C/2, C/3), а так же расстояние от объектива до призмы (D/3). Параметры записываются через запятую, в конце ставится точка с запятой.

Чтобы осевое расстояние в процессе оптимизации не принимало отрицательное, или слишком большое значение, необходимо дополнительно задать интервал изменения этого параметра, например:

$$\mathbf{D > (3) = 30;}$$

$$\mathbf{D < (3) = 10;}$$

Приведенные в качестве примера строчки означают, что третье осевое расстояние не может принимать значение больше 30 мм и меньше 10 мм. Важно, чтобы значение данного параметра изначально оказывалось в заявленном интервале.

### 3.7.2. Равенства-ограничения.

В процессе оптимизации важно, чтобы некоторые характеристики не изменяли своего значения. Тогда необходимо задать их в программе оптимизации. Например, важно, чтобы не изменялось угловое увеличение системы  $\Gamma$  (VG0) и положение заднего отрезка  $L'$  (SG'). Тогда следует записать:

$$\mathbf{EQF(*) = VG0, SG';}$$

В процессе оптимизации на каждом шаге после изменения одного из параметров будут проверяться соответствующие величины. Если на очередном шаге значение характеристики не равно заданной величине, то программно она будет восстановлена изменением другого параметра оптимизации.

### 3.7.3. Минимизируемые функции.

Под минимизируемыми функциями понимаются абберрационные характеристики системы. Например, при исправлении поперечной составляющей сферической абберрации необходимо записать:

$$\mathbf{MF(*) = DYA/01;}$$

В таком случае будет корректироваться поперечная составляющая сферической абберрации для луча основной длины волны, проходящего через крайнюю точку зрачка. Если необходимо минимизировать абберрацию по всему зрачку, то можно использовать следующую запись:

$$\mathbf{MF(*) = DYA/0*};$$

Знак \* означает, что данная функция задается для всех точек зрачка.

При необходимости коррекции aberrаций крайних точек поля дополнительно может быть задана меридиональная составляющая поперечной aberrации:

$$MF(*) = DYA/0*, DYM/011*;$$

В этом случае кроме aberrаций осевой точки (**DYA/0\***) исправляются aberrации меридионального сечения (**DYM/011\***) основной длины волны (**0**), крайнего пучка (**1**) для лучей, проходящих через край зрачка (**1**), рассматривается как верх, так и низ зрачка (\*).

Критерием окончания оптимизации являются величины остаточных aberrаций системы, не превышающих значений, приведенных в пункте 3.6.

После оптимизации необходимо проверить – не сместилось ли промежуточное изображение с поверхности сетки и, при необходимости, скорректировать расстояния от призмы до сетки и от сетки до окуляра.

В дальнейшем необходимо перейти на радиусы по стандартному ряду. При этом все радиусы, полученные в результате оптимизации, автоматически будут заменены ближайшими по значению из ряда ГОСТа. Так же необходимо округлить (до десятых) величины осевых расстояний. Следует проверить – не нарушились ли требования к качеству изображения, определенные в пункте 3.6.

### 3.8. Таблицы aberrаций.

В отчёте необходимо представить таблицы aberrаций (см. примеры оформления в таблицах 3.2 – 3.5) и графики aberrаций (см. примеры оформления в рисунках 3.3 – 3.6).

В графиках и таблицах представлены следующие характеристики:

$m$  – относительная зрачковая координата в меридиональном сечении;

$M$  – относительная зрачковая координата в сагиттальном сечении;

$H_{zp}$  (мм) – высота падения апертурного луча на зрачке ( $H_{zp} = D/2$  при  $m = 1$ );

$\lambda$  (мм) – длина волны излучения;

$\Delta L'$  (дптр) – продольная составляющая сферической aberrации;

$\Delta \sigma'$  (мин) – угловая составляющая сферической aberrации;

$\Delta L'_{F'-C'}$  (дптр) – хроматическая aberrация положения;

$\Delta \omega'_m$  (мин) – угловая aberrация в меридиональном сечении внеосевых пучков;

$\Delta \psi'_s$  (мин) – угловая aberrация в сагиттальном сечении внеосевых пучков;

$\Delta \omega'_s$  (мин) – угловая aberrация в сагиттальном сечении внеосевых пучков;

$\Delta L'_m$  (дптр) – положение изображения внеосевых точек предмета в меридиональном сечении;

$\Delta L'_s$  (дптр) – положение изображения внеосевых точек предмета в сагиттальном сечении;

$\Delta$  (%) – дисторсия;

$\Delta \omega'_{F'-C'}$  (мин) – хроматизм увеличения.

Таблица 3.2.  
Аберрации точки на оси.

m, отн. ед.	H <sub>зр</sub> , мм	$\lambda_e=0.546\text{мкм}$		$\lambda_F=0.488\text{мкм}$		$\lambda_C=0.650\text{мкм}$		$\Delta L'_{F-C}$ , дптр.
		$\Delta L'$ , дптр.	$\Delta \sigma'$ , мин.	$\Delta L'$ , дптр.	$\Delta \sigma'$ , мин.	$\Delta L'$ , дптр.	$\Delta \sigma'$ , мин.	
1	10	-0.381	-2'31''	-1.079	-7'07''	0.125	0'49''	-1.204
0.707	7.07	-0.188	-0'53''	-0.879	-4'06''	0.313	1'28''	-1.192
0	0	0	0	-0.684	0	0.497	0	-1.181

Таблица 3.3.  
Аберрации широкого наклонного пучка лучей в меридиональном сечении.

$\omega = -11^\circ$				
m, отн. ед.	H <sub>зр</sub> , мм	$\lambda_e=0.546\text{мкм}$	$\lambda_F=0.488\text{мкм}$	$\lambda_C=0.650\text{мкм}$
		$\Delta \omega_m'$ , мин.	$\Delta \omega_m'$ , мин.	$\Delta \omega_m'$ , мин.
1	10	3'46''		
0.707	7.07	2'14''		
0	0	0		
-0.707	-7.07	-1'30''		
-1	-10	-2'26''		
$\omega = -8^\circ$				
m, отн. ед.	H <sub>зр</sub> , мм	$\lambda_e=0.546\text{мкм}$	$\lambda_F=0.488\text{мкм}$	$\lambda_C=0.650\text{мкм}$
		$\Delta \omega_m'$ , мин.	$\Delta \omega_m'$ , мин.	$\Delta \omega_m'$ , мин.
1	10	-1'36''		
0.707	7.07	-0'24''		
0	0	0		
-0.707	-7.07	-4'06''		
-1	-10	-6'34''		

Таблица 3.4.

Аберрации широкого наклонного пучка лучей в сагиттальном сечении.

$\omega = -11^\circ$							
М, отн. ед.	Н <sub>зр</sub> , мм	$\lambda_e=0.546\text{мкм}$		$\lambda_F=0.488\text{мкм}$		$\lambda_C=0.650\text{мкм}$	
		$\Delta\psi_s'$ мин.	$\Delta\omega_s'$ мин.	$\Delta\psi_s'$ мин.	$\Delta\omega_s'$ мин.	$\Delta\psi_s'$ мин.	$\Delta\omega_s'$ мин.
1	10	-13'01"	-6'10"				
0.707	7.07	-8'09"	-3'04"				
0	0	0	0	0	0	0	0
$\omega = -8^\circ$							
М, отн. ед.	Н <sub>зр</sub> , мм	$\lambda_e=0.546\text{мкм}$		$\lambda_F=0.488\text{мкм}$		$\lambda_C=0.650\text{мкм}$	
		$\Delta\psi_s'$ мин.	$\Delta\omega_s'$ мин.	$\Delta\psi_s'$ мин.	$\Delta\omega_s'$ мин.	$\Delta\psi_s'$ мин.	$\Delta\omega_s'$ мин.
1	10	-7'42"	-4'16"				
0.707	7.07	-4'29"	-2'07"				
0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3.5.

Аберрации точки вне оси.

$\omega$ , град.	$\omega'$ , град.	$L'_m$ , дптр	$L'_s$ , дптр	$\Delta$ , %	$\Delta\omega_{F-C}$ , град.
-11°	-28°58'23"	2.010	-1.486	9.531	1'04"
-8°	-20°57'00"	1.155	-0.745	4.751	0'25"
0°	0	0.000	0.000	0	0'00"

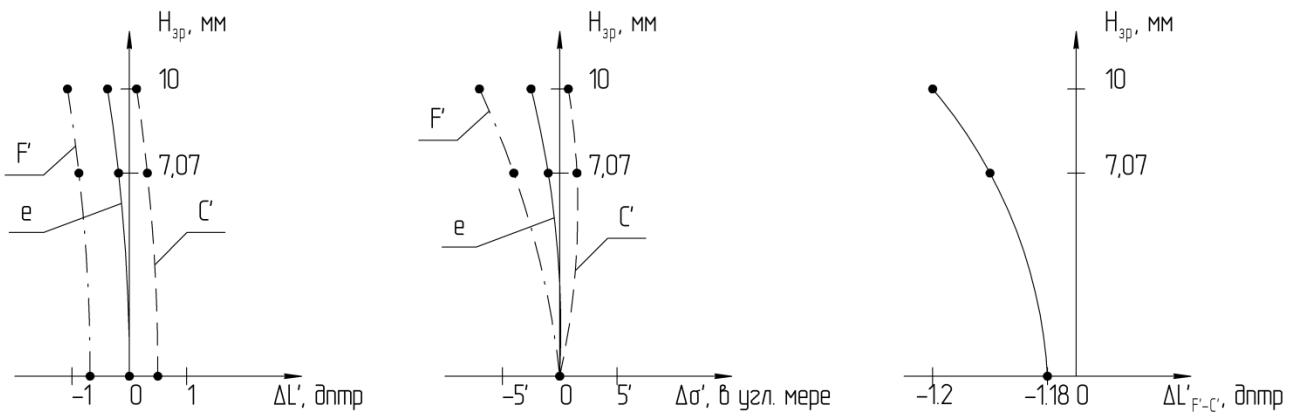


Рисунок 3.3. Графики aberrаций осевой точки.

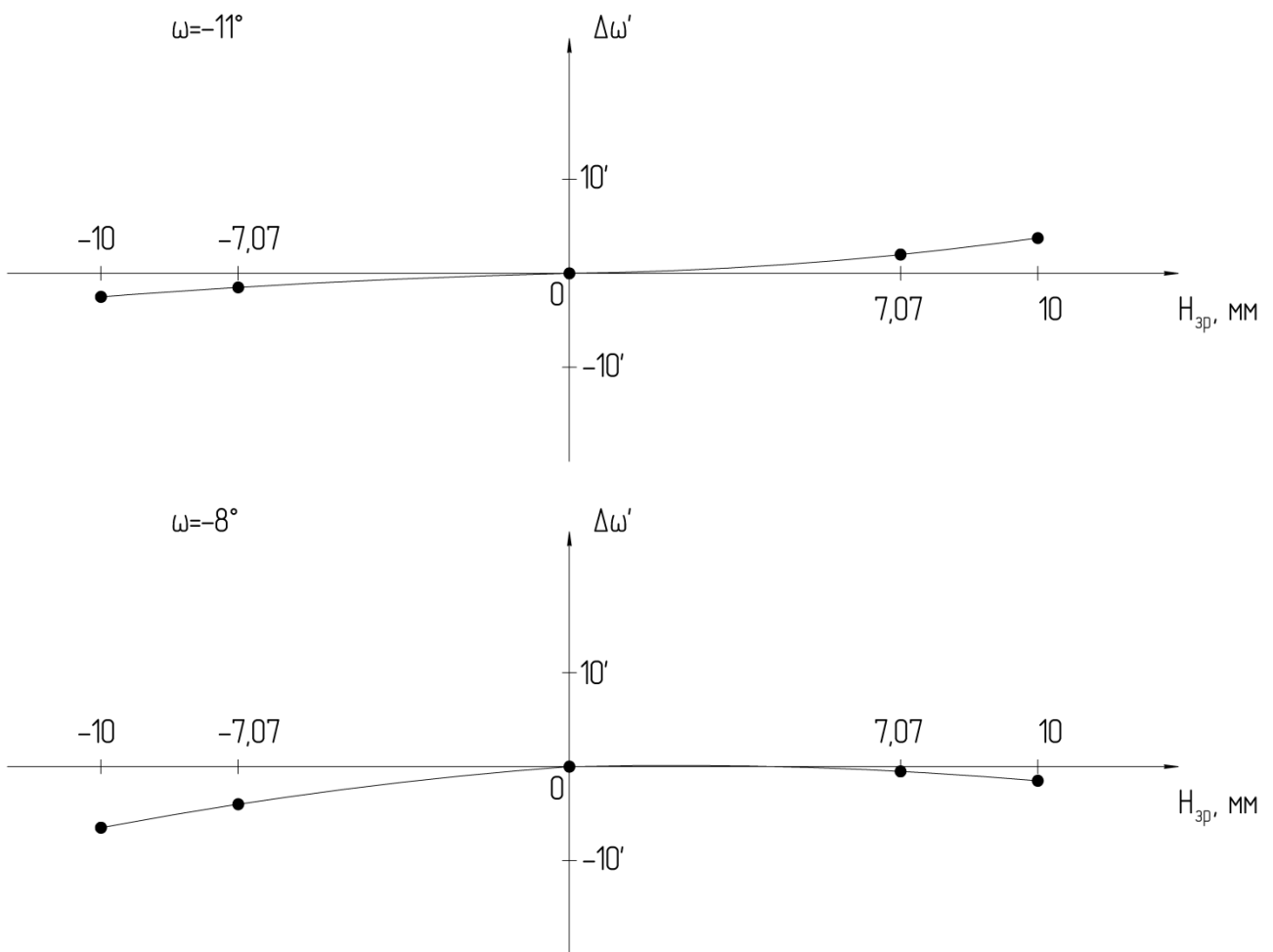


Рисунок 3.4. Графики aberrаций внеосевых точек в меридиональном сечении для основной длины волны ( $\lambda_e = 0.546$  мкм).

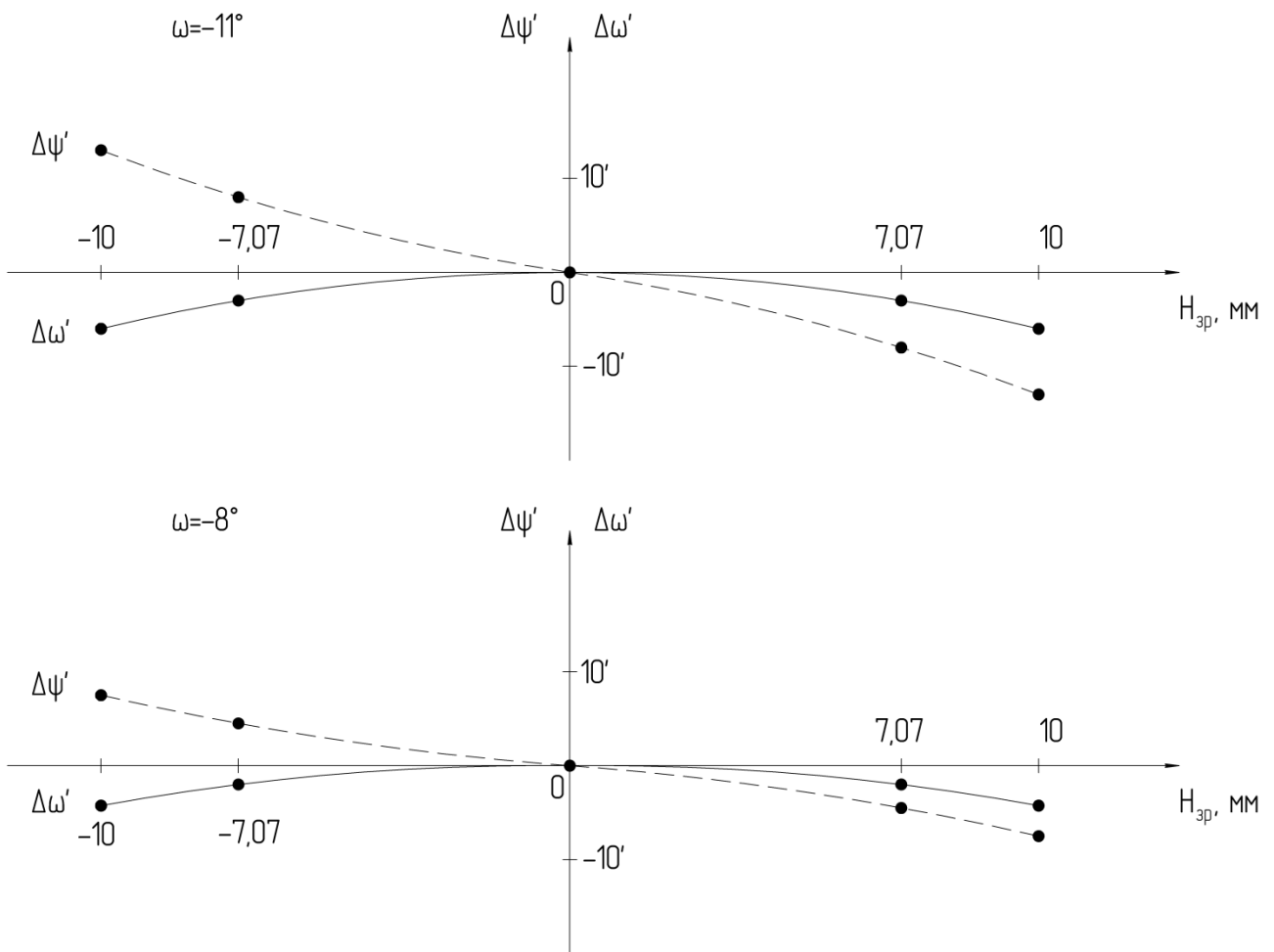


Рисунок 3.5. Графики aberrаций внеосевых точек в сагиттальном сечении для основной длины волны ( $\lambda_e = 0.546$  мкм).

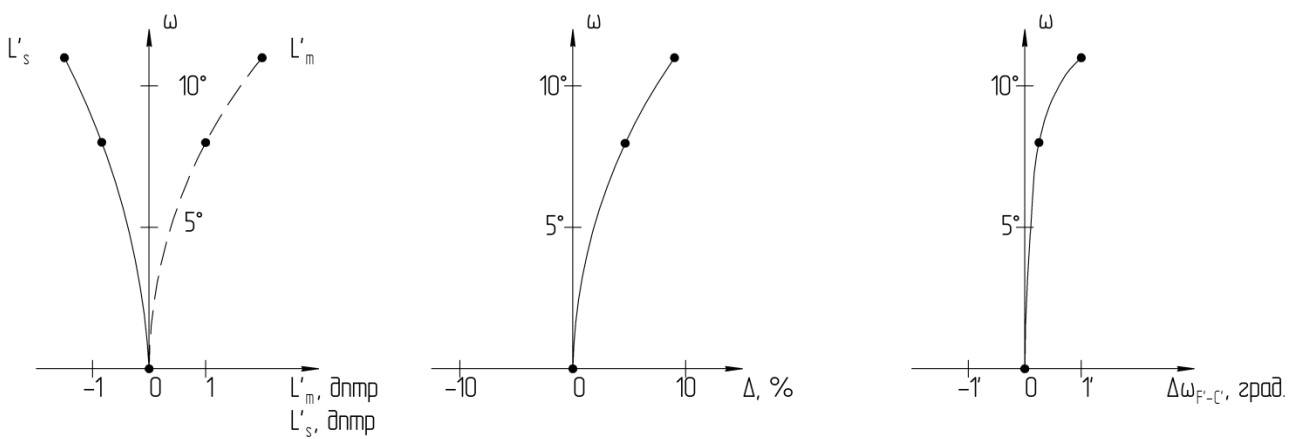


Рисунок 3.6. Графики полевых aberrаций.

### 3.9. Определение влияния конструктивных параметров на aberrации системы.

Расчет влияния изменения конструктивных параметров и децентрировок поверхностей на aberrации системы рассмотрим на примере телескопической системы, представленной на рисунке 3.7.

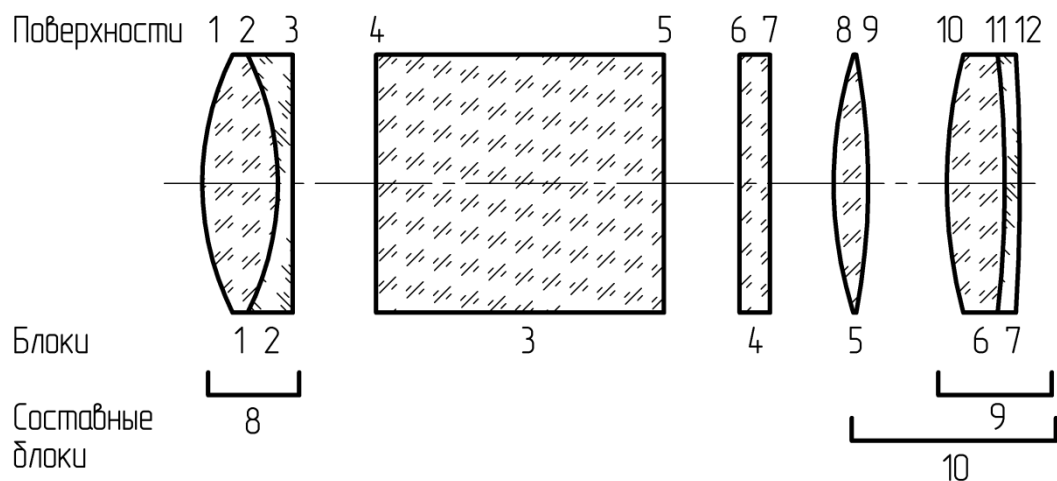


Рисунок 3.7. Телескопическая система, состоящая из 12 поверхностей и 10 блоков.

Рассматриваемая система состоит из объектива (1-3 поверхности), призмы (4-5), шкалы (6-7) и окуляра (8-12). Последняя поверхность объектива (3), рабочие поверхности призмы (4-5) и шкалы (6-7) являются плоскими. Систему можно рассматривать как состоящую из блоков, к которым относятся: отдельные линзы (1, 2, 5, 6, 7 блоки), призма (3 блок) и шкала (4 блок). Склейки объектива (8) и окуляра (9), а также сам окуляр (10) можно рассматривать как сложные составные блоки.

Перед работой в данном пункте меню программы «ОПАЛ» следует определить световые высоты на поверхностях оптической системы (Анализ aberrаций / Заместить габариты на вычисленные) и задать размер предмета (Главное меню / Предмет, Изображение, Диафрагма).

Определение влияния параметров на aberrации системы производится в меню Технология / Влияние параметров на aberrации.

Чтобы получить матрицу значений влияния конструктивных параметров на aberrации системы необходимо задать исходные данные, которые разделяют на три блока:

#### 3.9.1. Список марок изменяемых параметров:

MP(\*)=  
R%/1-2,                    изменение радиуса поверхности в % (для  
R%/8-12,                всех поверхностей кроме плоских)  
RN/3-7,                    изменение радиуса пробного стекла в

D,	кольцах (только для плоских поверхностей)
DC,	изменение осевых расстояний
DCB/1:1-2,	поперечные смещения поверхностей
DCB/2:2-3,	поперечные смещения блоков – отдельных линз (смещение призмы или шкалы поперек оптической оси не приводит к изменению качества изображения в системе, поэтому их не записывают)
DCB/5:8-9,	
DCB/6:10-11,	
DCB/7:11-12,	
DCB/8:1-3,	поперечные смещения склеенных компонентов
DCB/9:10-12,	
DCB/10:8-12,	поперечное смещение окуляра
T,	повороты поверхностей
TBL/1:1-2,	повороты блоков (отдельных линз, призмы, шкалы)
TBL/2:2-3,	
TBL/3:4-5,	
....	
TBL/7:11-12,	
TBL/8:1-3,	повороты склеенных компонентов
TBL/9:10-12,	
TBL/10:8-12;	поворот окуляра

Изменяемые параметры записываются в строчку через запятую, в конце необходимо поставить точку с запятой. Количество параметров (через запятую) может быть не более 20. Количество одновременно задаваемых блоков может быть не более 10.

### 3.9.2. Значения приращения параметров:

DR%(1-2)=1;	приращение радиуса на 1 % (для всех поверхностей кроме плоских: 1-2 и 8-12)
DR%(8-12)=1;	
DRN(3-7)=3;	приращение радиуса пробного стекла на 3 кольца (только для плоских поверхностей 3-7)
DD(1-12)=0.5;	приращение осевых расстояний на 0.5 мм
DCN(1-12)=0.1;	величина поперечных смещений отдельных поверхностей (1-12) на 0.1 мм
DCBL(1-2)=0.1;	величина поперечных смещений блоков (линз 1, 2, 5, 6, 7; склеек 8, 9; окуляра 10) на 0.1 мм
DCBL(5-10)=0.1;	
DT(1-12)=0.3;	величина поворотов отдельных поверхностей (1-12) на угол 30'
DTBL(1-10)=0.1;	величина поворотов блоков (линз 1, 2, 5, 6, 7; призмы 3; шкалы 4; склеек 8, 9; окуляра 10) на угол 10'

Приращения параметров записываются через точку с запятой. Каждой марке из списка параметров должна быть определена величина ее приращения.



### 3.9.3. Список марок исследуемых функций:

В качестве марок исследуемых функций могут быть заданы параксиальные характеристики и aberrации системы. Отдельную группу составляют aberrации, зависящие от векторных ошибок – наклонов и поперечных смещений поверхностей и блоков. К ним относят кому при децентрировке и поперечную aberrацию в меридиональном сечении, возникающую при децентрировке. Скалярные ошибки (отклонение радиусов и осевых расстояний) не приводит к их появлению.

Марки функций записываются в строчку через запятую, в конце ставится точка с запятой.

MF(*)=	
V0,	увеличение системы (измеряется в кратах)
SG',	задний отрезок (для телескопической системы определяется в диоптрийной мере)
DYA/0*,	поперечная aberrация осевого пучка основной длины волны (0) для края и зоны зрачка (*) (измеряется в угловой мере)
WA/0*,	волновая aberrация осевого пучка основной длины волны (0) для края и зоны зрачка (*) (измеряется в длинах волн)
DYM/011*,	поперечная aberrация меридионального сечения основной длины волны (0) для крайнего пучка (1) на краю зрачка (1), рассматриваются значения для верха и низа зрачка (*) (измеряется в угловой мере)
KD/0*,	кома децентрировки для осевого пучка основной длины волны (0) для края и зоны зрачка (*) (измеряется в угловой мере) возникает только при поперечных смещениях и наклонах поверхностей и блоков
DYMD/011*;	поперечная aberrация меридионального сечения внеосевых пучков, возникающая при поперечных смещениях и наклонах поверхностей и блоков для основной длины волны (0) крайнего пучка (1) на краю зрачка (1), рассматриваются значения для верха и низа зрачка (*) (измеряется в угловой мере)

После описания марок параметров, величин их приращений и марок исследуемых функций производится трансляция данных (клавиша F4), расчет матрицы влияния и просмотр результатов. Полученные значения изменения функций заносятся в таблицы. Пример оформления таблиц влияния скалярных и векторных ошибок приведен в таблицах 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6.  
Таблица влияния параметров.

параметры исходной системы (мм.)	величина изменения параметра (мм.)	$\Delta\Gamma$ V0	$\Delta L'$ дптр SG'	$\delta(\Delta\sigma')$ секунды DYA/0*		$\Delta W$ дл. волн. WA/0*		$\delta(\Delta\omega_{m'})$ секунды DYM/011*	
				m=1	m=0.707	m=1	m=0.707	m=1	m=-1
				r1=					
...									
d1=									
...									

Таблица 3.7.  
Таблица влияния децентрировок.

вид децентрировки	величина децентрировки	$\delta(\Delta\gamma_k')$ KD/0*		$\delta(\Delta\omega_{m'})$ DYM/011*	
		m=1	m=0.707	m=1	m=-1
		Поперечное смещение поверхностей			
Поперечное смещение линз					
Поперечное смещение блоков линз					
Наклон поверхностей					
Наклон линз					
Наклон блоков линз					

3.10. Определение допусков на скалярные ошибки (радиусы, осевые расстояния).

Допуски на скалярные ошибки определяются из таблиц влияния параметров (таблица 3.6).

Искажение изображения осевой точки, вызванное остаточными aberrациями в системе, изменением конструктивных параметров во время эксплуатации (под действием температуры, давления и пр.), а также технологическими ошибками изготовления, не должно превышать одной минуты, а для внеосевой точки – не более 5'. Исходя из этого, рекомендуется на ошибки изготовления отводить примерно 20% от всей допустимой aberrации [6.7]. Следовательно, искажение изображения вследствие действия всех

конструктивных параметров системы не должно превышать для осевой точки 12", для внеосевой точки – 60".

Полученное значение аберрации теперь необходимо распределить на каждую ошибку в отдельности. Есть несколько методик, позволяющих это сделать: распределение ошибки по методу Монте-Карло, определение наиболее влияющих конструктивных параметров... В данной работе принят за основу метод равновесного распределения ошибки. Суммарная аберрация  $\Delta_{\Sigma}$  распределяется на все параметры равномерно. Принимается, что каждый параметр влияет на искажение одинаково. В этом случае допустимое значение аберрации  $\delta_s$ , вызванной одной скалярной ошибкой рассчитывается по формуле:

$$\delta_s = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\sqrt{P}}, \quad (3.15)$$

где  $P$  – количество скалярных ошибок в системе. Кривизну каждой поверхности системы и каждое осевое расстояние можно изготовить с одной ошибкой, таким образом, сумма количества радиусов и осевых расстояний системы и будет определять величину  $P$ .

Допустимое изменение аберрации  $\delta_v$ , вызванное одной векторной ошибкой можно определить как:

$$\delta_v = \frac{\Delta_{\Sigma}\sqrt{2}}{\sqrt{Z}}, \quad (3.16)$$

где  $Z$  – количество векторных ошибок. Значение легко посчитать как сумму количества поперечных смещений и наклонов поверхностей и блоков во всей системе.

Считается, что при малом изменении параметра  $Q$  величины аберраций  $\Delta\omega'$  изменяются линейно. Это утверждение позволяет определить допуск  $\delta Q$  на любой параметр, используя следующую пропорцию:

$$\frac{\delta}{\delta Q} = \frac{\delta(\Delta\omega')}{\Delta Q}, \quad (3.17)$$

где  $\delta$  – допустимое изменение аберрации (соответственно,  $\delta_s$  для скалярных ошибок и  $\delta_v$  – для векторных);  $\delta Q$  – искомый допуск на параметр;

$\delta(\Delta\omega')$  – аберрация, вызванная изменением параметра  $Q$  на величину  $\Delta Q$  (соответствующие значения берутся из таблиц влияния параметров).

Рассчитанные по формуле (3.17) значения допусков на каждый параметр заносятся в таблицы допусков, внешний вид которых представлен в таблицах 3.8 и 3.9.

Таблица 3.8.

№ дет.	наименование детали	материал			допуски на толщину и воздушные промежутки	радиусы поверхностей пробных стёкол	допуски на радиусы пробных стёкол	допуски на подгонку под пробное стекло на полный диаметр N	$\Delta N_{\max}$
		сорт материал	оптические постоянные						
			$n_e$	$v_e$					
1	Объектив								
2	Призма								
3	Шкала								
4	Окуляр								

Таблица 3.9.

№ дет.	наименование детали	№ пов.	допустимая децентрировка поверхностей		№ пов.	допустимая децентрировка линз	
			в лин. мере	в угл. мере		в лин. мере	в угл. мере
1	Объектив						
2	Призма						
3	Шкала						
4	Окуляр						

Допуски на радиусы пробных стёкол выбираются в соответствии с рассчитанными значениями по классу точности [6.8] (Таблица 7, стр. 28).

Величину ошибки  $N$  на подгонку под пробное стекло можно рассчитать по формуле:

$$N = \frac{\Delta R}{4\lambda} \cdot \left( \frac{D_{св}}{R} \right)^2, \quad (3.18)$$

где  $\Delta R$  – допуск на радиус  $R$ , составляющий приблизительно 0,6 – 0,7 от общего допуска  $\delta R$ . Допуск на радиус пробного стекла рекомендуется брать приблизительно 0,3 от общего допуска  $\delta R$  [6.8];

$\lambda$  – основная длина волны излучения;

$D_{св}$  – световой диаметр на поверхности.

Для удобства контроля местных ошибок изготовления поверхностей, допуск на  $\Delta N$  принимают исходя из соотношения:

$$\Delta N = \frac{N}{5 \div 10}. \quad (3.19)$$

#### 4. Оформление работы

В отчёте должны быть представлены:

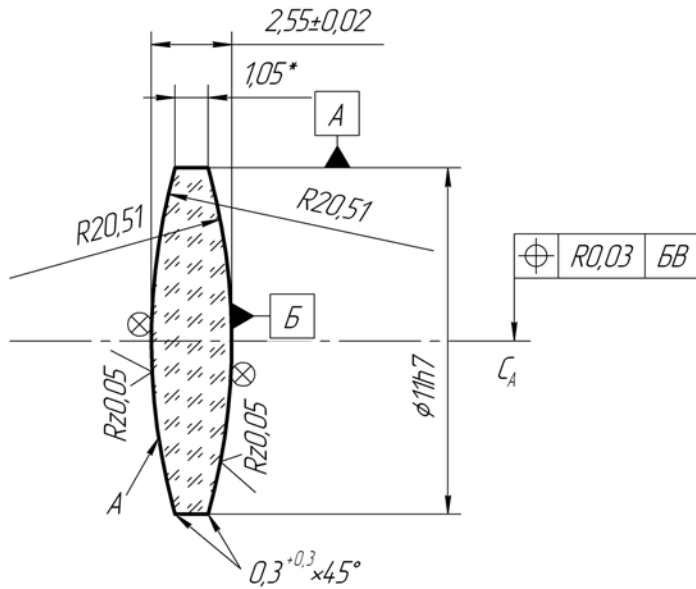
- 4.1. Габаритный расчёт и выбор компонентов телескопической системы.
- 4.2. Расчёт параметров призм и шкалы.
- 4.3. Таблицы и графики аберраций системы.
- 4.4. Таблицы влияния конструктивных параметров и децентрировок.
- 4.5. Таблицы рассчитанных допусков.
- 4.6. Оптическая схема с указанием необходимых параметров и размеров.

Пример оформления схемы оптической принципиальной приведён на рисунке 3.8.

- 4.7. Чертёж одиночной линзы.

Пример оформления чертежа линзы представлен на рисунке 3.9.





$\Delta n_e$	2Г
$\Delta(n_F - n_{F'})$	2Г
Однородн.	2
Двулучепр.	3
$n_A$	5
Бессвильн.	2Б
Пузырн.	3В
$N$	2
$\Delta N$	0,5
$P$	IV
$\Delta R$	1
$f'$	14,12
$S_F$	-13,37
$S_{F'}$	13,37
$O_\phi$	8,5

1 \* Размер для справок.

2.  $\bigcirc$  - 24  $I_{300}$ ;  $\sigma_\lambda = 1,2 \pm 0,2\%$  при  $\lambda = 660 \pm 30$  нм, ОСТ 3-1901-85

Рис.3.9. Пример оформления чертежа линзы.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<b>ЛИНЗА</b>	Лист	Масса	Масштаб	
Разраб.									5:1
Проб.						Лист	Листов		
Т.контр.									
Н.контр.					Стекло СТК9 ГОСТ 3514-94			СПбГУИТМО	
Утв.									

## 5. Вопросы для защиты

- 5.1. Достоинства и недостатки схемы Кеплера.
- 5.2. Укажите особенности расчёта призм и сеток.
- 5.3. Основные требования к качеству изображения оптических систем, работающих с глазом наблюдателя.
- 5.4. Какие ошибки возникают в оптических системах в следствие децентрировок поверхностей и элементов.
- 5.5. Что определяют общая  $N$  и местная  $\Delta N$  ошибки.

## 6. Литература

- 6.1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.А. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992.
- 6.2. Прикладная оптика. Дубовик А.С., Апенко М.И. и др. М.: Недра. 1992.
- 6.3. М.М. Русинов. Габаритные расчёты оптических систем. М. 1963.
- 6.4. Методические указания по выполнению домашних заданий по курсу «Теория оптических приборов и техническая оптика». Под ред. В.В. Хваловского. Л. ИТМО. 1981.
- 6.5. Методические указания по габаритному расчёту и выбору компонентов телескопических систем. Л. ИТМО. 1989.
- 6.6. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Панов В.А. и др. Л.: Машиностроение. 1980.
- 6.7. М.Н. Сокольский. Теоретические основы расчёта допусков в оптических приборах. Учебное пособие. Л. ИТМО. 1980.
- 6.8. М.Н. Сокольский. Допуски на качество оптического изображения. Л.: Машиностроение. 1989.

## 7. Варианты заданий для работы

Таблица 3.1.

№ вар.	$\Gamma$	$D'$ , мм	$2\omega$	$a_p$ , мм	$k$	тип призмы
1	$-3.5^{\times}$	5	$12^{\circ}$	-10	5	Система Малафеева - Порро I рода после объектива
2	$-3.5^{\times}$	6	$10^{\circ}$	-12	7	
3	$-4^{\times}$	4	$12^{\circ}$	-15	6	
4	$-4^{\times}$	5.5	$10^{\circ}$	0	7	
5	$-4,2^{\times}$	5.5	$9^{\circ}$	-15	6	
6	$-4,5^{\times}$	5	$8^{\circ}30'$	-15	7	
7	$-4,6^{\times}$	5	$8^{\circ}$	-10	6	



8	- 5 <sup>x</sup>	4	10°	0	6		
9	- 5 <sup>x</sup>	4.5	8°	-20	5		
10	- 5,4 <sup>x</sup>	5	7°30'	-12	5		
11	- 5,6 <sup>x</sup>	5.5	7°30'	0	5.5		
12	- 5,6 <sup>x</sup>	5	8°	-12	5		
13	- 5,8 <sup>x</sup>	4	6°	-10	4.5		
14	- 6 <sup>x</sup>	5	6°	-12	4		
15	- 6 <sup>x</sup>	4	7°30'	-20	5		
16	- 4 <sup>x</sup>	5	10°	0	6		Призма Шмидта с крышей (ВкР-45) после объектива
17	- 4 <sup>x</sup>	4.5	12°	-20	5		
18	- 4.2 <sup>x</sup>	6	8°	-15	5.5		
19	- 4.3 <sup>x</sup>	5	7°30'	-10	6		
20	- 4.4 <sup>x</sup>	5	12°	-25	7		
21	- 4.5 <sup>x</sup>	5	7°30'	-15	6		
22	- 4.5 <sup>x</sup>	4.5	8°	0	5		
23	- 4.8 <sup>x</sup>	5	10°	0	7		
24	- 5 <sup>x</sup>	5	12°	-10	5		
25	- 5.2 <sup>x</sup>	4	10°	0	6		
26	- 5.2 <sup>x</sup>	5	12°	-10	5		
27	- 5.6 <sup>x</sup>	4.5	8°	0	7		
28	- 6 <sup>x</sup>	4	7°30'	-20	5		
29	- 6 <sup>x</sup>	4.5	8°	0	6		
30	- 6.6 <sup>x</sup>	5.5	6°	-25	8		

## **Лабораторная работа №4**

### **«Синтез и анализ качества изображения апланатического двухзеркального объектива»**

**Цель работы:** углубление знаний по разделу «Расчёт зеркальных систем» и приобретение практических навыков расчёта и оценки качества изображения апланатических двухзеркальных объективов.

#### **1. Задание для работы**

1.1. В соответствии с индивидуальным заданием (таблица 4.1) выполнить габаритный расчёт объектива.

1.2. Изучить влияние изменения квадратов эксцентриситета главного и вторичного зеркала на сферическую абберацию и отступление от условия изопланатизма. Методом интерполяции определить квадраты эксцентриситетов главного и вторичного зеркал.

1.3. Рассчитать квадраты эксцентриситетов зеркал по формулам теории аббераций третьего порядка и сравнить с найденными в 1.2 квадратами эксцентриситетов зеркал с использованием расчёта хода реальных лучей.

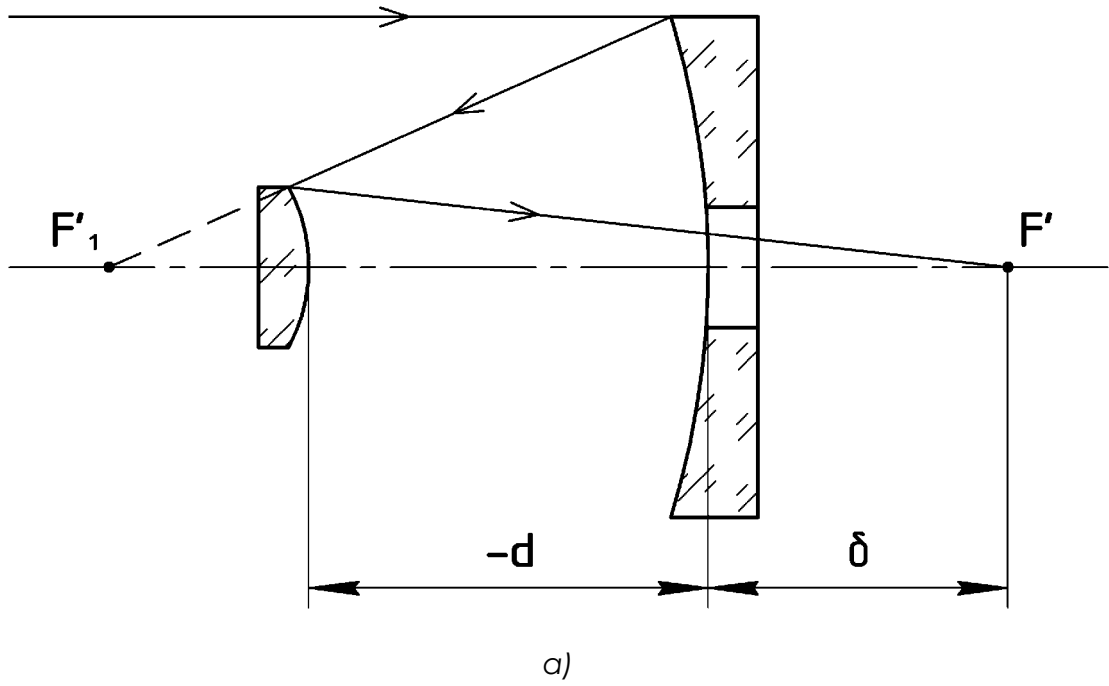
1.4. Определить угловое поле оптической системы, при котором качество изображения можно считать дифракционно-ограниченным.

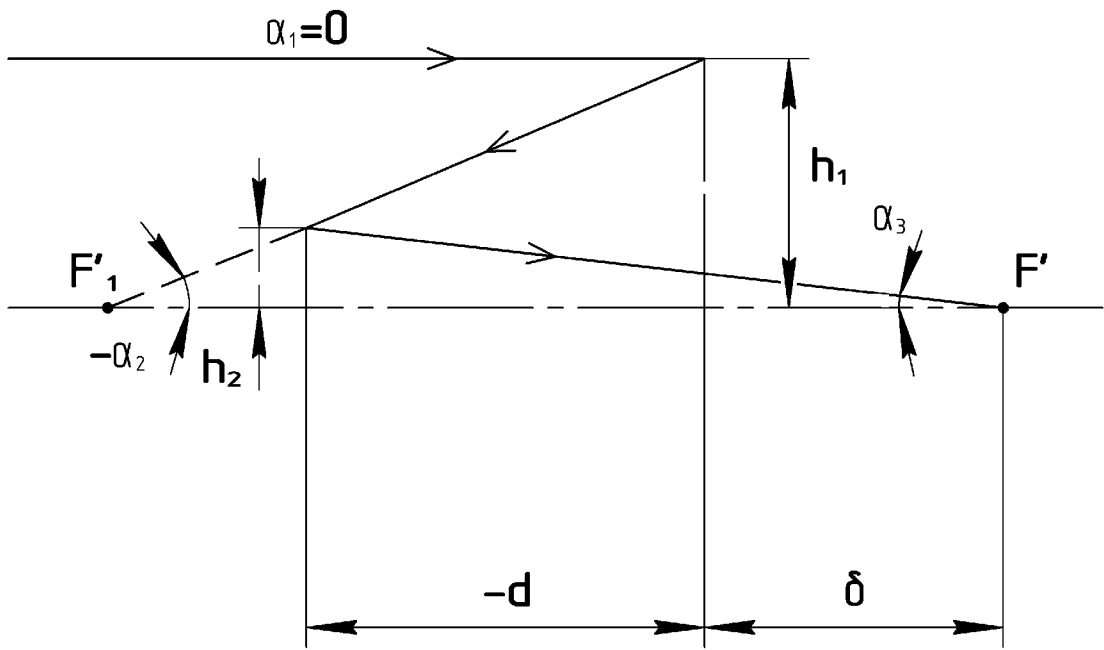
1.5. В системе с заданным экранированием входного зрачка определить для трёх точек поля геометрические абберации, число Штреля, функции передачи модуляции (частотно-контрастные характеристики), концентрацию энергии в кружке рассеяния.

1.6. Изучить влияние экранирования на функцию передачи модуляции и концентрацию энергии в кружке рассеяния.

#### **2. Краткая теория**

Двухзеркальные телеобъективы бывают двух типов: типа Кассегрена (рис.4.1а) и типа Грегори (рис.4.2а).

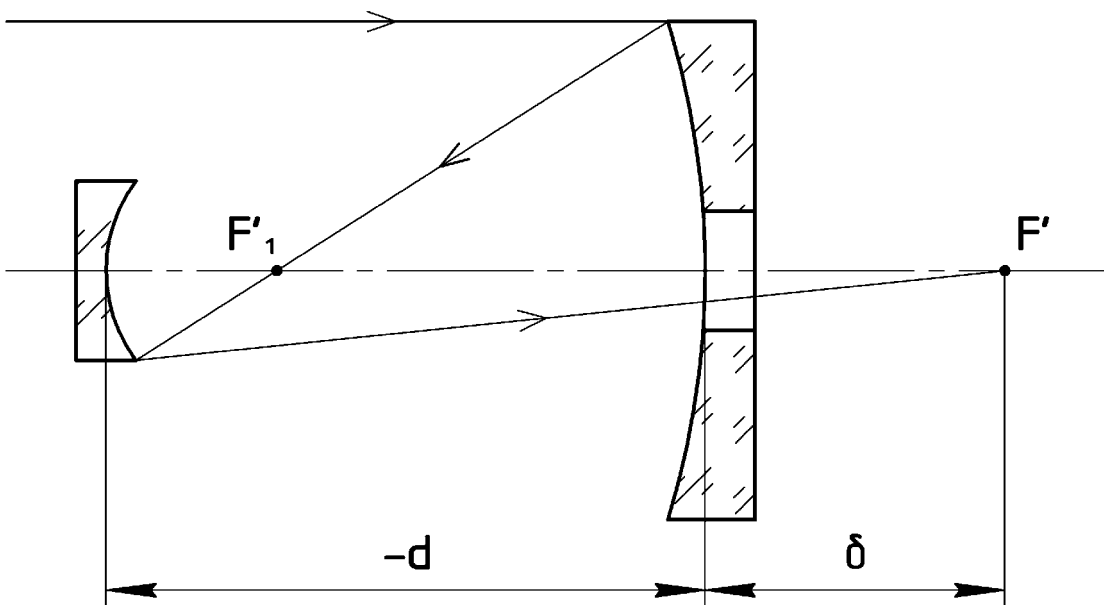




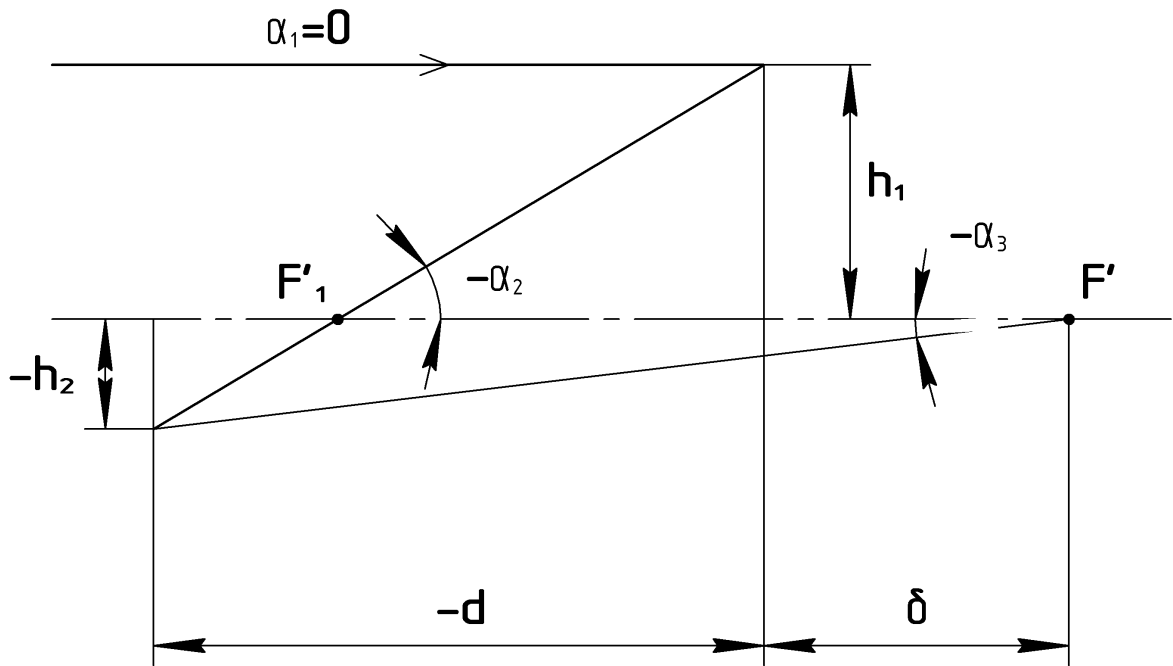
б)

Рисунок 4.1. Объектив типа Кассегрена.

а) оптическая схема объектива; б) ход нулевого луча в объективе.



a)



б)

Рисунок 4.2. Объектив типа Грегори.

а) оптическая схема объектива; б) ход нулевого луча в объективе.

В классических схемах Кассегрена и Грегори исправлена только сферическая aberrация. Форма зеркал при этом следующая: в системе Кассегрена главное зеркало параболическое, а вторичное гиперболическое; в системе Грегори главное зеркало параболическое, а вторичное эллиптическое.

Классические системы Кассегрена и Грегори имеют очень маленькие угловые поля в основном из-за неисправленной комы. Кома в этих системах может быть исправлена, но тогда главное зеркало перестает быть параболическим. Квадраты эксцентриситетов зеркал используются в качестве

параметров для исправления двух aberrаций: сферической aberrации и комы. В этом случае система превращается из анаберрационной в апланатическую.

Рассмотрим расчёт двухзеркальной апланатической системы в области aberrаций третьего порядка. Расчёт выполним при условии масштаба:  $\alpha_1 = 0, h_1 = 1,0, \alpha_3 = 1,0$  (для системы Кассегрена),  $\alpha_3 = -1,0$  (для системы Грегори),  $f' = h_1 / \alpha_3$ . Для системы Кассегрена  $f' = +1,0$ , для системы Грегори  $f' = -1,0$ .

Условия устранения сферической aberrации и комы третьего порядка имеют вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 + h_2 \cdot Q_2 &= 0 \\ 0,5 + h_2 \cdot S_2 \cdot Q_2 & \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \sigma_1 \cdot T_1 + P_1; & Q_2 &= \sigma_2 \cdot T_2 + P_2 \\ T_1 &= -\alpha_2^3 / 4; & P_1 &= -\alpha_2^3 / 4 \\ T_2 &= \frac{(\alpha_3 + \alpha_2)^3}{4}; & P_2 &= \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{4} (\alpha_3 + \alpha_2) \\ S_2 &= -d_1 / h_2; & d_1 &= (1 - h_2) / \alpha_2 \end{aligned}$$

$\sigma_1, \sigma_2$  – коэффициенты деформации асферических поверхностей  
 $\sigma_1 = -e_1^2, \sigma_2 = -e_2^2$ , где  $e_1^2, e_2^2$  – квадраты эксцентриситетов кривых второго порядка.

После решения системы уравнений (4.1) получаем:

$$\sigma_1 = -\frac{2h_2}{d_1 \cdot \sigma_2^3} - 1 \quad (4.2)$$

$$\sigma_2 = -\frac{2}{d_1(\alpha_3 + \alpha_2)^3} - \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{(\alpha_3 + \alpha_2)^2} \quad (4.3)$$

Уравнение поверхности второго порядка в системе координат, начало которой совпадает с вершиной поверхности, имеет вид:

$$y^2 + x^2 = 2r_0z - (1 - e^2)z^2$$

где  $r_0$  – радиус кривизны в вершине поверхности,  $e$  – эксцентриситет кривой второго порядка.

Деформации асферических поверхностей, используемые для исправления сферической аберрации и комы, можно определить и без формул 4.2, 4.3 изучая влияние изменения  $e_1^2$  и  $e_2^2$  на сферическую аберрацию и отступление от закона синусов  $\eta$ .

Если входной зрачок расположен на главном зеркале, то изменение  $e_1^2$  будет влиять только на сферическую аберрацию, а на кому и связанное с комой  $\eta$  (для небольшого поля поперечная меридиональная кома равна  $\Delta y'_k = 3y'\eta$ ) влиять не будет. Квадрат эксцентриситета второго зеркала  $e_2^2$  влияет и на сферическую аберрацию и на кому. Поэтому можно, сначала за счёт деформации вторичного зеркала сделать  $\eta = 0$ , а затем, используя  $e_1^2$ , исправить сферическую аберрацию. В центре поля получается практически идеальное изображение, а на краю поля остаются неисправленными астигматизм, кривизна изображения и дисторсия. Дисторсия при небольших полях невелика, она не нарушает точности изображения, а вносит только смещение.

Таким образом, угловое поле ограничивается астигматизмом и кривизной изображения.

В данной работе будем рассматривать дифракционно-ограниченные системы, это такие системы, в которых качество изображения определяется в основном явлениями дифракции на входном зрачке системы и волновые аберрации невелики. Остаточные аберрации оцениваются по критериям Релея и Марешаля. В дифракционно-ограниченных оптических системах (рис.4.3) рабочий интервал частот  $N$  превышает половину от  $N_{пред}$ , которая определяется по формуле [4]:

$$N_{пред} = \frac{2A'}{\lambda}$$

где:

$\lambda$  – длина волны,  $A'$  – числовая апертура в пространстве изображений, которая равна  $A' = \sin \sigma' = \frac{D}{2f'}$ , где  $D$  – диаметр входного зрачка.

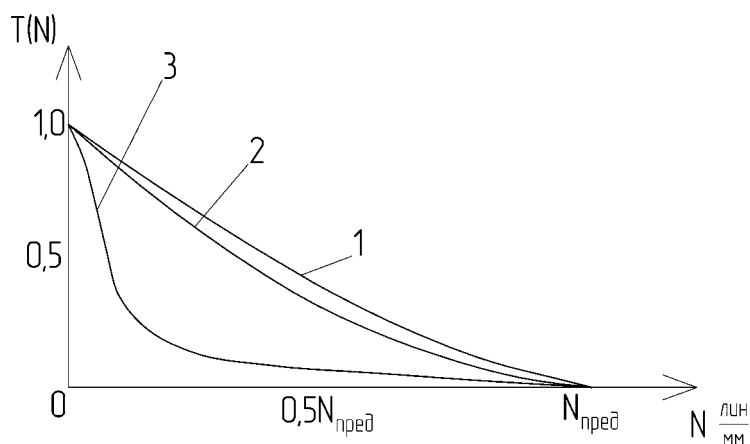


Рисунок 4.3. Функции передачи модуляции: 1 – безабберационная оптическая система; 2 – дифракционно-ограниченная оптическая система; 3 – геометрически-ограниченная оптическая система.

В геометрически-ограниченных оптических системах рабочий интервал частот не превосходит  $0,25N_{пред}$  [4]. Качество изображения в таких системах определяется геометрическими aberrациями.

Определим угловое поле системы из условия её соответствия дифракционно-ограниченной. При этом можно ориентироваться и по волновым aberrациям и по числу Штреля и по диаметру кружка рассеяния. Проще всего ориентироваться по числу Штреля.

Число Штреля или определительная яркость – это отношение освещённостей в центре дифракционной картины изображения точки реальной системы и идеальной (Рис.4.4).



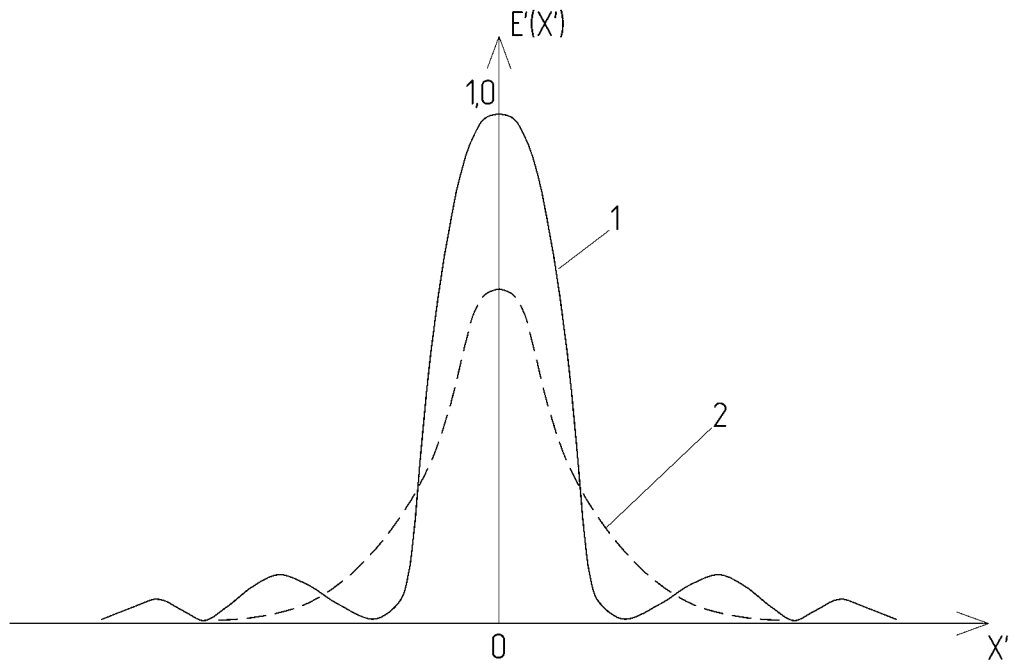


Рисунок 4.4. Распределение освещённости в изображении точки (ФРТ): 1 – идеальная оптическая система; 2 – реальная оптическая система.

Если число Штреля равно 1, то оптическая система безабберационная, если число Штреля больше 0,8, то система практически безабберационная.

Рассматриваемые зеркальные объективы имеют экранирование входного зрачка. Экранирование характеризуется коэффициентом экранирования по диаметру:

$$K_{\text{эк}} = \frac{D_2}{D_1}$$

где:

$D_1$  – диаметр главного зеркала,  $D_2$  – диаметр вторичного зеркала.

Из-за экранирования меняется функция распределения освещенности в изображении точки: центральное ядро уменьшается, и часть энергии переходит в кольца (Рис.4.5).

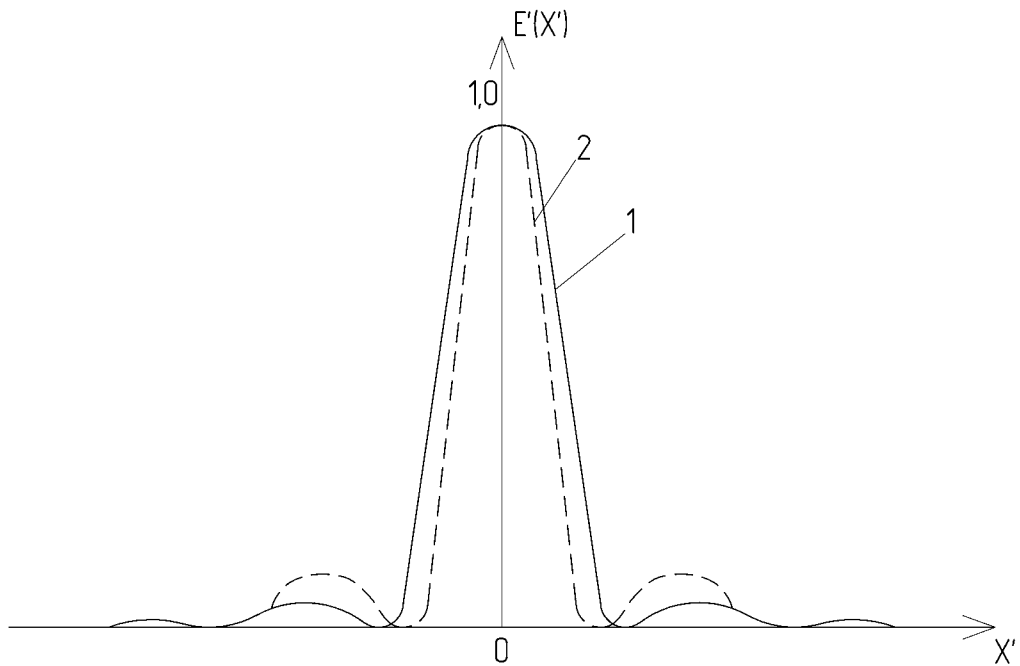


Рисунок 4.5. Функция рассеяния точки (ФРТ) для систем с круглым и кольцевым зрачками: 1 – система без экранирования зрачка; 2 – система с экранированным зрачком.

Что касается функции передачи модуляции (ФПМ или ЧКХ), то из-за экранирования на средних частотах уменьшается контраст. Если экранирование небольшое (до  $k_{\text{эк}} \leq 0,3$ ), то это влияние незначительное. Если же экранирование  $k_{\text{эк}} \geq 0,5$ , то влияние очень заметное. На рисунке 4.6 показана зависимость ФПМ от  $\bar{N}$ , где  $\bar{N} = N/N_{\text{пред}}$ .

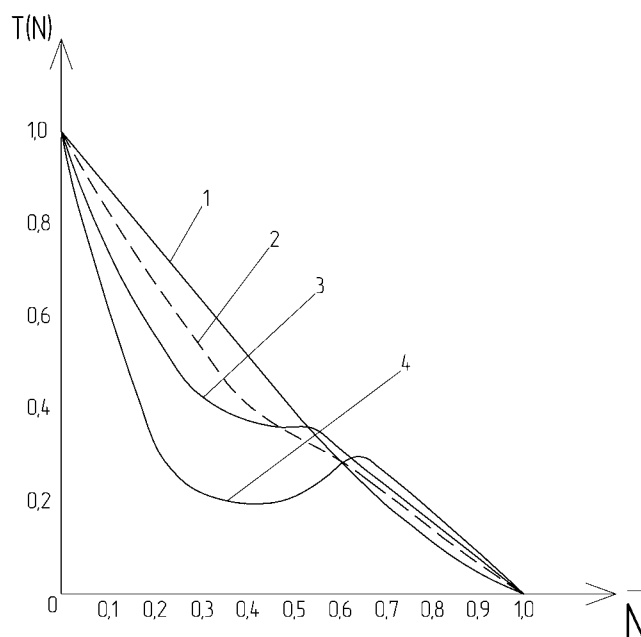


Рисунок 4.6. Функции передачи модуляции: 1 – система без экранирования зрачка; 2 – коэффициент экранирования  $k_{\text{эк}} = 0,3$ ; 3 –  $k_{\text{эк}} = 0,4$ ; 4 –  $k_{\text{эк}} = 0,5$ .

При экранировании также увеличивается диаметр кружка рассеяния, в котором сосредоточено определённое количество энергии.

### 3. Указание по выполнению работы

3.1. При выполнении п.1.1 определяются радиусы кривизны зеркал в вершине поверхности  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ , расстояние между зеркалами (если не задано), расстояние от вершины главного зеркала до плоскости изображения (если не задано).

Первоначальный габаритный расчет системы выполняется при  $f' = +1,0$  (для системы Кассегрена) и  $f' = -1,0$  (для системы Грегори).

Радиусы кривизны зеркал в вершине поверхности равны:

$$r_{01} = \frac{2}{\alpha_2}; \quad r_{02} = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3} \quad (4.4)$$

где:

$\alpha_3 = 1$  для системы Кассегрена,  $\alpha_3 = -1$  для системы Грегори.

Во всех вариантах таблицы 4.1 задано экранирование по диаметру  $k_{\text{эк}}$ , это отношение диаметра вторичного зеркала к диаметру главного зеркала. Поэтому в первом приближение можно считать  $h_2 = k_{\text{эк}}$  (в системе Кассегрена)  $h_2 = -k_{\text{эк}}$  (в системе Грегори).

Угол  $\alpha_2$  определяется по формуле:

$$\alpha_2 = \frac{1 - h_2}{d} \quad (4.5)$$

где:

$d$  – расстояние между зеркалами, приведённое к  $|f'| = 1$ . Расстояние между зеркалами имеет знак минус, т.к. свет идёт справа налево ( $n_2 = -1$ ).

В некоторых вариантах расстояние между зеркалами не задано, а задано расстояние от вершины главного зеркала до изображения  $\delta$ .

Из рис.4.1б следует:

$$h_2 = -d + \delta \quad (4.6)$$

Величина  $\delta$ , также, как и  $d$  приводится к  $|f'| = 1$ , а затем используя формулу (4.6) находим  $d$ .

Из рис.4.2б следует:

$$h_2 = d - \delta \quad (4.7)$$

для системы Грегори.

После расчётов по формулам (4.4 – 4.7) полученные значения радиусов и воздушного промежутка умножаются на заданное фокусное расстояние  $|f'|$  и проверяется получение требуемых параксиальных характеристик.

3.2. При выполнении п.1.2 для начала исследования целесообразно задать  $e_1^2 = e_2^2 = 1$ , т.к. сферические поверхности зеркал имеют очень большие aberrации.

3.3. Квадраты эксцентриситетов зеркал  $e_1^2, e_2^2$  (п.1.3) определяется по формулам (4.2 – 4.3).

3.4. При определении углового поля системы в пространстве предметов  $2\omega$  можно руководствоваться следующими соображениями: волновые aberrации на краю поля не более  $0,5\lambda$  или число Штреля не меньше  $0,6 - 0,7$ .

3.5. При выполнении п.1.5 функции передачи модуляции (ФПМ) и концентрацию энергии в кружке рассеяния определить не более, чем для 10 пространственных частот и 10 диаметров кружка рассеяния.

3.6. При изучении влияния экранирования на функцию передачи модуляции (ФПМ, ЧКХ) нужно взять частоту равную 0,5 от предельной. Предельная частота для безаберрационной системы, при которой контраст равен нулю определяется по формуле:

$$N_{пред} = \frac{1}{\lambda \cdot k}$$

где:

$\lambda$  – длина волны (в мм),  $K$  – диафрагменное число,  $N_{пред}$  определяется в  $\frac{\text{лин}}{\text{мм}}$ .

Для частоты  $0,5N_{пред}$  задать три значения экранирования:

$k_{эк} = 0$ ,  $k_{эк} = 0,3$   $k_{эк} = 0,6$  и сравнить ЧКХ.

При изучении влияния экранирования на диаметр кружка рассеяния, нужно определить диаметр кружка рассеяния, в котором в не экранированной системе содержится 80 – 85% энергии, а затем в системах с экранированием  $k_{эк} = 0,3$  и  $k_{эк} = 0,6$  определить диаметр кружка рассеяния, в котором содержится также 80 – 85% энергии.

#### 4. Оформление работы

В отчете должны быть представлены:

4.1. Габаритный расчет.

4.2. Расчёт квадратов эксцентриситетов зеркал по формулам и методом интерполяции по реальным aberrациям.

4.3. Для трёх точек поля (осевой и двух внеосевых) графики и таблицы aberrаций.

4.4. Таблицы и графики ФПМ.

4.5. Таблицы и графики функции концентрации энергии.

4.6. Число Штреля для трёх точек поля.

4.7. Анализ влияния экранирования на ФПМ и концентрацию энергии.

4.8. Оптическая схема с указанием необходимых параметров и размеров.

Пример оформления оптической схемы приведен на рис.4.7.

## **5. Вопросы для защиты**

- 5.1. Анаберрационная система Кассегрена.
- 5.2. Анаберрационная система Грегори.
- 5.3. Условие синусов и изопланатизма.
- 5.4. Аберрации осевой точки.
- 5.5. Аберрации узких пучков.
- 5.6. Аберрации широкого пучка лучей в меридиональном сечении.
- 5.7. Аберрации широкого пучка лучей в сагиттальном сечении.
- 5.8. Функция передачи модуляции.
- 5.9. Число Штреля.
- 5.10. Влияние экранирования на ФРТ и ФПМ.
- 5.11. Уравнение асферической поверхности.
- 5.12. Дифракционно-ограниченные системы.
- 5.13. Геометрически-ограниченные системы.
- 5.14. Критерий Релея.
- 5.15. Критерий Марешаля.

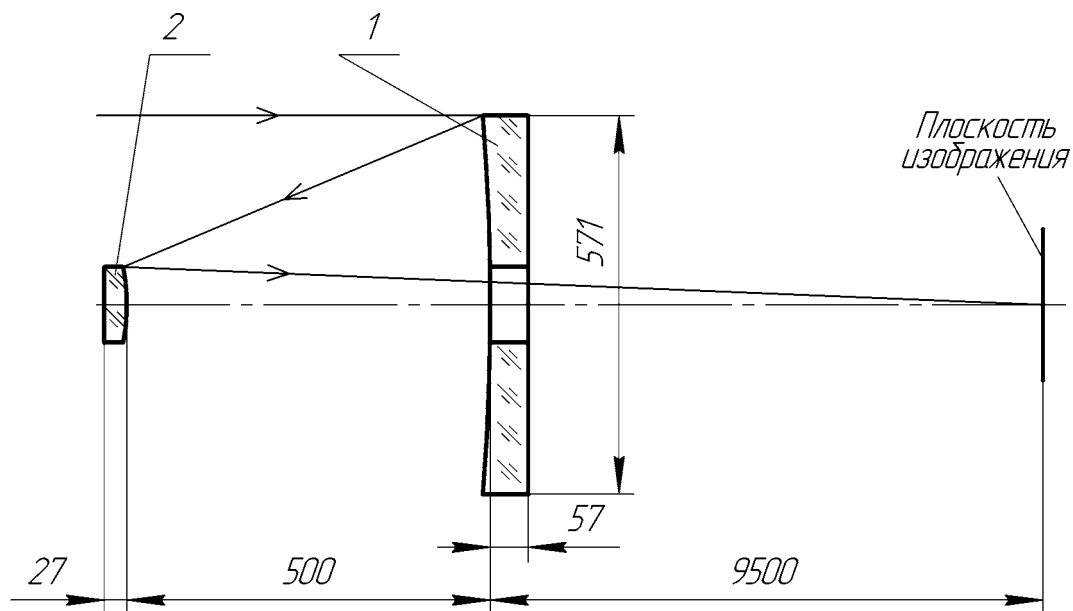
## **6. Литература**

1. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. Машиностроение, 1968.
2. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. Учебник для ВУЗов М. Логос, 2000.
3. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.А. Теория оптических систем, М.: Машиностроение, 1992.
4. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2000.

Фокусное расстояние:  $F' = 4000 \text{ мм}$

Относительное отверстие:  $1:2,5$

Угловое поле:  $2\omega = 8'$



№ позиции	$f'$	$S_F$	$S'_{F'}$
1	-769,23	-769,23	-769,23
2	-333,33	-333,33	-333,33
Система	4000	10000	1400

№ позиции	Св. $\varnothing_1$	Стрелка по св. $\varnothing_1$	Толщина по оси
1	571	-26,56	57,00
2	333,33	27,00	27,00

## 7. Варианты заданий для работы

Таблица 4.1

Вариант	Тип системы	$f'$ (мм)	1:k	Экранирование по диаметру $K_{эк}$	Расстояние между зеркалами	Расстояние от вершины главного зеркала до изображения
1	Кассегрен	3000	1:6	0,40	1000	
2		3500	1:7	0,40	1100	
3		4000	1:8	0,40	1400	
4		5000	1:10	0,40	1500	
5		2500	1:5	0,40	900	
6		2000	1:4	0,40	700	
7		3000	1:6	0,40		150
8		3500	1:7	0,40		175
9		4000	1:8	0,40		200
10		5000	1:10	0,40		250
11		2500	1:5	0,40		125
12		2000	1:4	0,40		100
13		3000	1:7	0,35	1200	
14		3500	1:8	0,35	1400	
15		4000	1:10	0,35	1600	
16	Грегори	3000	1:6	0,42	1200	
17		3500	1:7	0,43	1300	
18		4000	1:8	0,44	1600	
19		5000	1:10	0,45	1700	



20		2500	1:5	0,38	1100	
21		2000	1:4	0,39	1000	
22		3000	1:6	0,40		100
23		3500	1:7	0,41		125
24		4000	1:8	0,42		150
25		5000	1:10	0,43		200
26		2500	1:5	0,44		100
27		2000	1:4	0,45		50
28		3000	1:7	0,39	1400	
29		3500	1:8	0,40	1600	
30		4000	1:10	0,41	1800	

## Лабораторная работа №5 «Расчет технологических показателей схем контроля асферических поверхностей двухзеркального апланатического объектива»

**Цель работы:** приобретение практических навыков расчёта технологических параметров асферических поверхностей и схем для их контроля.

### 8. Задание для работы

1.7. Определить технологические параметры главного зеркала апланатического двухзеркального телескопа, рассматриваемого в работе №4 «Синтез и анализ качества изображения апланатического двухзеркального объектива».

1.8. Выполнить расчёт схемы контроля главного зеркала.

1.9. Определить технологические показатели вторичного зеркала двухзеркального телескопа.

1.10. Выполнить расчёт схемы контроля вторичного зеркала телескопа.

### 9. Краткая теория

К технологическим показателям асферических поверхностей относятся:

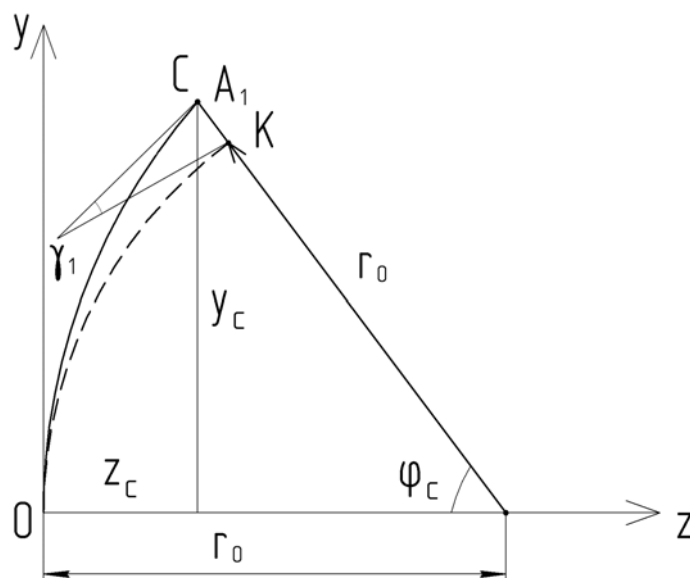


Рис.5.1. Технологические показатели сплошной асферической поверхности:

$A_1$  – вершинная асферичность;  $\varphi_c$  – крутизна;  $\gamma_1$  – градиент асферичности;  $r_0$  – радиус кривизны в вершине поверхности;  $OC$  – образующая асферической поверхности;  $OK$  – образующая вершинной сферы;  $z_c$ ,  $y_c$  – координаты асферической поверхности.

- 1) Наружный световой диаметр ( $D_c$  в мм).
- 2) Вид уравнения поверхности.
- 3) Крутизна, измеряемая углом  $\varphi_c$  между касательными к образующей асферической поверхности в её вершине и в зоне светового диаметра.
- 4) Точность асферизации:
  - ) По местным ошибкам – отклонение фактической поверхности от расчётной в долях длины волны  $\lambda$  или угловые отклонения нормали к фактической поверхности от расчётной в некоторой зоне.
  - ) По общим ошибкам – допуск на коэффициенты уравнения асферической поверхности.
- 5) Асферичность:
  - ) Вершинная ( $A_1$  в мм) – наибольшее отступление данной асферической поверхности от соприкасающейся с ней в её вершине сферы, радиус которой ( $r_0$  в мм) равен радиусу кривизны асферической поверхности в её вершине. «Вершинная» и другие асферичности измеряются по радиальному направлению «вершинной» или другой сферы в зоне светового диаметра детали.
  - ) Для кольцевых и внеосевых деталей вместо «вершинной» асферичности вычисляется «сагиттальная» асферичность ( $A_2$  в мм) – наибольшее отступление данной асферической поверхности от соприкасающейся с ней в зоне меньшего светового диаметра сферы, радиус которой ( $r_2$  в мм) равен сагиттальному радиусу кривизны асферической поверхности в указанной зоне (рис. 5.2).

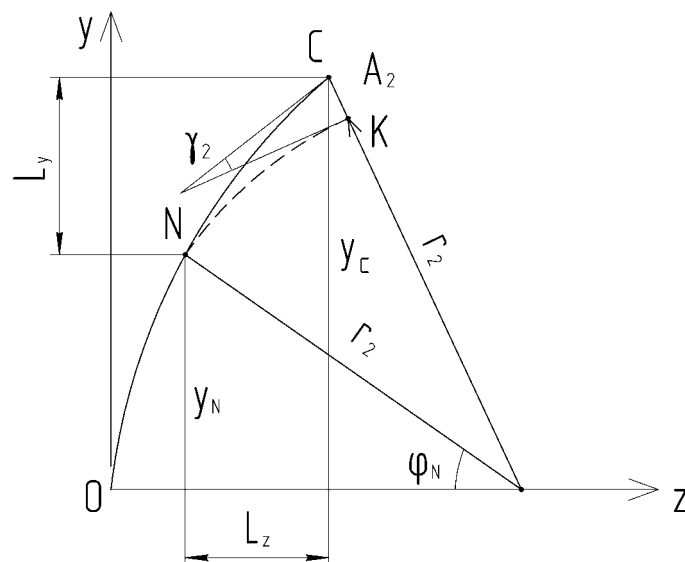


Рис.5.2. Технологические показатели асферической поверхности с отверстием:

$A_2$  – «сагиттальная» асферичность;  $r_2$  – сагиттальный радиус кривизны для края отверстия;  $\gamma_2$  – градиент «сагиттальной» асферичности;  $\varphi_N$  – крутизна в зоне N; ONC – образующая асферической поверхности; NK – образующая «сагиттальной» сферы;  $L_z$  – разность координат точек C и N по оси z;  $L_y$  – разность координат точек C и N по оси y.

- ) Асферичность относительно ближайшей сферы для сплошных поверхностей – «трёхточечная» асферичность ( $a_3$  в мм) – отступление асферической поверхности от сферы, проходящей через её вершину и зону светового диаметра (рис. 5.3).

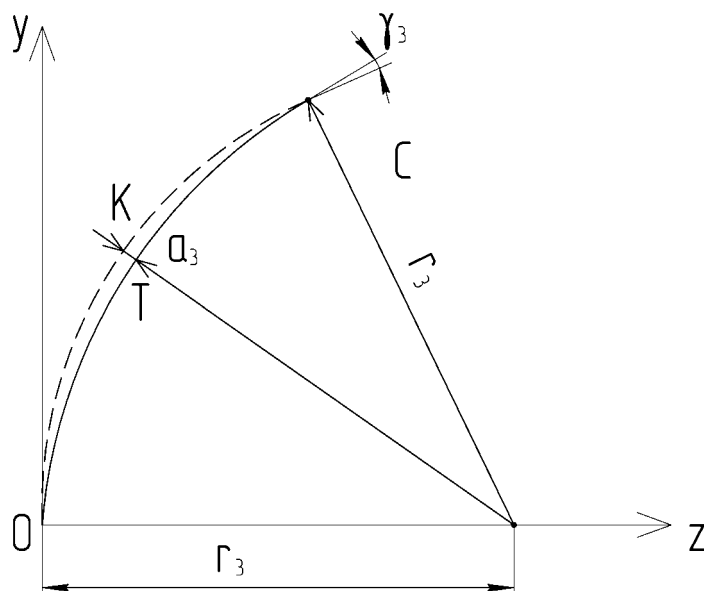


Рис.5.3. Асферичность относительно ближайшей сферы сплошной асферической поверхности.

$a_3$  – «трёхточечная» асферичность;  $r_3$  – радиус ближайшей сферы;  $\gamma_3$  – градиент «трёхточечной» асферичности; OTC – образующая асферической поверхности; OKC – образующая «трёхточечной» сферы.

- ) Асферичность относительно ближайшей сферы для кольцевых и внеосевых деталей – «четырёхточечная» асферичность ( $a_4$  в мм) – отступление от сферы, проходящей через зоны внутреннего и внешнего световых диаметров (рис. 5.4).

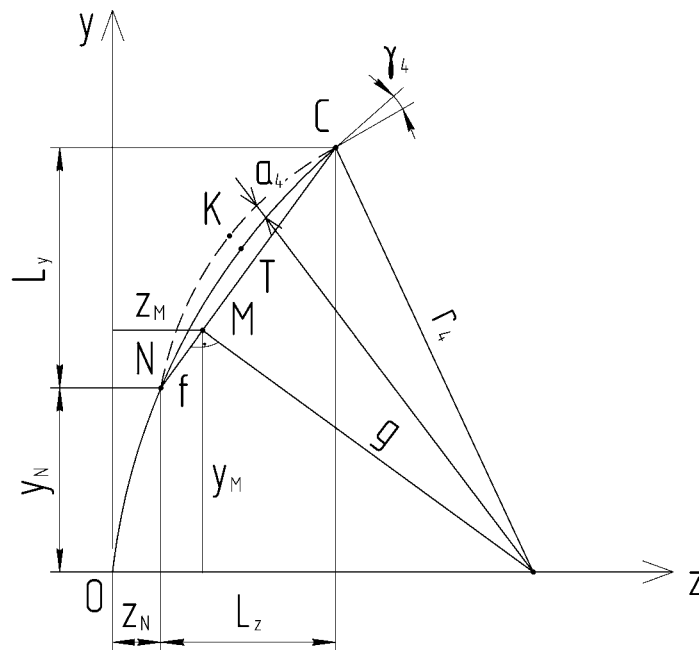


Рис.5.4. Асферичность относительно ближайшей сферы асферической поверхности с отверстием.

$a_4$  – «четырёхточечная» асферичность;  $r_4$  – радиус ближайшей сферы;  $\gamma_4$  – градиент «четырёхточечной» асферичности; ONTC – образующая асферической поверхности; NKC – образующая «четырёхточечной» сферы;  $NM = f$ .

- 6) Градиенты асферичностей ( $\gamma$ ) – наибольшее изменение соответствующей асферичности на длине дуги образующей, равной 1 мм. С геометрической точки зрения градиент асферичности представляет собой угол между касательными к асферической поверхности и к соответствующей сфере в данной зоне.
- 7) Конструктивные особенности деталей – различаются детали кольцевые, сплошные соосные и внеосевые, зеркала и линзы.

Другие показатели имеют такое же значение, как и в сферической оптике. Формулы для определения технологических показателей, рассмотрим только для поверхностей, уравнения которых имеют вид:

$$x^2 + y^2 = 2r_0 \cdot z + q \cdot z^2, \text{ где } q = e^2 - 1, e - \text{эксцентриситет кривой второго порядка}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{Y_c}{p + q \cdot z_c} \quad (5.1)$$

Поскольку в данной работе поверхности имеют отверстие или нерабочую зону в центре зеркала, приведём формулы только для этого случая.

Радиус сагиттальной сферы  $R_2$  определяются по формуле:

$$r_2 = \frac{r_0 + q \cdot Z_N}{\cos \varphi_N} \quad (5.2)$$

Радиус ближайшей «четырёхточечной» сферы находим (рис. 5.4):

$$r_4 = \sqrt{q^2 + f^2} \quad (5.3)$$

где:

$$\begin{aligned} q &= 2f \frac{Y_M}{L_z}; & 2f &= \sqrt{L_z^2 + L_y^2}; \\ L_z &= Z_C - Z_N; & L_y &= Y_C - Y_N; \\ Y_M &= \frac{Y_N + Y_C}{2}; & Z_M &= \frac{Z_N + Z_C}{2}; \end{aligned}$$

Асферичность «сагиттальная» определяется как (рис. 5.2):

$$A_2 = \sqrt{(r_2 \cdot \cos \varphi_N - L_z)^2 + Y_C^2} - r_2 \quad (5.4)$$

Асферичность «четырёхточечную» получаем (рис. 5.4) по формуле:

$$a_4 = r_4 - \sqrt{(Z_0 - Z)^2 + Y^2} \quad (5.5)$$

где:

$$Z_0 = Z_M + \sqrt{q^2 - Y_M^2}; \quad Y = Y_N \dots Y_C \text{ (всего 10-20 зон)}$$

Градиент «сагиттальной» асферичности равен:

$$\gamma_2 = \arcsin \frac{Y_C}{r_2 + A_2} - \varphi_C \quad (5.6)$$

Градиент «четырёхточечной» асферичности находим по формуле:

$$\gamma_4 = \frac{a_{4K} - a_{4(K-1)}}{Y_K - Y_{K-1}} \quad (5.7)$$

В зависимости от размеров асферических деталей и требований к точности изготовления существуют различные способы их контроля. Для зеркальных асферических поверхностей часто применяется метод контроля из анаберрационных точек.

Рассмотрим этот метод и применим его для контроля асферических зеркал рассчитанного зеркального объектива.

Отражающие асферические поверхности второго порядка, образованные вращением кривых второго порядка вокруг оси, соединяющей их геометрические фокусы, имеют следующие свойство: геометрические фокусы этих поверхностей являются оптически сопряженными анаберрационными точками.

Суть идеи использования анаберрационных точек для контроля качества асферических поверхностей такова: если поверхность имеет идеальную форму, а точечный источник света расположен точно в одном из геометрических фокусов, то отраженные от поверхности лучи образуют сферический волновой фронт, центр которого совпадает с другим геометрическим фокусом. Источник света и его изображение можно менять местами. Методы контроля, основанные на использовании анаберрационных точек, разнообразны, но цель одна: выявить величину и знак деформации волнового фронта и по ним определить погрешности асферической поверхности.

Практическое использование метода анаберрационных точек требует создания автоколлимационной системы, состоящей из контролируемой поверхности и вспомогательного сферического зеркала. Принцип построения автоколлимационной системы заключается в том, что центр кривизны сферического зеркала совпадает с одним из геометрических фокусов контролируемой асферической поверхности, а точечный источник света или его изображение – с другим геометрическим фокусом. В системе обеспечивается автоколлимационный ход лучей, лучи света дважды отражаются от контролируемой поверхности и один раз от вспомогательного зеркала.

В рассчитанных апланатических двухзеркальных системах имеем вогнутые гиперболоиды, выпуклые гиперболоиды и вогнутые эллипсоиды. Будем рассматривать схемы контроля только для этих зеркал.

Схемы контроля вогнутого гиперболоида показана на рис 5.5.

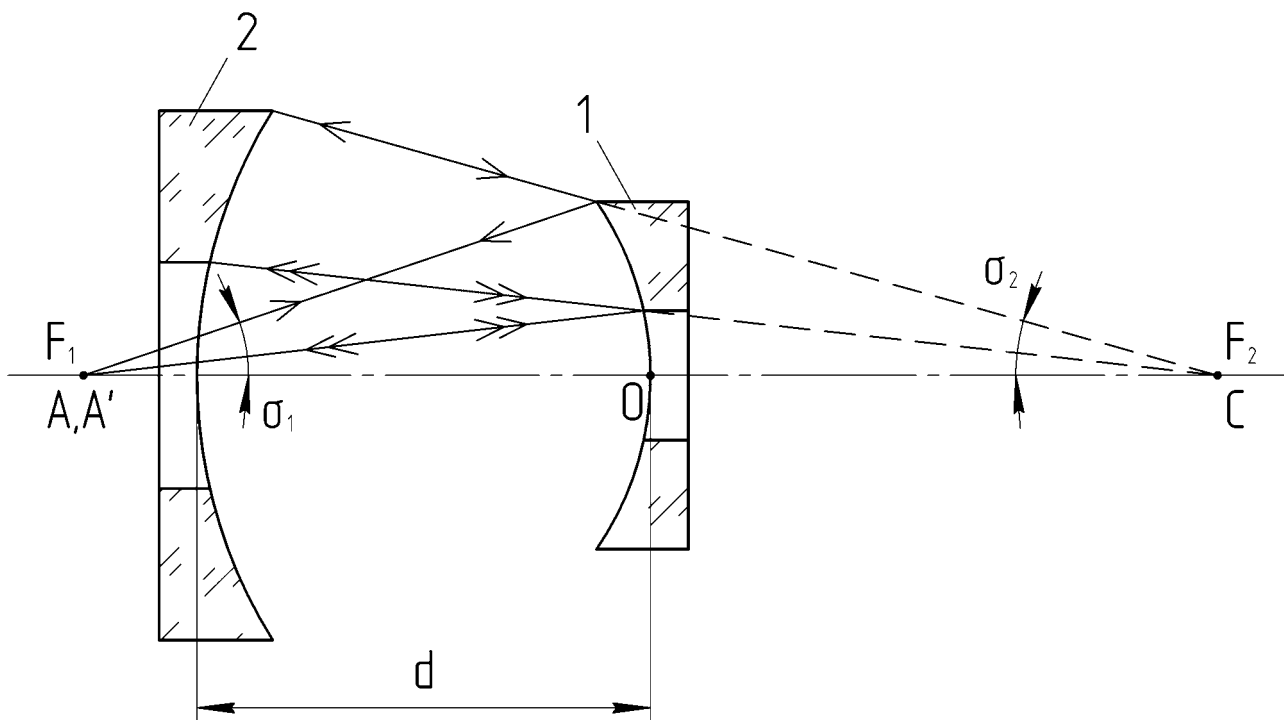


Рис.5.5. Схема контроля вогнутого гиперболического зеркала.

Основные формулы:

$$\begin{aligned}
 OF_1 &= \frac{r_0}{\varepsilon + 1}; & OF_2 &= \frac{r_0}{\varepsilon - 1}; \\
 R &= d + OF_2; & D_2 &= 2R \sin \sigma_2; \\
 D_0 &\approx \frac{d_0(1 + \varepsilon)}{2\varepsilon}; & F_1F_2 &= \frac{2r_0\varepsilon}{\varepsilon^2 - 1};
 \end{aligned}$$

где:

$R$  – радиус сферического вспомогательного зеркала,

$d$  – расстояние между зеркалами задается из конструктивных соображений,  
 $d \approx OF_1$ ,

$D_2$  – диаметр вспомогательного зеркала,



$D_0$  – диаметр неконтролируемой зоны в асферическом зеркале,

$d_0$  – диаметр отверстия в сферическом зеркале.

Схема контроля выпуклого гиперболического зеркала приведена на рис. 5.6.

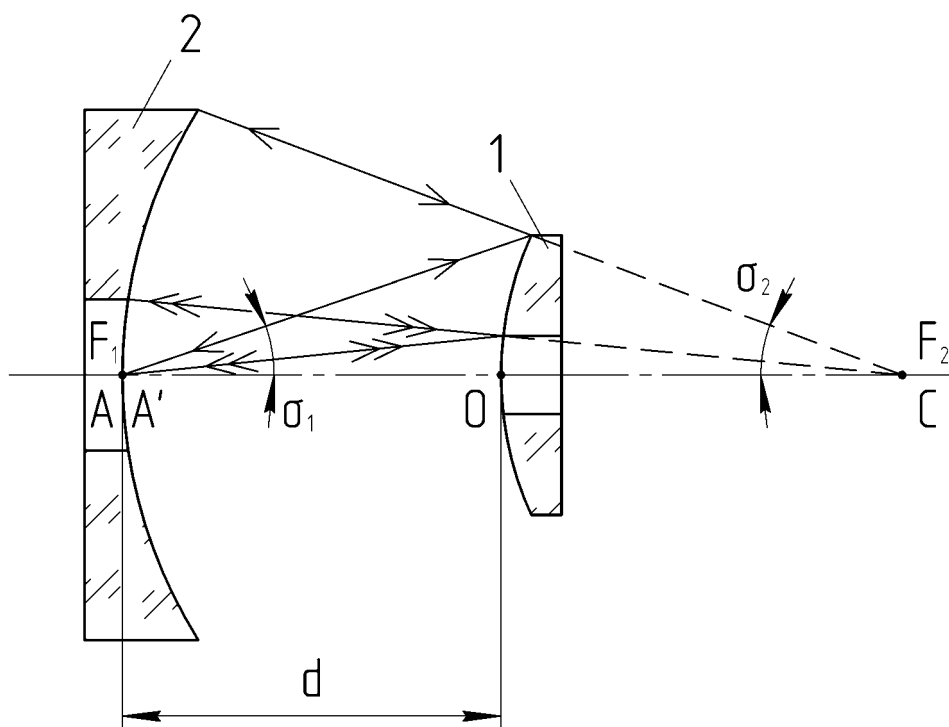


Рис.5.6. Схема контроля выпуклого гиперболического зеркала.

Центр кривизны сферического зеркала 2 совпадает с одним из фокусов ( $F_2$ ) гиперболической поверхности 1.

Основные формулы:

$$OF_1 = \frac{r_0}{\varepsilon - 1};$$

$$R = d + OF_2; \quad OF_2 = \frac{r_0}{\varepsilon + 1}; \quad F_1F_2 = \frac{2r_0\varepsilon}{\varepsilon_2 - 1};$$

$$D_0 \approx \frac{d_0(\varepsilon - 1)}{2\varepsilon}; \quad d \approx OF_1; \quad D_2 \approx 2R \sin \sigma_2;$$

Обозначения такие же, как и в схеме контроля вогнутой гиперболической поверхности.

Схема контроля вогнутой эллиптической поверхности показана на рис 5.7.

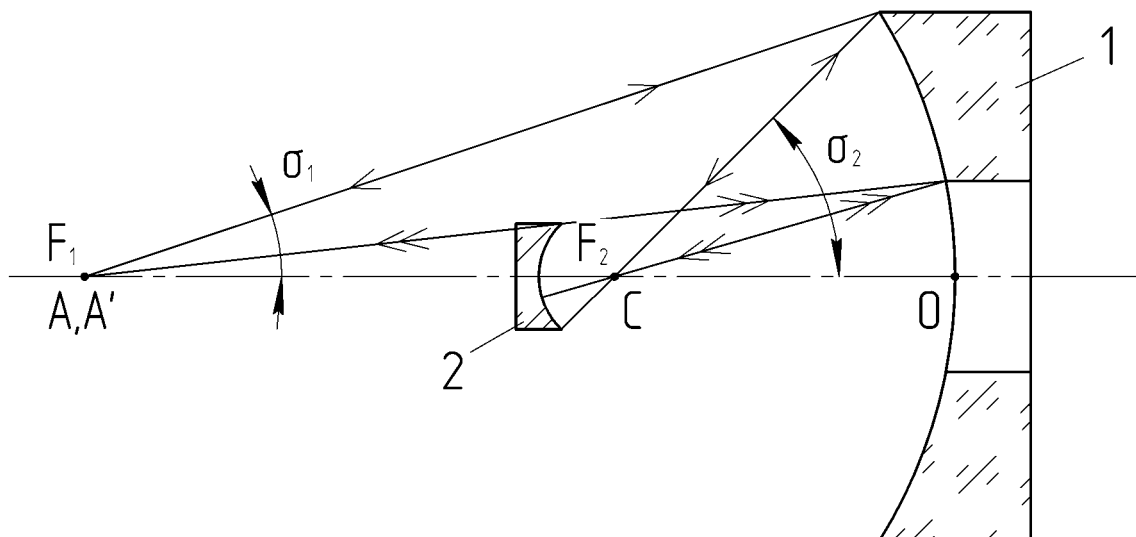


Рис.5.7. Схема контроля вогнутого эллиптического зеркала.

Центр кривизны сферического зеркала 2 совпадает со вторым фокусом ( $F_2$ ) эллиптической поверхности 1. Зеркало 2 должно иметь диаметр как можно меньше для того, чтобы неконтролируемая зона в зеркале 1 не была больше диаметра отверстия.

Основные формулы:

$$OF_1 = \frac{r_0}{1 - \varepsilon^2}; \quad OF_2 = \frac{r_0}{1 + \varepsilon}; \quad F_1F_2 = \frac{2r_0\varepsilon}{1 - \varepsilon^2};$$

$R$  берется из конструктивных соображений небольшим (может быть шарик)  
 $D_2 = 2R \sin \sigma_2$ .

## 10. Указание по выполнению работы

3.7. При выполнении п. 1.1. для главного зеркала, считая, что  $D_c$  (наружный световой диаметр) и уравнение поверхности известны, определить крутизну  $\varphi_c$ , «сагиттальную» асферичность  $A_2$ , градиент «сагиттальной»

асферичности  $\gamma_2$ , радиус ближайшей сферы  $R_4$  и «четырёхточечную» асферичность  $a_4$  (для 10 точек).

3.8. Выполнив п. 1.2, сделать вывод о возможности и целесообразности данного метода контроля для главного зеркала по габаритным соображениям.

3.9. При выполнении п. 1.3 для выпуклого вторичного зеркала определить те же технологические показатели, что и для главного зеркала.

3.10. После расчета схемы контроля вторичного зеркала по п. 1.4 сделать вывод о целесообразности и возможности осуществления этого метода контроля.

## 11. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

4.9. Исходные данные контролируемой системы.

4.10. Технологические показатели главного зеркала.

4.11. Схема контроля главного зеркала с конструктивными данными и абберациями осевой точки.

4.12. Технологические показатели вторичного зеркала.

4.13. Схема контроля вторичного зеркала с конструктивными данными и абберациями для осевой точки.

Чертеж одного из зеркал пример оформления дан на рис. 5.8.

## 12. Вопросы для защиты

1. Схема контроля вогнутого гиперболического зеркала по методу анаберрационных точек

2. Схема контроля выпуклого гиперболического зеркала по методу анаберрационных точек

3. Уравнение асферической поверхности

4. Вершинная асферичность  $A_1$

5. Крутизна  $\varphi_c$

6. Градиент асферичности  $\gamma_1$

7. «Сагиттальная» асферичность  $A_2$

8. Градиент «сагиттальной» асферичности  $\gamma_2$

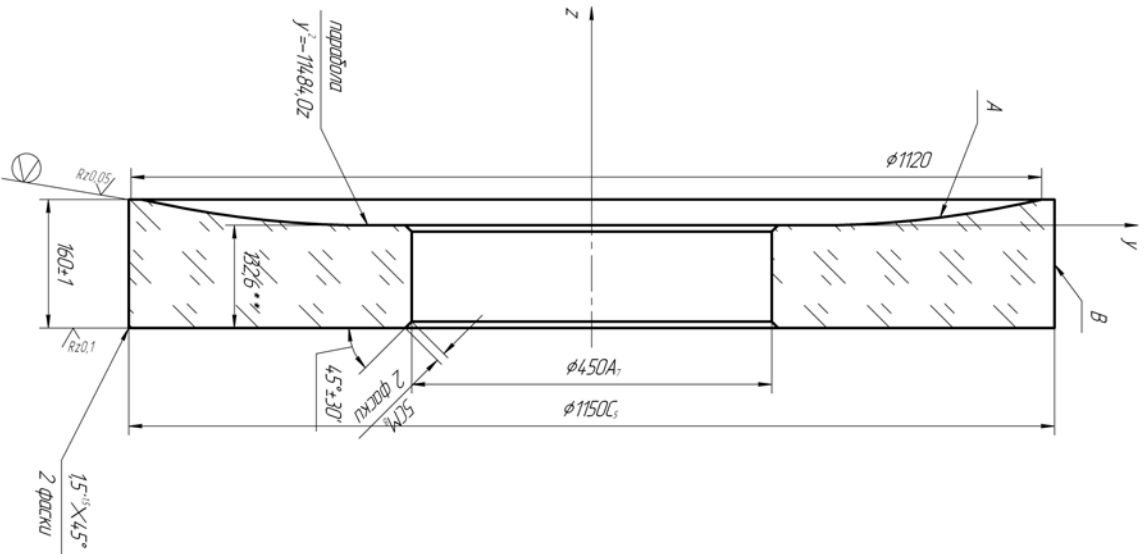
9. Радиус ближайшей сферы для сплошной асферической поверхности  $r_3$

10. «Трёхточечная» асферичность  $a_3$
11. Радиус ближайшей сферы для асферической поверхности с отверстием  $r_4$
12. «Четырёхточечная» асферичность  $a_4$

## **6. Литература**

5. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М., «Машиностроение» 1976.
6. Окатов М.А., Антонов Э.А. и др. Справочник технология-оптика, под ред. Окатова М.А., Спб.: Политехника, 2004.
7. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М., Наука, 1976.





Чертеж зеркала с параболической поверхностью из сплава С0115М по ОСТ 3-104-77

822/1/1

- 1 Радиальное выение поверхности В относительно оси отверстия  $\phi 450$  не более 0,1 мм  
Торцевое выение поверхности А относительно той же оси не более 0,1 мм
- 2 \* - Испупленне фактической поверхности от теоретической не должно превышать  $\lambda/8$   
Качество поверхности проверяется по схеме контроля согласно черт. 6
- 3 Разность толщин по краю не более 0,1 мм
- 4  $\odot$  - Зеркалы ИЗ8Р по ОСТ 3-1901-73.
- 5 \*\* - Размеры для справок

У	д	П	-
250	0,0000	П-П	-
265	0,0012	Однородность	-
280	0,0024	Двойное лучерепределение	-
295	0,0035	Температурный коэф-циент линейного расширения	2
310	0,0046	ε	-
325	0,0056	Бесфидильность	-
340	0,0065	Плываемость	1
355	0,0074	DN	-
370	0,0081	AR	-
385	0,0087	AR	-
400	0,0092	AR	-
415	0,0094	AR	-
430	0,0095	Требования к асферической поверхности А	РШ-2
445	0,0094	κ	*
460	0,0090	α	±0,5%
475	0,0083	Δ <sub>0</sub>	0,06**
490	0,0073	δ <sub>0</sub>	0,015**
505	0,0060	A <sub>1</sub>	5*28**
520	0,0044	γ <sub>1</sub>	УП
535	0,0024	φ <sub>1</sub>	0,05
550	0,0000	P <sub>1</sub>	28710
R=5756,832		C	-
		F	-
		S <sub>1</sub>	28710
		S <sub>F</sub>	1100/500
		сф φ	

Рис. 5.8. Пример оформления чертежа с асферической поверхностью

Изм/Лист	№ докум	Подп	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разработ						
Проект						
Технипр						
Начальр						
Упр						

## Содержание:

<b>1. Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Лабораторная работа №1 .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Лабораторная работа №2 .....</b>	<b>17</b>
<b>4. Лабораторная работа №3 .....</b>	<b>26</b>
<b>5. Лабораторная работа №4 .....</b>	<b>50</b>
<b>6. Лабораторная работа №5 .....</b>	<b>66</b>
<b>7. Содержание .....</b>	<b>75</b>