МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ



ЦУКАНОВА Г.И., БАХОЛДИН А.В.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ ПРИКЛАДНОЙ ОПТИКИ

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



Санкт-Петербург 2008 Цуканова Г.И., Бахолдин А.В.

Специальные разделы прикладной оптики. Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А. – СПб: СПб ГУИТМО, 2007. – 77с.

В учебно-методическом пособии приводятся краткие теоретические сведения, варианты индивидуальных заданий, указания по выполнению 5 лабораторных работ на компьютерах по курсам «Специальные разделы 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 оптотехники 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: к.т.н. Стариченкова В.Д., филиал ФГУП «УОМЗ» «Урал-ГОИ» к.т.н. Маковцов Г.А. ФГУП НПК «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 разделы трёх курсов: 1) «Специальные разделы 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 б 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 аберрационную 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 «пробою 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_{Π} минимален. Далее пучок начинает расходиться. Основными параметрами лазера являются угол расходимости пучка 2φ и размер перетяжки D_{Π} показанные на рисунке 1.1.



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

В процессе расчёта оптической систему удобно принять, что излучающий предмет находится на бесконечности. Его угловые размеры определяются углом 2ω , равным углу расходимости 2φ . 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.

Основной задачей оптической системы является уменьшение расходимости выходного пучка. Во многих практических приложениях дополнительно необходимо получить выходной пучок в несколько раз большего поперечного размера. Подобное преобразование пучка выполняет телескопическая система, представленная на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3. Преобразование светового пучка телескопической системой.

Инвариант Лагранжа – Гельмгольца для коллимационной оптической системы можно записать в следующем виде:

$$D_{ex} \cdot tg\omega = D'_{eblx} \cdot tg\omega', \qquad (1.1)$$

5

где: D_{ax} – диаметр входного зрачка системы;

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

2*w* – угловое поле оптической системы в пространстве предметов;

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

Из инварианта следует, что чем меньшее значение угла расходимости выходного пучка необходимо получить, тем больший диаметр выходного зрачка будет иметь оптическая система при постоянных входных характеристиках.

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: a) 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 с учётом заданных габаритных ограничений.

Основные характеристики телескопической системы Галилея взаимосвязаны следующим соотношением:

$$\Gamma = \frac{D_{ex}}{D'_{eblx}} = \frac{tg\omega'}{tg\omega} = \frac{-f'_1}{f'_2},$$
(1.2)

где: Г – угловое увеличение телескопической системы;

 f'_{1} – фокусное расстояние первого компонента;

 f'_2 – фокусное расстояние второго компонента.

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



Рисунок 1.5. Принципиальная оптическая схема перевёрнутой системы Галилея

Как показано на рисунке 1.5, расстояние между компонентами d_2 , определяющее длину системы, связывает фокусные расстояния первого и второго компонентов:

$$f'_{2} = d_{2} - f'_{1} \tag{1.3}$$

Сопряжение оптической системы с лазером достигается установкой входного зрачка системы в плоскость перетяжки лазерного пучка на расстояние a_n от первого 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 аберрационные характеристики. Увеличение системы определяется на этапе габаритного расчёта. Аберрации же системы зависят от конструктивных параметров. Их разумным выбором можно повысить качество выходных параметров. В первую очередь следует исправить искажение осевой точки – сферическую аберрацию. Аберрации внеосевых пучков из-за малости полевого угла ω слабо сказываются на расходимости излучения.

Положительные линзы имеют отрицательное значение сферической аберрации, а отрицательные – положительное. Для устранения сферической аберрации во всей системе нужно, чтобы сферические аберрации компонентов были бы равны по модулю и противоположны по знаку. Аберрации при относительном отверстии пропорциональны одинаковом фокусному Фокусное расстояние первого расстоянию. отрицательного компонента фокусного расстояния значительно меньше второго положительного Отсюда следует, что необходимо уменьшать сферическую компонента. аберрацию положительного компонента и увеличивать значение сферической аберрации 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 аберрации 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 аберрации выполняется, когда угол α_4 внутри линзы равен:

$$\alpha_4 = \frac{2n_4 + 1}{2n_4 + 4},\tag{1.4}$$

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:

$$r_{k} = h_{k} \cdot \frac{n_{k+1} - n_{k}}{n_{k+1}\alpha_{k+1} - n_{k}\alpha_{k}},$$
(1.5)

где k – номер поверхности в системе;

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

$$h_k = h_{k+1} + \alpha_{k+1} d_k.$$
(1.6)

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 аберрацию, чтобы компенсировать остаточную аберрацию положительной линзы. Конструктивные параметры первой линзы можно определить, исследуя её влияние на аберрацию 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:

$$r_2 = (1 - n_2) f'_1, \tag{1.7}$$

где *n*₂ – показатель преломления материала отрицательной линзы для заданной длины волны.

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

Расстояние d_2 между компонентами равно:

$$d_2 = S'_{F1} - S_{F2}. \tag{1.8}$$

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

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

При небольшом изменении угла α_2 в первой линзе величина сферической аберрации $\Delta \sigma'$ меняется линейно. Остаточную ошибку сферической аберрации 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 аберрации 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 1.5, 1.6 и 1.8.

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

Необходимо построить график зависимости $\Delta \sigma'$ от α_2 . График будет иметь почти линейную форму, как показано на рисунке 1.8. Возможное отклонение от прямой зависимости свидетельствует о наличии аберраций высших порядков. По графику можно определить то значение угла нулевого луча $\alpha_{2,0}$, при котором произойдёт взаимная компенсация аберраций первого и второго компонентов системы:



Рисунок 1.8. Зависимость величины поперечной составляющей сферической аберрации Δσ' от угла первого параксиального луча внутри отрицательного компонента α₂.

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 ω' . Меньше этого угла величина расходимости не будет даже при полной аберрационной коррекции системы. Неисправленная сферическая аберрация увеличит угол расходимости, что проиллюстрировано на рисунке 1.9.

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

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.

(1.9)



Рисунок 1.9. Расходимость лазерного пучка после оптической системы.

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 (С), 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 (С/1) и второй (С/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 аберрационные характеристики системы. Например, при исправлении поперечной составляющей сферической аберрации необходимо записать:

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

В таком случае будет корректироваться поперечная составляющая сферической аберрации для луча нулевой длины волны, проходящего через крайнюю точку зрачка. Если необходимо минимизировать аберрацию 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 1.2 – 1.3. Диафрагменное число *k* связывает между собой фокусное расстояние первого компонента и диаметр входного зрачка:

$$k = \frac{\left|f'_{1}\right|}{D_{ex}}.$$
(1.10)

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

Аберрационные 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 аберрации за счёт выбора материалов и

минимизации аберрации положительной линзы, следует использовать возможности оптимизации системы программными средствами.

3.3. При выполнении пункта 1.3 необходимо оценить величину сферической аберрации 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 аберрации 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.



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 аберрация линзы зависит от показателя преломления материала, из которого она изготовлена?

5.5. Как сферическая аберрация линзы зависит от её формы?

5.6. Какими способами можно уменьшить сферическую аберрацию 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.

Nº	λ, ΜκΜ	2ю, мин	2ω', мин	D, мм	-а _р , мм	D / f ' ₁
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

7. Варианты заданий для работы

Таблица 1.1.

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 аберрационные свойства системы.
- 1.4. Выполнить аберрационную 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 меньше фокусного расстояния объектива, что недопустимо ИЛИ при эксплуатации. Место фокусировки лазерного излучения должно находиться на значительном расстоянии от объектива. Однокомпонентная система не может удовлетворить этим двум взаимоисключающим требованиям: большой задний малом фокусном расстоянии. Для решения отрезок при этой задачи используются двухкомпонентные системы В виде перевёрнутого или состоящие телеобъектива, трёхкомпонентные, перевёрнутой ИЛИ ИЗ 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 2ω , 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*ω*, 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:

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

где: А' – задняя апертура системы;

w – угловой размер предмета;

δ – линейный размер изображения – диаметр площадки для фокусировки лазерного излучения;

 f'_{3} – фокусное расстояние третьего компонента, можно принять приблизительно равным заднему отрезку системы $f'_{3} \approx a'_{F'}$;

*Γ*₁₂ – угловое увеличение телескопической системы, состоящей из первого и второго компонента, которое равно:

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

где: $f'_1 - \phi$ окусное расстояние первого компонента;

 f'_2 – фокусное расстояние второго компонента.

Расстояние между компонентами телескопической системы d_2 равно:

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

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 аберрации, а отрицательные – положительное. Для устранения сферической аберрации во всей системе нужно, чтобы суммарная сферическая аберрация положительных компонентов была бы равна по модулю и противоположна по знаку сферической аберрации отрицательного компонента. Аберрации 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 аберрации 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 аберрацию и для этого её нужно поставить плоской стороной к параллельному ходу лучей. Вторая и третья линзы должны вносить минимальную сферическую аберрацию, 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 их 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 аберрации, а также аберрации 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 δ . 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 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 поверхности (С), 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 (С/1, С/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 (С/1, D/2), так и групповой маркой (С/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 аберрационные характеристики системы. Например, при исправлении поперечной составляющей сферической аберрации необходимо записать:

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

В таком случае будет корректироваться поперечная составляющая сферической аберрации для луча нулевой длины волны, проходящего через крайнюю точку зрачка. Если необходимо минимизировать аберрацию 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 аберрации (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:

$$k = \frac{\left|f'_{1}\right|}{D} \tag{2.4}$$

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

Аберрационные 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 аберрации за счёт выбора материалов И аберрации минимизации системы положительных линз, следует использовать возможность оптимизации системы программными средствами.

3.3. При выполнении пункта 1.3 необходимо оценить величину сферической аберрации 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 аберраций компонентов и все 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 аберрации 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.



7. Варианты заданий для работы

Таблица 2.1.

Nº	λ	2ω	δ	D	-a _p	a' _{F'}	k
1	МКМ	<u>МИН</u> 1 <i>5</i>		MM 5		200	7
1	3	15	0,4	5	20	200	/
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 расчет и выбор компонентов телескопической системы Кеплера.

1.2. Провести анализ качества изображения и аберрационную коррекцию системы.

1.3. Исследовать влияние конструктивных параметров и децентрировок на аберрации 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 призменных оборачивающих систем различной конструкции.

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

Основные характеристики телескопической системы: угловое увеличение Γ , угловое поле в пространстве предметов 2 ω 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:

$$-\Gamma = -\frac{tg\,\omega'}{tg\,\omega} = \frac{D}{D'} = \frac{f_1'}{f_2'},\tag{3.1}$$

где: Г – видимое увеличение телескопической системы;

2ω (град)– угловое поле оптической системы в пространстве предмета; 2ω' (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:

$$\Gamma^{2} = \frac{a_{P} + f_{1}'}{a_{P'}' - f_{2}'},\tag{3.2}$$

где *а*_{*P*} – расстояние от совмещенных главных плоскостей объектива до входного зрачка.

Длина системы *L* равна:

$$L = f_1' + f_2'. (3.3)$$

Диаметр полевой диафрагмы *D*_{ПД} можно рассчитать по формуле:

$$D_{\Pi\Pi} = 2 f_1' \cdot tg \,\omega = 2 f_2' \cdot tg \,\omega'. \tag{3.4}$$

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 2ω ' 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 2ω' 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 пересчёт объектива.

Вследствие того, что фокусное расстояние выбранного из каталога окуляра $f'_{2 \ \kappa ama \pi o 2}$ будет отличаться от расчетного значения f'_{2} , а окуляры не принято масштабировать, предварительно необходимо провести пересчет значения фокусного расстояния объектива f'_{1} по формуле:

$$f'_{1\,nepec\,4em} = -\Gamma f'_{2\,\kappa ama \, no \, c} \tag{3.5}$$

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

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

При выборе следует руководствоваться условиям:

• фокусное расстояние выбираемого объектива должно быть как можно ближе к пересчитанному значению $f_1'_{nepecyem}$;

• угловое поле 2ω 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 $f_1'_{каталог}$ обычно не совпадает с пересчитанным $f_1'_{nepecyem}$, поэтому проводят масштабирование объектива. Для этого определяют коэффициент масштабирования k_M :

$$k_M = \frac{f'_{1\,nepecvem}}{f'_{1\,\kappa ama, nor}}.$$
(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 ω , 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:

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

где *S'_{F'1}* – задний фокальный отрезок объектива,

*S*_{*F2*} – передний фокальный отрезок окуляра.

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

3.4. Расчёт призмы.

Призма или призменные 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:

$$d_{6030} = \frac{d}{n}.$$
(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 необходимостью положение определяется обеспечения значения перископичности. Заднюю грань призмы не следуют 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:

$$z \ge 0.01 f'_2^2. \tag{3.9}$$

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

$$tg\gamma = \frac{n}{2k},\tag{3.10}$$

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:

$$d = k \cdot D_{npu_{3Mbl}}.$$
(3.11)

Ширина редуцированной воздушной пластинки равна:

$$d_{6030} = \frac{d}{n}.$$
(3.12)

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



Рисунок 3.2. Определение размеров граней призм.

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

$$c = S'_{F_1} - d_{603\partial.cemka} - z - d_{603\partial}.$$
(3.13)

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

$$c = S'_{F_1} - z - d_{6030}. \tag{3.14}$$

Как только будут определены диаметры пучков, которые должны пропустить призмы, остальные размеры отражательных призм определяются из справочника. Затем даётся 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 ($D_{\Pi Z} \ge 25$ 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 Γ 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 аберраций телескопической системы.

Телескопическая система работает непосредственно с глазом наблюдателя. Остаточные аберрации зрительной трубы не снижают качество изображения, превышает разрешающую величина способность если ИХ не глаза. поперечная составляющая сферической Следовательно. аберрации для основной длины волны не должна превышать 1'. Хроматическое искажение изображения до 3' не приводит к заметному ухудшению качества. Величина поперечной составляющей сферической аберрации для крайних значений спектрального диапазона не должна превышать З'. На краю поля зрения качество изображения может быть несколько ниже. Поперечная аберрация внеосевых точек для основной длины волны не должна превышать 5', а для крайних значений спектрального диапазона – 10'. Если остаточные аберрации 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 аберраций целесообразно проводить оптимизацию по геометрическим аберрациям. 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 (С), 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/1-3, D/3;

Данная строчка означает, что в качестве изменяемых параметров будут использоваться кривизны поверхностей склеенного объектива (С/1, С/2, С/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:

D>(3) = 30;

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 Г (VG0) и положение заднего отрезка L' (SG'). Тогда следует записать:

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 аберрационные характеристики системы. Например, при исправлении поперечной составляющей сферической аберрации необходимо записать:

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

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

MF(*) = DYA/0*;

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

При необходимости коррекции аберраций крайних точек поля дополнительно может быть задана меридиональная составляющая поперечной аберрации:

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

В этом случае кроме аберраций осевой точки (DYA/0*) исправляются аберрации 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 аберраций 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 аберраций.

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

В графиках и таблицах представлены следующие характеристики:

m – относительная зрачковая координата в меридиональном сечении;

М – относительная зрачковая координата в сагиттальном сечении;

 H_{3p} (мм) – высота падения апертурного луча на зрачке ($H_{3p} = D/2$ при m = 1);

λ (мм) – длина волны излучения;

Δ*L*' (дптр) – продольная составляющая сферической аберрации;

Δσ' (мин) – угловая составляющая сферической аберрации;

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

Δω_m' (мин) – угловая аберрация в меридиональном сечении внеосевых пучков;

Δψ_s' (мин) – угловая аберрация в сагиттальном сечении внеосевых пучков;

Δω_s' (мин) – угловая аберрация в сагиттальном сечении внеосевых пучков;

Δ*L*'_{*m*} (дптр) – положение изображения внеосевых точек предмета в меридиональном сечении;

Δ*L*'_s (дптр) – положение изображения внеосевых точек предмета в сагиттальном сечении;

 Δ (%) – дисторсия;

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

Таблица 3.2. Аберрации точки на оси.

m,	н	λ _е =0.546мкм		λ _{F'} =0.488мкм		λ _{С'} =0.650мкм		AI '
отн. ед.	мм	ΔL', дптр.	Δσ', мин.	ΔL', дптр.	Δσ', мин.	ΔL', дптр.	Δσ', мин.	дптр.
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,	H _{3p} ,	λ _е =0.546мкм	λ _{F'} =0.488мкм	λ _{C'} =0.650мкм					
отн. ед.	MM	$\Delta \omega_{\rm m}$ ', мин.	$\Delta \omega_{\mathrm{m}}$ ', мин.	$\Delta \omega_{\mathrm{m}}$ ', 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,	H _{3p} ,	λ _е =0.546мкм	λ _{F'} =0.488мкм	λ _{C'} =0.650мкм					
отн. ед.	MM	$\Delta \omega_{\mathrm{m}}$ ', мин.	$\Delta \omega_{\mathrm{m}}$ ', мин.	$\Delta \omega_{\mathrm{m}}$ ', 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	H _{ar} ,	λ _е =0.546мкм		λ _{F'} =0.488мкм		λ _{C'} =0.650мкм		
отн. ед.	MM	Δψ _s ' мин.	Δω _s ' мин.	Δψ _s ' мин.	Δω _s ' мин.	Δψ _s ' мин.	Δω _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	M Han		46мкм	λ _F ;=0.488мкм		λ _{C'} =0.650мкм		
отн. ед.	MM	Δψ s' мин.	Δω _s ' мин.	Δψ _s ' мин.	Δω _s ' мин.	Δψ s' мин.	Δω _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.

ω, град.	ω', град.	L' _m , дптр	L' _s , дптр	Δ, %	Δω _{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 аберраций осевой точки.



Рисунок 3.4. Графики аберраций внеосевых точек в меридиональном сечении для основной длины волны (λ_e =0.546 мкм).



Рисунок 3.5. Графики аберраций внеосевых точек в сагиттальном сечении для основной длины волны (λ_e=0.546 мкм).



Рисунок 3.6. Графики полевых аберраций.

3.9. Определение влияния конструктивных параметров на аберрации системы.

Расчет влияния изменения конструктивных параметров и децентрировок поверхностей на аберрации 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 аберраций / Заместить габариты на вычисленные) и задать размер предмета (Главное меню / Предмет, Изображение, Диафрагма).

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

Чтобы получить матрицу значений влияния конструктивных параметров на аберрации 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 % (Д	цля		
R%/8-12,	всех поверу	кностей к	роме плоских)			
RN/3-7,	изменение	радиуса	пробного	стекла	В		

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

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:

поворот окуляра

TBL/9:10-12, TBL/10:8-12;

DR%(1-2)=1;	приращение радиуса на 1 % (для всех				
DR%(8-12)=1;	поверхностей кроме плоских: 1-2 и 8-12)				
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				
DCBL(5-10)=0.1;	(линз 1, 2, 5, 6, 7; склеек 8, 9; окуляра 10) на				
	0.1 мм				
DT(1-12)=0.3;	величина поворотов отдельных				
	1				
	поверхностей (1-12) на угол 30'				
DTBL(1-10)=0.1;	поверхностей (1-12) на угол 30' величина поворотов блоков (линз 1, 2, 5, 6,				
DTBL(1-10)=0.1;	поверхностей (1-12) на угол 30' величина поворотов блоков (линз 1, 2, 5, 6, 7; призмы 3; шкалы 4; склеек 8, 9;				
DTBL(1-10)=0.1;	поверхностей (1-12) на угол 30' 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 аберрации системы. Отдельную группу составляют аберрации, зависящие от векторных ошибок – наклонов и поперечных смещений поверхностей и блоков. К ним относят кому при децентрировке и поперечную аберрацию 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	(*)	=

IVII ()=	
V0,	увеличение системы (измеряется в кратах)
SG',	задний отрезок (для телескопической системы
	определяется в диоптрийной мере)
DYA/0*,	поперечная аберрация осевого пучка основной
	длины волны (0) для края и зоны зрачка (*)
	(измеряется в угловой мере)
WA/0*,	волновая аберрация осевого пучка основной
	длины волны (0) для края и зоны зрачка (*)
	(измеряется в длинах волн)
DYM/011*,	поперечная аберрация 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 аберрация 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	величина изменения параметра (мм.)	ΔΓ V0	ΔL'	б(Δ секу DY Δ	а σ') инды А/0*	Дл. W	АW волн. А/0*	δ(Δ секу DYM	ω _m ') /нды [/011*
исходной системы (мм.)			дптр SG'	m=1	m=0.707	m=1	m=0.707	m=1	m=-1
r1=									
d1=									

Таблица 3.7. Таблица влияния децентрировок.

		δ(Δy _κ ') KD/0*		δ(Δω _m ') DYM/011*	
вид децентрировки	величина децентрировки	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 аберрациями 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 аберрации [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 Δ_{Σ} распределяется на все параметры равномерно. Принимается, что каждый параметр влияет на искажение одинаково. В этом случае допустимое значение аберрации δ_{S} , вызванной одной скалярной ошибкой рассчитывается по формуле:

$$\delta_{S} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\sqrt{P}},\tag{3.15}$$

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 δ_V , вызванное одной векторной ошибкой можно определить как:

$$\delta_V = \frac{\Delta_{\Sigma}\sqrt{2}}{\sqrt{Z}},\tag{3.16}$$

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 δQ на любой параметр, используя следующую пропорцию:

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

где δ – допустимое изменение аберрации (соответственно, δ_S для скалярных ошибок и δ_V – для векторных); δQ – искомый допуск на параметр;

 $\delta(\Delta \omega')$ – аберрация, вызванная изменением параметра Q на величину ΔQ (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.

	$\Delta N_{ m max}$					
допуски на подгонку	под пробное стекло на	полный диаметр N				
допуски	на радиусы пробных	стёкол				
	радиусы поверхностей пробных	CTËKOJI				
допуски на толщину и воздушные промежутки						
риал оптические постоянные n _e v _e						
MaT(сорт материал					
	наименование детали		Объектив	Призма	Шкала	Окуляр
	№ Дет.		1	2	3	4

Таблица 3.9.

№ лет.	наименование летали	N <u>o</u> TOB.	допустимая деце поверхнос	нтрировка стей	№ ПОВ.	допустимая до	ыцентрировка нз
[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:

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

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

 λ – основная длина волны излучения;

*D*_{св} – световой диаметр на поверхности.

Для удобства контроля местных ошибок изготовления поверхностей, допуск на ΔN принимают исходя из соотношения:

$$\Delta N = \frac{N}{5 \div 10}.\tag{3.19}$$

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.



2,55±0 105* 105* 8 50028 5000 50028 50028 50028 5000 5000	$\frac{202}{A}$	<u>Δη</u> _e <u>Δ(η_F, -η_C,)</u> <u>Однородн.</u> <u>Двулучепр.</u> <u>μ_A</u> <u>Бессвильн.</u> <u>Пузырн.</u> <u>N</u> <u>ΔN</u> <u>P</u> <u>ΔR</u> <u>f'</u> <u>14, 7</u> <u>S_F</u> <u>-13, 5</u> <u>O_φ</u> <u>8, 5</u>	27 27 2 3 5 25 38 2 0,5 1V 1 1 12 37 37 5
1. * Размер для справок. 2. ○ - 24 Изоо; рд =1,2±0,2% пр Рис.3.9. Пример	ли <i>λ=660±30 нм, 0СТ 3-1901-85</i> 5 оформления чертер ЛИНЗФ	Ю ЛИНЗЫ	1. <u>cca Macumað</u> 5:1
Т.контр. Н.контр. Чтв	Стекло СТК9 ГОСТ 3514-94		1истов ЭИТМО

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 ΔN 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. Г № вар. D', мм 2ω k тип призмы a_P, MM $1\overline{2^{\circ}}$ - 3.5[×] 5 5 -10 1 - 3.5[×] 7 2 6 10° -12 -4^{\times} 4 12° -15 6 3 -4^{\times} 10° 7 4 0 5.5 Система Малафеева - Порро I рода после объектива - 4,2× **9**° 5.5 -15 5 6 - 4.5[×] 8°30' 5 7 6 -15 - 4,6[×] 8° 7 5 -10 6 -5^{\times} 4 10° 0 8 6

9	- 5 [×]	4.5	8°	-20	5	
10	- 5,4×	5	7°30'	-12	5	
11	- 5,6 [×]	5.5	7°30'	0	5.5	
12	- 5,6×	5	8°	-12	5	
13	- 5,8×	4	6°	-10	4.5	
14	- 6 [×]	5	6°	-12	4	
15	- 6 [×]	4	7°30'	-20	5	
16	- 4×	5	10°	0	6	
17	- 4 [×]	4.5	12°	-20	5	
18	- 4.2 [×]	6	8°	-15	5.5	
19	- 4.3×	5	7°30'	-10	6	
20	- 4.4×	5	12°	-25	7	
21	- 4.5 [×]	5	7°30'	-15	6	
22	- 4.5×	4.5	8°	0	5	
23	- 4.8 [×]	5	10°	0	7	Призма Шмидта с крышей (ВкР-45) после объектива
24	- 5 [×]	5	12°	-10	5	
25	- 5.2 [×]	4	10°	0	6	
26	- 5.2×	5	12°	-10	5	
27	- 5.6 [×]	4.5	8°	0	7	
28	- 6 [×]	4	7°30'	-20	5	
29	- 6 [×]	4.5	8°	0	6	
30	- 6.6 [×]	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 аберрацию и отступление от условия изопланатизма. Методом интерполяции определить квадраты эксцентриситетов главного и вторичного зеркал.

1.3. Рассчитать квадраты эксцентриситетов зеркал по формулам теории аберраций 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 аберрации, 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).





Рисунок 4.1. Объектив типа Кассегрена. а) оптическая схема объектива; б) ход нулевого луча в объективе.





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 аберрация. 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 перестаёт быть параболическим. Квадраты эксцентриситетов зеркал используются в качестве параметров для исправления двух аберраций: сферической аберрации и комы. В этом случае система превращается из анаберрационной в апланатическую.

Рассмотрим расчёт двухзеркальной апланатической системы в области аберраций 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 аберрации и комы третьего порядка имеют вид [1]:

$$\begin{array}{c}
Q_1 + h_2 \cdot Q_2 = 0 \\
0,5 + h_2 \cdot S_2 \cdot Q_2
\end{array}$$
(4.1)

где:

$$Q_{1} = \sigma_{1} \cdot T_{1} + P_{1}; \qquad Q_{2} = \sigma_{2} \cdot T_{2} + P_{2}$$

$$T_{1} = -\alpha_{2}^{3} / 4; \qquad P_{1} = -\alpha_{2}^{3} / 4$$

$$T_{2} = \frac{(\alpha_{3} + \alpha_{2})^{3}}{4}; \qquad P_{2} = \frac{(\alpha_{3} - \alpha_{2})^{2}}{4} (\alpha_{3} + \alpha_{2})$$

$$S_{2} = -d_{1} / h_{2}; \qquad d_{1} = (1 - h_{2}) / \alpha_{2}$$

 σ_1 , σ_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:

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

$$\sigma_{2} = -\frac{2}{d_{1}(\alpha_{3} + \alpha_{2})^{3}} - \frac{(\alpha_{3} - \alpha_{2})^{2}}{(\alpha_{3} + \alpha_{2})^{2}}$$
(4.3)

54

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

$$y^{2} + x^{2} = 2r_{0}z - (1 - e^{2})z^{2}$$

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 η .

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 η (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_{nped} , которая определяется по формуле [4]:

$$N_{npe\partial} = \frac{2A'}{\lambda}$$

где:

 λ – 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 – безаберрационная 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 аберрациями.

Определим угловое поле системы ИЗ условия eë соответствия дифракционно-ограниченной. При ЭТОМ можно ориентироваться И ПО волновым аберрациям 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 безаберрационная, если число Штреля больше 0,8, то система практически безаберрационная.

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

$$K_{_{\mathcal{H}}} = \frac{D_2}{D_1}$$

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 $k_{_{3\kappa}} \leq 0,3$), то это влияние незначительное. Если же экранирование $k_{_{3\kappa}} \geq 0,5$, то влияние очень заметное. На рисунке 4.6 показана зависимость ФПМ от \overline{N} , где $\overline{N} = N/N_{nped}$.



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

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:

$$r_{01} = \frac{2}{\alpha_2}; \qquad r_{02} = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}$$
(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 $k_{_{3\kappa}}$, это отношение диаметра вторичного зеркала к диаметру главного зеркала. Поэтому в первом приближение можно считать $h_2 = k_{_{3\kappa}}$ (в системе Кассегрена) $h_2 = -k_{_{3\kappa}}$ (в системе Грегори).

Угол α_2 определяется по формуле:

$$\alpha_2 = \frac{1 - h_2}{d} \tag{4.5}$$

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 δ .

Из рис.4.16 следует:

$$h_2 = -d + \delta \tag{4.6}$$

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

Из рис.4.26 следует:

$$h_2 = d - \delta \tag{4.7}$$

для системы Грегори.

После расчётов по формулам (4.4 – 4.7) полученные значения радиусов и воздушного промежутка умножается 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 аберрации.

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 2ω можно руководствоваться следующими соображениями: волновые аберрации 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:

$$N_{npe\partial} = \frac{1}{\lambda \cdot k}$$

где:

 λ – длина волны (в мм), *K* – диафрагменное число, *N*_{*пред*} определяется в *лин*/*мм*.

Для частоты $0.5N_{nped}$ задать три значения экранирования: $k_{_{3\kappa}} = 0, k_{_{3\kappa}} = 0.3 k_{_{3\kappa}} = 0.6$ 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 $k_{_{3\kappa}} = 0,3$ и $k_{_{3\kappa}} = 0,6$ 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 аберрациям.

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

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

- 1. Анаберрационная система Кассегрена.
- 2. Анаберрационная система Грегори.
- 3. Условие синусов и изопланатизма.
- 4. Аберрации осевой точки.
- 5. Аберрации узких пучков.
- 6. Аберрации широкого пучка лучей в меридиональном сечении.

- 7. Аберрации широкого пучка лучей в сагиттальном сечении.
- 8. Функция передачи модуляции.
- 9. Число Штреля.
- 10. Влияние экранирования на ФРТ и ФПМ.
- 11. Уравнение асферической поверхности.
- 12. Дифракционно-ограниченные системы.
- 13. Геометрически-ограниченные системы.
- 14. Критерий Релея.
- 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: $\mathbf{F'} = 4000 \text{ мм}$ 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

N⁰	c d	Стрелка по	Толщина по оси	
позиции	CB. $\boldsymbol{\mathcal{V}}_1$	с в. Ø ₁		
1	571	-26,56	57,00	
2	228,4	-9,78	27,00	

Рисунок 4.7. Пример оформления оптической схемы.

7. Варианты заданий для работы

Таблица 4.1

		I				D
Вариант	Тип	<i>f</i> '(мм)	1:k	Экранирование по диаметру	Расстояние между	Расстояние от вершины
	системы			К _{ЭК}	зеркалами	главного зеркала
1		2000	1.6	0.40	1000	до изооражения
1		2500	1.0	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	Кассегрен	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		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	Грегори	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.

1. Задание для работы

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

1.2. Выполнить расчёт схемы контроля главного зеркала.

1.3. Определить технологические показатели вторичного зеркала двухзеркального телескопа.

1.4. Выполнить расчёт схемы контроля вторичного зеркала телескопа.

2. Краткая теория

К технологическим показателям асферических поверхностей относятся:



Рис.5.1. Технологические показатели сплошной асферической поверхности: A_1 – вершинная асферичность; φ_c – крутизна; γ_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 φ_c между касательными к образующей асферической поверхности в её вершине и в зоне светового диаметра.
- 4) Точность асферизации:
 - a) По местным ошибкам отклонение фактической поверхности от расчётной в долях длины волны λ или угловые отклонения нормали к фактической поверхности от расчетной в некоторой зоне.
 - б) По общим ошибкам допуск на коэффициенты уравнения асферической поверхности.
- 5) Асферичность:
 - а) Вершинная (A₁ в мм) наибольшее отступление данной асферической поверхности от соприкасающейся с ней в её вершине сферы, радиус которой (r₀ 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.
 - б) Для кольцевых и внеосевых деталей вместо «вершинной» асферичности вычисляется «сагиттальная» асферичность (A₂ в мм) – наибольшее отступление данной асферической поверхности от соприкасающейся с ней в зоне меньшего светового диаметра сферы, радиус которой (r₂ 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; γ_2 – градиент «сагиттальной» асферичности; φ_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.

в) Асферичность относительно ближайшей сферы для сплошных поверхностей – «трёхточечная» асферичность (a₃ 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.

- а₃ «трёхточечная» асферичность; r₃ радиус ближайшей сферы; y₃ градиент «трёхточечной» асферичности; OTC – образующая асферической поверхности; OKC – образующая «трёхточечной» сферы.
 - г) 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.

а₄ – «четырёхточечная» асферичность; r₄ – радиус ближайшей сферы; y₄ – градиент «четырёхточечной» асферичности; ONTC – образующая асферической поверхности; NKC – образующая «четырёхточечной» сферы; NM = f.

- 6) Градиенты асферичностей (γ) 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:

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

$$tg\varphi_c = \frac{Y_c}{p + q \cdot z_c} \tag{5.1}$$

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:

$$r_2 = \frac{r_0 + q \cdot Z_N}{\cos \varphi_N} \tag{5.2}$$

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

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

где:

$$q = 2f \frac{Y_{M}}{L_{z}}; \qquad 2f = \sqrt{L_{Z}^{2} + L_{Y}^{2}}; \\L_{z} = Z_{C} - Z_{N}; \qquad L_{Y} = Y_{C} - Y_{N}; \\Y_{M} = \frac{Y_{N} + Y_{C}}{2}; \qquad Z_{M} = \frac{Z_{N} + Z_{C}}{2}; \\Ac \phiepu + hocts \ll caruttanbhas on pedensetos kak (puc. 5.2): \\A_{2} = \sqrt{\left(r_{2} \cdot \cos \varphi_{N} - L_{Z}\right)^{2} + Y_{C}^{2}} - r_{2}$$
(5.4)

 $A_{2} = \sqrt{(r_{2} \cdot \cos \varphi_{N} - L_{Z})^{2} + Y_{C}^{2} - r_{2}}$

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

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

где:

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

Градиент «сагиттальной» асферичности равен:

$$\gamma_2 = \arcsin\frac{Y_C}{r_2 + A_2} - \varphi_C \tag{5.6}$$

Градиент «четырёхточечной» асферичности находим по формуле:

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

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

$$OF_{1} = \frac{r_{0}}{\varepsilon + 1}; \qquad OF_{2} = \frac{r_{0}}{\varepsilon - 1}; \\ R = d + OF_{2}; \qquad D_{2} = 2R \sin \sigma_{2}; \\ D_{0} \approx \frac{d_{0} (1 + \varepsilon)}{2\varepsilon}; \qquad F_{1}F_{2} = \frac{2r_{0}\varepsilon}{\varepsilon^{2} - 1};$$

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 (F₂) гиперболической поверхности 1.

Основные формулы:

$$OF_{1} = \frac{r_{0}}{\varepsilon - 1};$$

$$R = d + OF_{2}; \qquad OF_{2} = \frac{r_{0}}{\varepsilon + 1}; \qquad F_{1}F_{2} = \frac{2r_{0}\varepsilon}{\varepsilon_{2} - 1};$$

$$D_{0} \approx \frac{d_{0}(\varepsilon - 1)}{2\varepsilon}; \qquad d \approx OF_{1}; \qquad D_{2} \approx 2R\sin\sigma_{2};$$

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:

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

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

3. Указание по выполнению работы

3.1. При выполнении п. 1.1. для главного зеркала, считая, что D_c (наружный световой диаметр) и уравнение поверхности известны, определить крутизну φ_c , «сагиттальную» асферичность A_2 , градиент «сагиттальной» асферичности γ_2 , радиус ближайшей сферы R_4 и «четырёхточечную» асферичность a_4 (для 10 точек).

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

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

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

4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

4.1. Исходные данные контролируемой системы.

4.2. Технологические показатели главного зеркала.

4.3. Схема контроля главного зеркала с конструктивными данными и аберрациями осевой точки.

4.4. Технологические показатели вторичного зеркала.

4.5. Схема контроля вторичного зеркала с конструктивными данными и аберрациями для осевой точки.

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

5. 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 A₁
- 5. Крутизна *φ*_c
- 6. Градиент асферичности γ_1
- 7. «Сагиттальная» асферичность А₂
- 8. Градиент «сагиттальной» асферичности γ_2
- 9. Радиус ближайшей сферы для сплошной асферической поверхности r₃
- 10. «Трёхточечная» асферичность *a*₃
- 11. Радиус ближайшей сферы для асферической поверхности с отверстием r_4
- 12. «Четырёхточечная» асферичность *a*₄

5. Литература

1. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М., «Машиностроение» 1976.

2. Окатов М.А., Антонов Э.А. и др. Справочник технология-оптика, под ред. Окатова М.А., Спб.: Политехника, 2004.

3. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М., Наука, 1976.







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 удовлетворить возрастающий выпускников И спрос подготовки на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

ЧУРИЛОВСКИЙ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ



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

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

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

Решением Главпромкадра при ВСНХ СССР в 1930 году техникум преобразовали в институт. В.Н. Чуриловского утвердили в должности профессора и заведующего кафедрой теории оптических приборов, которой он руководил 39 лет. С образованием оптического факультета Владимир Николаевич стал его первым деканом и проработал в этой должности с перерывами более 12 лет. Здесь раскрылся его педагогический талант и талант ученого.

Звание профессора В.Н. Чуриловскому было присвоено уже в 1935 году по кафедре теории оптических приборов. В 1947 году он успешно защитил диссертацию на соискание ученой

степени доктора технических наук, исследовав актуальную для теории и практики оптического приборостроения тему: "Введение поверхностей высших порядков в расчеты оптических систем". В 1966 году Владимиру Николаевичу было присвоено почетное звание "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР".

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

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

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

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

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

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

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

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

О СЕБЕ САМОМ

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

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

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

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

Владимир Чуриловский – Учёный и Поэт



Цуканова Галина Ивановна, Бахолдин Алексей Валентинович Специальные разделы прикладной оптики. Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А.

В авторской редакции Компьютерное макетирование

Зав. редакционно-издательским отделом Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99 Подписано к печати Отпечатано на ризографе. Тираж 200 экз. Заказ № А.А. Ярец С.В. Разин Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

