

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

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



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

А.П. Грамматин, Г.Э. Романова

**МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.
АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**



Санкт-Петербург

2008

Грамматин А.П., Романова Г.Э. **Методы проектирования оптических систем. Автоматизация проектирования оптических систем: Методические указания к лабораторным работам.** - СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 63 с.

Методические указания предназначены для студентов 5 курса, обучающихся по специальности «Оптехника», изучающих дисциплины «Автоматизация проектирования оптических систем» и «Методы проектирования оптических систем». Методические указания направлены на выработку практического опыта расчета оптических систем, развитие навыков исследования и анализа качества изображения, а также на более глубокое понимание взаимосвязи параметров оптических систем и характеристик качества изображения.

Рекомендовано к печати Советом факультета оптико-информационных систем и технологий, протокол № 6 от 12 февраля 2008 г.



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

©А.П. Грамматин, Г.Э. Романова, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Лабораторная работа №1 Исследование сферической аберрации третьего порядка	4
Лабораторная работа №2 Исследование волновой сферической аберрации сферического зеркала	7
Лабораторная работа №3 Автоматизированная коррекция в программе САРО	10
Лабораторная работа №4 Определение плоскости наилучшей установки при наличии сферической аберрации третьего и пятого порядка	13
Лабораторная работа №5 Изучение структуры пятна рассеяния при наличии комы	16
Лабораторная работа №6 Исследование комы параболоидального зеркала	19
Лабораторная работа №7 Определение глубины резкости для дифракционно-ограниченной оптической системы	22
Лабораторная работа №8 Расчет склеенного из двух линз компенсатора хроматизма положения	25
Лабораторная работа №9 Основные монохроматические параметры по Г.Г.Слюсареву	27
Лабораторная работа №10 Основные параметры объектива, склеенного из двух линз	29
Лабораторная работа №11 Расчет объектива, склеенного из двух линз	32
Лабораторная работа №12 Расчет линзового проекционного объектива	34
Лабораторная работа № 13 Исследование схем линзовых объективов.....	37
Лабораторная работа №14 Расчет окуляра	39
Лабораторная работа №15 Исследование астигматизма на примере двухзеркального объектива	41
Лабораторная работа № 16 Исправление астигматизма в объективе, состоящем из склейки и одиночной линзы, расположенных на конечном расстоянии	44
Лабораторная работа № 17 Расчет зрительной трубы Галилея.....	47

Лабораторная работа № 18 Расчет зрительной трубы с призмой Пехана	50
Лабораторная работа № 19 Расчет линзовой оборачивающей системы с параллельным ходом лучей	57
Литература	60

Лабораторная работа №1

Исследование сферической aberrации третьего порядка

Цель работы: методом численного анализа выяснить свойства продольной, поперечной и волновой сферической aberrации третьего порядка.

Задачи работы: вывод формул сферической aberrации третьего порядка, анализ зависимости сферической aberrации третьего порядка от положения плоскости установки.

Порядок выполнения

1. Задать оптическую систему согласно индивидуальному заданию. Убедиться, что в системе присутствует только сферическая aberrация. Для этого определить кому, астигматизм и кривизну поля на основании расчета хода лучей.
2. В общем виде поперечную сферическую aberrацию можно описать формулой $\Delta y' = c \cdot A^p$, где A – апертура системы, c – некоторый коэффициент, p – степень. Для этого при некоторой апертуре (радиусе входного зрачка m_1) вычислить поперечную сферическую aberrацию $\Delta y'_1 = c \cdot A_1^p$, после этого изменить апертуру (например, уменьшить в два раза), и снова вычислить $\Delta y'_2 = c \cdot A_2^p$. Прологарифмировав оба выражения, и вычитая одно из другого, получим следующую формулу для вычисления степени:

$$p = \frac{\lg|\Delta y'_1| - \lg|\Delta y'_2|}{\lg A_1 - \lg A_2}.$$

Показатель степени округлить до целого числа.

После этого непосредственной подстановкой в формулу численных значений определить коэффициент c .

Аналогично в выражениях для продольной и волновой сферической aberrации в общем виде $\Delta s' = a \cdot A^k$, $w = b \cdot A^n \lambda^q$, где a , b – некоторые коэффициенты, k , n , q – степени, определить a , b , k , n .

3. Проверить полученные формулы на примере расчета конкретной системы согласно индивидуальному заданию.
4. Вывести на экран пятно рассеяния (требование 28 в САРО). Убедиться, что пятно рассеяния постоянно в пределах всего поля изображения.
5. Путем подбора положения плоскости установки ($DS'Y$ в программе САРО) с помощью расчета хода лучей убедиться, что положение плоскости наилучшей установки (ПНУ) для поперечной сферической aberrации имеет место, когда $\Delta y'_1 = -\Delta y'_4$, где индексы 1, 4 относятся к номерам лучей (1 соответствует краю зрачка, 4 – лучу, идущему на

половине высоты). Проанализировать графики поперечной сферической aberrации. Вывести на экран пятно рассеяния. Определить, во сколько раз уменьшилось пятно рассеяния при введении ПНУ.

6. Смещая плоскость установки, найти положение, при котором волновая aberrация минимальна. Определить, во сколько раз уменьшилась волновая aberrация в плоскости наилучшей установки.
7. Подобрать числовую апертуру, при которой волновая aberrация в плоскости Гаусса $w = 1$. Ввести ПНУ, и убедиться, что при этом $w_{\text{ПНУ}} = 0,25$, а число Штреля $S_f = 0.8$.

Содержание отчета:

1. Схема оптической системы, параксиальные характеристики
2. Определение степеней и коэффициента пропорциональности в формуле поперечной, продольной и волновой сферической aberrации
3. Полученные формулы для продольной, поперечной и волновой сферической aberrации третьего порядка

Контрольные вопросы:

1. Сферическая aberrация, вид пятна рассеяния
2. Формы представления aberrаций: волновая, продольная, поперечная
3. Плоскость Гаусса, плоскость установки
4. Связь смещения плоскости наилучшей установки, продольной сферической aberrации и волновой сферической aberrации.

Варианты заданий

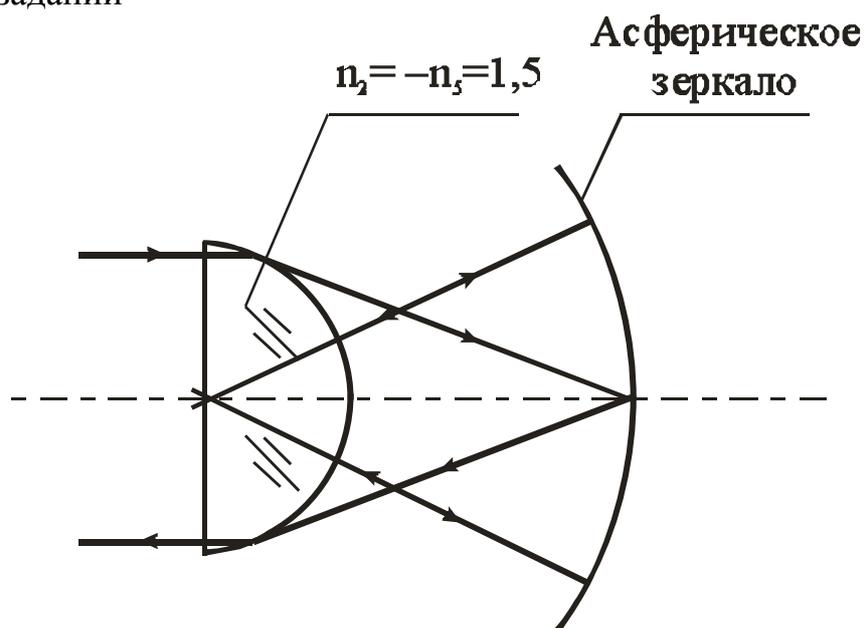


Рис. 1. 1. Схема исследуемой оптической системы

Для всех вариантов радиусы $R_1 = R_5 = \infty$, несферическая поверхность зеркала имеет коэффициент $a_2 = 0,5$ (см. инструкцию к программе SAPO, п.3 «Типы асферических поверхностей и их запись»), $a_2 = 1 - e^2$

№ вар.	$R_2 = R_4$	$-2R_3 = ASF4$	$d_1 = -d_4$	$d_2 = -d_3$	Y_{\max}
1	-30	179.84	30	59.92	1
2	-60	359.68	60	119.84	2
3	-150	899.2	150	299.6	5
4	-90	539.52	90	179.76	3
5	-36	215.808	36	71.904	1.2
6	-43.2	258.97	43.2	86.2848	2,27
7	-86.4	517.94	86.4	172.57	2,88
8	-60.48	362.557	60.48	120.798	2,016
9	-120	719.36	120	239.68	4
10	-480	2877.44	480	958.72	16
11	-720	4316.16	720	4316.16	24
12	-42	251.776	42	83.888	1,4
13	-50.4	302.1312	50.4	100.666	1,68

Числовая апертура в пространстве предметов 0,1, предмет расположен на первой (плоской) поверхности, диафрагма совпадает с третьей (зеркальной) поверхностью.

Лабораторная работа № 2

Исследование волновой сферической aberrации сферического зеркала

Цель работы: исследование aberrационных возможностей сферического зеркала

Задачи работы:

1. Методом численного моделирования получить формулу для волновой сферической aberrации в плоскости наилучшей установки w сферического зеркала, связывающую фокусное расстояние f' , диафрагменное число K и длину волны λ .
2. Получить формулу для вычисления f' по заданным K и λ , при которых обеспечивается выполнение критерия Штреля $S_t = 0.8$
3. Получить формулу для вычисления K по заданным f' и λ , при которых обеспечивается выполнение критерия Штреля $S_t = 0.8$
4. Проверить на численных примерах полученные формулы.

Порядок выполнения работы

Волновая сферическая aberrация оптической системы в случае предмета, расположенного на бесконечно большом расстоянии, зависит от f' , λ и K (относительного отверстия $1:K$). Можно записать в общем виде выражение для волновой aberrации в плоскости наилучшей установки:

$$w = af'^n \lambda^m K^l, \quad (2.1)$$

где a – некоторый коэффициент пропорциональности, l, m, n – некоторые степени.

В процессе выполнения работы необходимо определить степени l, m, n и коэффициент пропорциональности a .

1. Записать сферическое зеркало с заданным фокусным расстоянием и диафрагменным числом. Для некоторой длины волны (например, $\lambda = 0,0005$ мкм) найти волновую сферическую aberrацию.
2. Определить степень зависимости от диафрагменного числа. Для этого вычислить волновую сферическую aberrацию при двух разных диафрагменных числах, а длину волны и фокусное расстояние оставить неизменным. Получим:

$$w_1 = af'^n \lambda^m K_1^l, \quad w_2 = af'^n \lambda^m K_2^l \quad (2.2)$$

где w_1, w_2 – значения волновой aberrации зеркала при диафрагменных числах K_1, K_2 соответственно.

Прологарифмируем выражения (2.2):

$$\lg w_1 = \lg a + n \lg f' + m \lg \lambda + l \lg K_1,$$

$$\lg w_2 = \lg a + n \lg f' + m \lg \lambda + l \lg K_2.$$

Так как коэффициент a , длина волны λ и фокусное расстояние f' в обоих случаях одинаковы, то, вычитая одно из выражений из другого, получим формулу для определения степени l :

$$l = \frac{\lg|w_2| - \lg|w_1|}{\lg K_2 - \lg K_1}$$

Степени m и n найти самостоятельно.

3. Найти коэффициент a .
4. В формуле (2.1) с рассчитанными значениями степеней l , m и n положить $w=1$, что после введения плоскости наилучшей установки обеспечивает $w_{\max} = 0,25$ и, соответственно, $S_t = 0.8$. Преобразовать полученное выражение в формулу для вычисления f' по заданным K и λ , а также в формулу для вычисления K по заданным D (диаметр входного зрачка) и λ
5. Осуществить проверки полученных формул, выполнив расчеты в соответствии с вариантом задания.

Содержание отчета:

1. Габаритный расчет (определение радиуса кривизны и диаметра зеркала)
2. Полученные в работе формулы для вычисления w по заданным f' , K и λ ; для вычисления K по заданным D и λ
3. Таблицы волновой сферической абберации для зеркала с максимально возможным относительным отверстием, при котором еще получается дифракционное качество изображения в плоскости наилучшей установки.

Контрольные вопросы:

1. Что такое сферическая абберация? Формы представления аббераций?
2. Как зависит сферическая абберация зеркала от диафрагменного числа? Фокусного расстояния?
3. Как можно уменьшить сферическую абберацию зеркала при данном относительном отверстии?
4. Рассказать о критерии Релея.

Варианты заданий

Длина волны $\lambda = 0.000546$ мм

№ вар.	f'	K
1	250	5
2	300	6
3	350	7
4	400	8
5	500	5
6	750	7.5
7	800	8
8	1000	10
9	450	5
10	600	7
11	700	6.5
12	850	8

Лабораторная работа № 3

Автоматизированная коррекция в программе SAPO

Цель работы: освоить навыки автоматизированной коррекции

Задачи работы: рассчитать объектив из одной линзы с асферической поверхностью, оценить абберационные возможности однолинзового объектива

Порядок выполнения работы:

1. Задать одиночную линзу (рис. 3.1), плоская поверхность которой обращена к параллельному ходу лучей. При задании линзы можно воспользоваться описанием углами нулевого луча в виде

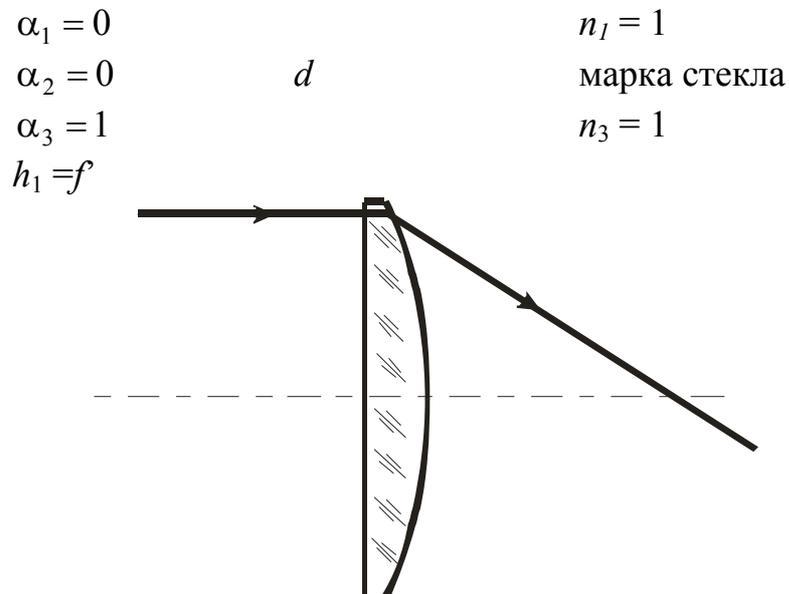


Рис. 3.1 Одиночная линза

2. Рассчитать ход лучей и определить сферическую абберацию.
3. Выполнить автоматизированную коррекцию системы. Для этого задать коррекционные параметры и выбрать корректируемые функции. К числу корректируемых функций могут относиться как параксиальные характеристики (фокусное расстояние, положение плоскости установки, положение зрачков), так и абберации). Заданную линзу исправить на минимум сферической абберации, сохраняя фокусное расстояние, в качестве коррекционного параметра использовать угол нулевого луча α_2 . Коррекцию провести при разных значениях допусков на точность коррекции функций.
4. Определить сферическую абберацию в скорректированной системе, сравнить с исходным значением.

5. Задать плосковыпуклую линзу радиусами кривизны поверхностей. При этом описание выглядит следующим образом

$$\begin{array}{ccc}
 R_1 = 0 & & n_1 = 1 \\
 & d & n_2 = n \\
 R_2 = -f'(n-1) & & n_3 = 1
 \end{array}$$

Показатель преломления n_2 определить с помощью требования 27 САРО.

6. Выполнить автоматизированную коррекцию линзы, используя в качестве коррекционных параметров радиусы поверхностей R_1 , R_2 . Линзу исправить на минимум сферической аберрации, сохраняя фокусное расстояние. Коррекцию провести при разных значениях допусков на точность коррекции функций.
7. В корригированной системе ввести плоскость наилучшей установки (ПНУ): добиться, чтобы значения поперечной сферической аберрации на краю зрачка и на высоте 0,5 зрачка были равны по величине и противоположны по знаку. Сравнить теоретическое значение смещения ПНУ, равное продольной сферической аберрации на высоте 0,866 от максимальной высоты зрачка, и величину смещения, полученное при коррекции.
8. Рассчитать объектив из одной линзы, который может использоваться в качестве объектива для записи на компакт диск. Для этого задать одиночную линзу с фокусным расстоянием $f' = 4.3$ и апертурой $A = 0,45$ (длина волны 650 нм), скорригировать ее на минимум сферической аберрации. Если оптимизация линзы, обращенной плоской стороной к параллельному ходу луча, не дает удовлетворительных результатов, перевернуть линзу, и повторить оптимизацию. Оценить сферическую аберрацию.
9. Исправить неизопланатизм в отдельной линзе, при этом сферическую аберрацию исправлять не надо.
10. Асферизовать первую поверхность линзы, для этого сначала описать сферическую поверхность как несферическую с эксцентриситетом равным нулю.
11. Провести автоматизированную коррекцию, используя в качестве коррекционных параметров радиусы кривизны обеих поверхностей и коэффициент деформации первой поверхности. Корректируемые функции в этом случае – величина неизопланатизма и сферической аберрации на краю зрачка, а также фокусное расстояние линзы.
12. Оценить аберрации полученного однолинзового объектива

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры и характеристики отдельной линзы со сферическими поверхностями до оптимизации и после оптимизации.
2. Параметры и характеристики линзы с одной несферической поверхностью после оптимизации сферической аберрации и комы

Контрольные вопросы:

1. Сферическая аберрация отдельной линзы, ее зависимость от показателя преломления.
2. Применение несферических поверхностей в оптических системах
3. Типы несферических поверхностей

Варианты заданий

№ вар.	f'	K	Марка стекла
1	100	4	ТК16
2	80	3.5	К8
3	50	4	БК10
4	30	2	ТК21
5	75	3	ТК20
6	90	3.5	СТК19
7	60	4	ЛК1
8	110	4.5	СТК7
9	150	4	ТК16
10	170	4	СТК12
11	200	5	БК10
12	150	4	СТК19

Лабораторная работа № 4

Определение плоскости наилучшей установки при наличии сферической aberrации третьего и пятого порядков

Цели работы: методом численного моделирования получить связь сферической aberrации смещения плоскости установки в случае наличия сферической aberrации третьего и пятого порядков

Задачи работы : рассчитать систему из двух склеенных линз и найти положение плоскости наилучшей установки

Порядок выполнения

1. Задать систему из двух склеенных линз углами нулевого луча в виде:

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\ \alpha_2 = 0,5 & d_1 = 10 & n_2 \\ \alpha_3 = 0,3 & d_2 = 5 & n_3 \\ \alpha_4 = 1 & & n_4 = 1 \end{array}$$

Марки стекол выбрать согласно индивидуальному варианту задания. Фокусное расстояние системы $f' = 200$, диафрагменное число $K = 4$.

2. Выполнить автоматизированную коррекцию в монохроматическом свете для длины волны $\lambda_0 = \lambda_e = 0,546$ мкм так, чтобы поперечная сферическая aberrация для луча 1, идущего на край зрачка $m_1 = HMAX$, равнялась нулю $\Delta y'_1 = 0$ и отступление от условия изопланатизма $\eta = 0$.
3. В результате коррекции получится объектив, у которого максимальное значение поперечной сферической aberrации имеет место для луча 3, идущего на высоте $m_3 = \sqrt{0,5}m_1$. Убедиться в этом, выдав на экран графики поперечной сферической aberrации (требование 5 САРО). Диаметр пятна рассеяния при этом $D_{ПР} = 2|\Delta y'_3|$, где $\Delta y'_3$ - поперечная сферическая aberrация для луча 3.
4. Путем подбора смещения плоскости установки $DS'Y$ (САРО) найти смещение плоскости установки, обеспечивающее максимальное значение числа Штреля S_t (требование 36 САРО, первое число в левом верхнем углу опции «Краткие таблицы освещенности для 3 пучков»). Убедиться, что смещение плоскости наилучшей установки (ПНУ) при этом составляет $DS'Y_{ПНУ} \approx \Delta s'_2$, где $\Delta s'_2$ - продольная сферическая aberrация для луча 2, идущего на высоте $m_2 = \sqrt{0,75}m_1$. Найти соотношение между волновой сферической aberrацией для первого луча w_1 ($m_1 = HMAX$) в плоскости Гаусса и наибольшим

значением волновой аберрации в ПНУ $w_{ПНУ}$. Убедиться, что

$$\frac{w_{ПНУ}}{w_1} \cong 0,16$$

5. Найти положение плоскости установки, обеспечивающее минимальное значение пятна рассеяния (поперечной сферической аберрации). Убедиться, что это условие выполняется, когда $\Delta y'_1 = -\Delta y'_3$. Найти положение ПНУ, соответствующее этому условию, с помощью автоматизированной коррекции (требование 11 САРО), задав в качестве параметра $DS'Y$, а в качестве корригируемой функции – условие $\Delta y'_1 + \Delta y'_3 = 0$. При этом таблица корригируемых функций в программе САРО будет выглядеть следующим образом :

№ПУЧ	№ЛУЧ	НОМЕРА ФУНКЦИЙ				ТРЕБ.ЗНАЧ.	ДОПУСКИ
0	1	1	А				0.001
0	1	3	А				
0							

Убедиться, что при этом диаметр пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки $D_{ПНУ} \approx 0,6D_1$, где D_1 – диаметр пятна рассеяния в плоскости Гаусса, а смещение плоскости установки $DS'Y_{ПНУ} \approx 0,42\Delta s'_3$, где $\Delta s'_3$ – продольная сферическая аберрация для 3 луча в плоскости Гаусса.

Содержание отчета:

1. Схема оптической системы, параксиальные характеристики
2. Таблицы и графики аберраций оптической системы после коррекции в плоскости Гаусса.
3. Таблицы и графики аберраций оптической системы после коррекции в плоскости наилучшей установки
4. Соотношения между диаметром пятна рассеяния в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки, волновой сферической аберрацией в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки

Контрольные вопросы:

1. Сферическая аберрация третьего порядка и пятого порядка
2. Вид графика при наличии аберрации третьего порядка и одновременного наличия сферической аберрации третьего и пятого порядка
3. Плоскость Гаусса, плоскость установки
4. Соотношение диаметра пятна рассеяния в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки
5. Соотношение волновой сферической аберрации в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки

Варианты заданий

№ вар.	Марки стекол
1	К8 – ТФ1
2	К8 – ТФ10
3	СТК9 – ТФ10
4	К8 – Ф2
5	БК10 – Ф2
6	ТК16 – ТФ10
7	ТК16 – ТФ4
8	ЛК1 – ТФ1
9	БК4 – ТФ7
10	БК10 – ТФ7
11	ТК20 – ТФ7
12	ТК20 – ТФ4
13	ОК1 – ТФ4
14	СТК3 – ТФ10

Лабораторная работа № 5

Изучение структуры пятна рассеяния при наличии комы

Цель работы: исследовать пятно рассеяния при наличии комы

Задачи работы: На основании расчета хода лучей в псевдодецентрированной образцовой системе определить связи между координатами лучей на зрачке и на изображении при наличии комы

Порядок выполнения:

1. В качестве исследуемой оптической системы использовать параболоидальное зеркало согласно индивидуальному варианту задания. Входной зрачок поместить в переднюю фокальную плоскость. В этом случае параболоидальное зеркало будет свободно, помимо сферической аберрации, и от астигматизма, но будет обладать комой и кривизной изображения.
2. Сместить плоскость изображения $DS'Y$ на величину $DS'Y = z'_m = z'_s$, для края поля (для пучка 1 $\omega = \omega_{\max}$).
3. Убедиться, что при смещении плоскости установки кома, вычисляемая по формуле $k_1 = \frac{\Delta y'_{1,1} + \Delta y'_{1,8}}{2}$, не изменяется. Здесь k_1 – кома для пучка 1, $\Delta y'_{1,1}$, $\Delta y'_{1,8}$ - поперечная аберрация для пучка 1 для лучей, идущих на верхний и нижний край зрачка соответственно.
4. Ввести дополнительную фиктивную плоскость, совпадающую с плоскостью изображения и разделяющую две среды с показателем преломления $n_2 = n_3 = -1$.
5. Совместить плоскость установки с фиктивной плоскостью (то есть с плоскостью изображения), для этого задать $S'Y = 0$. Проверить с помощью расчета хода луча (требование 1 САРО), что аберрации системы не изменились.
6. Ввести вторую фиктивную плоскость, совместив ее с плоскостью входного зрачка.
7. Для более контрастного отображения графики в программе САРО задать дополнительные длины волн $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_0 = 0,0005$ мм. При этом пятно рассеяния, выдаваемое по требованию 28 САРО, будет максимально контрастным.
8. Для определения соотношений между координатами на входном зрачке и изображении необходимо рассчитать лучи, пересекающие входной зрачок под углом 45° к осям координат (лучи 41, 49 в программе САРО). Такая возможность имеется в программе САРО для нецентрированных систем.

9. Задать децентрировку зеркала по оси Y на величину $DY = 0$, т.е. псевдодецентрированное зеркало. Для этого в САРО в столбце «Сдвиги поверхностей» последовательно в несколько строк записать: 2 (первая строка, обозначает номер поверхности), Y (вторая строка, направление сдвига), 0 (третья строка, величина сдвига).
10. Вывести на экран пятно рассеяния (требование 28 САРО) для пучка 1 (край поля). Это пятно рассеяния при наличии комы третьего порядка.
11. Рассчитать световые диаметры (требование 21 САРО) и установить на первой поверхности (входном зрачке) непрозрачный экран (НПРЭ), диаметр которого на 1 мм меньше светового диаметра первой поверхности. Вывести пятно рассеяния и убедиться, что при обегании лучом входного зрачка по кольцу шириной 1 мм в плоскости изображения образуется окружность.
12. Путем расчета хода луча (требование 1 САРО) для пучка 1 определить координаты пересечения лучей с плоскостью изображения и соотношения между ними:

$\frac{k_m}{k_s}$, DY'_C , $\frac{DY'_C}{DY'_{41}}$, а также угол огибающей θ (см. рис. 5.1)

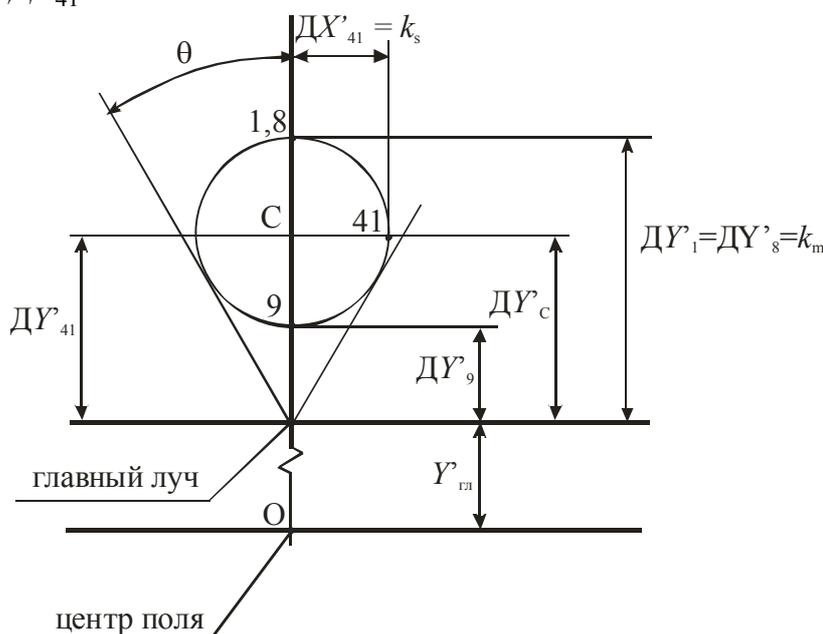


Рис. 5.1 Пятно рассеяния при наличии комы

13. Уменьшить непрозрачный экран на 5 мм. Вывести на экран пятно рассеяния и убедиться, что при этом появляется вторая окружность. Повторить вычисления п.12

Содержание отчета:

1. Габаритный расчет, aberrации параболического зеркала
2. Схема хода лучей и расшифровка обозначений
3. Вид пятна рассеяния, соотношения

Контрольные вопросы:

1. Кома третьего порядка.
2. Вид пятна рассеяния
3. Сагиттальная и меридиональная кома.
4. Способы исправления комы.

Варианты заданий

№ вар.	f'	K	$tg\omega$
1	1000	5	0.01
2	1000	4	0.01
3	800	4	0.01
4	750	5	0.02
5	750	3	0.01
6	500	4	0.02
7	500	5	0.01
8	600	6	0.02
9	600	5	0.02
10	800	4	0.03
11	800	5	0.03
12	400	4	0.03

Лабораторная работа № 6

Исследование комы параболоидального зеркала

Цель работы: исследование абберрационных возможностей параболоидального зеркала в области, близкой к оптической оси.

Задачи работы:

1. Методом численного моделирования получить формулы для геометрической комы k и комы в волновой мере w_k , связывающие фокусное расстояние f' , диафрагменное число K , тангенс полевого угла $tg\omega$ и длину волны света λ (для w_k)
2. Определить величину w_k , при которой число Штреля $S_t = 0.8$
3. Получить формулу для вычисления f' по заданным K , $tg\omega$ и λ , при которых обеспечивается выполнение критерия Штреля $S_t = 0.8$.
4. Получить формулу для вычисления K по заданным f' , $tg\omega$ и λ при $S_t = 0.8$.
5. Проверить на численных примерах полученные формулы.

Порядок выполнения:

1. Геометрическая кома в меридиональном сечении может быть представлена в виде:

$$k = af'^l K^m tg^p \omega \quad (6.1)$$

где a – некоторый коэффициент.

Выражение для комы в волновой мере будет содержать дополнительно длину волны λ :

$$w_k = bf'^s K^t tg^u \omega \lambda^r \quad (6.2)$$

2. Записать параболическое зеркало с заданным фокусным расстоянием, диафрагменным числом и угловым полем. Рассчитать ход лучей и определить кому k по формуле:

$$k = \frac{\Delta y'_{1,1} + \Delta y'_{1,8}}{2} \quad (6.3)$$

где $\Delta y'_{i,j}$ – поперечная абберрация луча с номером j в пучке с номером i (нумерация лучей и пучков в формуле приведена в обозначениях, принятых в программе САРО, пучок 1 соответствует крайнему пучку, а лучи 1 и 8 соответственно верхнему и нижнему краю зрачка).

Определить w_k по формуле

$$w_{1,k} = \frac{w_{1,1} - w_{1,8}}{2},$$

где $w_{1,k}$ - волновая кома для пучка 1 ($\omega_1 = \omega_{\max}$), $w_{i,j}$ волновая абберрация луча с номером j для пучка с номером i ($i = 1,8$ соответствуют верхнему и нижнему краю зрачка)

3. Сместить плоскость установки $DS'Y$ (САРО) на некоторую величину и убедиться, что ни геометрическая кома, ни волновая кома не зависят от смещения плоскости установки
4. Изменить фокусное расстояние параболического зеркала f' , например, в 2 раза и повторить вычисления k и $w_{1,k}$ при сохранении диафрагменного числа K .

Степень l можно вычислить по формуле:

$$l = \frac{\lg|k_2| - \lg|k_1|}{\lg|f'_2| - \lg|f'_1|}$$

Степень s :

$$s = \frac{\lg|w_{k,2}| - \lg|w_{k,1}|}{\lg|f'_2| - \lg|f'_1|}$$

Остальные степени в формулах (6.1) и (6.2) определить аналогично.

5. Рассчитать на основании полученных данных коэффициенты a (в формуле (6.1)) и b (в формуле (6.2)).
6. Путем подбора, изменяя величину $tg\omega$, найти величину w_k , при которой $S_t = 0.8$. Число Штреля в программе САРО определить с помощью требования 36. Обратит внимание, что площадка с максимальной освещенностью сместилась относительно главного луча. Подставить полученное значение w_k , обеспечивающее $S_t = 0.8$, в формулу (6.2) и преобразовать ее, получив в правой части уравнения сначала f' , а затем K и $tg\omega$.
7. Осуществить проверку полученных формул, выполнив расчеты в соответствии с вариантом задания.

Содержание отчета:

1. Габаритный расчет, абберрации параболического зеркала
2. Полученные формулы для волновой и геометрической комы.
3. Формулы для вычисления f' по заданным K , $tg\omega$ и λ и для вычисления K по заданным f' , $tg\omega$ и λ при $S_t = 0.8$.

Контрольные вопросы:

1. Кома третьего порядка.
2. Неизопланатизм, его связь с комой.
3. Способы исправления комы.

Варианты заданий

№ вар.	f'	K	$tg\omega$
1	1000	5	0.01
2	1000	4	0.01
3	800	4	0.01
4	750	5	0.02
5	750	3	0.01
6	500	4	0.02
7	500	5	0.01
8	600	6	0.02
9	600	5	0.02
10	800	4	0.03
11	800	5	0.03
12	400	4	0.03

Лабораторная работа № 7

Определение глубины резкости для дифракционно-ограниченной оптической системы

Цель работы: проверить формулу Марешаля для глубины резкости и оценить точность, с которой рассчитывается число Штреля в комплексе SAPO.

Задачи работы: методом численного моделирования получить формулу для вычисления глубины резкости дифракционно-ограниченной системы.

Порядок выполнения:

Глубина резкости – величина смещения плоскости установки от плоскости Гаусса в идеальной оптической системе, при которой число Штреля составляет $S_t = 0,8$ [1,3]. Глубину резкости $DS'Y$ можно описать выражением:

$$DS'Y = b\lambda^m A'^l \quad (7.1),$$

где λ – длина волны света,

A' – числовая апертура в пространстве изображений $A' = n' \sin \sigma'$, n – показатель преломления среды, в которой расположено изображение, σ' – апертурный угол в пространстве изображения.

b – некоторый коэффициент пропорциональности,

l, m – степени

В работе необходимо определить степени l, m и коэффициент b , входящие в формулу глубины резкости.

В качестве тестовой оптической системы при выполнении работы использовать параболоидальное зеркало с фокусным расстоянием и относительным отверстием согласно индивидуальному заданию.

1. Известно, что параболоидальное зеркало создает дифракционно – ограниченное (идеальное) изображение для осевой точки бесконечно удаленного предмета. У параболоидального зеркала из-за невыполнения закона синусов (условия изопланатизма) координата луча на входном зрачке $m = HMAX \neq f' \cdot A'$. Поэтому высоту луча на входном зрачке (величину $HMAX$), соответствующую заданной апертуре, следует найти подбором, приняв во внимание, что в результате расчета aberrаций, например, в программе SAPO, выдаются тангенсы угла луча с осью $\text{tg} \sigma'$. Первоначально необходимо выполнить расчет хода луча, задав высоту луча на входном зрачке $HMAX = f' \cdot A'$, а затем осуществить подбор высоты $HMAX$, при котором $\sin \sigma'$ равен заданной апертуре.

2. Убедиться, что волновая aberrации для крайнего луча осевого пучка $w(0) = 0$, а число Штреля $S_t = 1$.
3. При выбранной длине волны λ_1 найти смещение плоскости установки $DS'Y_1$, при котором число Штреля $S_t = 0,8$. Для другой длины волны λ_2 при той же апертуре определить смещение плоскости установки $DS'Y_2$, при котором число Штреля $S_t = 0,8$.

Подставив рассчитанные значения в выражение (7.1) и прологарифмировав, получим:

$$\lg DS'Y_1 = \lg b + m \lg \lambda_1 + l \lg A', \quad \lg DS'Y_2 = \lg b + m \lg \lambda_2 + l \lg A'$$

Вычитая из одного выражения другое, после преобразований можно получить:

$$m = \frac{\lg |DS'Y_1| - \lg |DS'Y_2|}{\lg \lambda_1 - \lg \lambda_2}$$

Аналогично вычислить степень l :

$$l = \frac{\lg |DS'Y_1| - \lg |DS'Y_2|}{\lg A'_1 - \lg A'_2}$$

Все вычисления и подбор производить с точностью до трех значащих цифр. Степени округлить до целых значений.

Определение степеней выполнить для двух значений длины волны и апертуры A' .

4. Определить коэффициент пропорциональности b .
5. Вычислить по формуле глубину резкости для нескольких значений длины волны $\lambda_1 = 546 \text{ нм} = 0,000546 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 10,6 \text{ мкм} = 0,0106 \text{ мм}$, и апертуры $A' = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$;
6. Определить относительную погрешность величины $DS'Y$, вычисленную по сравнению с формулой Марешаля:

$$DS'Y = 0,5\lambda / A'^2$$

Содержание отчета:

1. Определение степеней и коэффициента пропорциональности в формуле глубины резкости,
2. Вычисления глубины резкости для разных значений длины волны и апертуры.
3. Оценка относительной погрешности величины глубины резкости.

Контрольные вопросы:

1. Глубина резкости
2. Число Штреля
3. Плоскость Гаусса, плоскость установки

Варианты заданий

№ вар.	f	K
1	1000	5
2	1500	4
3	800	4
4	700	5
5	600	3
6	1200	4
7	1300	5
8	900	6
9	1000	5
10	700	4
11	400	5
12	500	4

Лабораторная работа №8

Расчет склеенного из двух линз компенсатора хроматизма положения

Цель работы: изучить способ коррекции хроматической аберрации с использованием ахроматических пар стекол.

Задачи работы: рассчитать двухлинзовый компенсатор хроматизма положения одиночной линзы, выполненный из стекол с близкими показателями преломления, но различными дисперсиями.

Порядок выполнения

1. Рассчитать аберрации осевой точки плоско-выпуклой линзы с фокусным расстоянием $f = 100$ мм, диафрагменным числом $K = 5$ из стекла в соответствии с индивидуальным вариантом задания (табл. 8.1). Длины волн $\lambda_0 = 0,546$ мкм (e), $\lambda_1 = 0,643$ мкм (C'), $\lambda_2 = 0,480$ мкм (F'). Определить параксиальный хроматизм положения $(S'_{F'} - S'_{C'})_0$
2. На малом расстоянии от линзы установить две склеенные между собой плоскопараллельные пластины, толщины которых подобрать конструктивно. Материал пластин выбрать в соответствии с вариантом задания (табл. 8.2). В этой таблице приведены пары стекол с близкими показателями преломления для линии e, но с различными дисперсиями. Определить значения показателей преломления для этих стекол для всех трех длин волн (требование 27 в САРО).
3. Выполнить автоматизированную коррекцию хроматизма положения, используя в качестве параметра радиус склеенной поверхности пластины.
4. Рассчитать аберрации для точки на оси и убедиться, что сферическая аберрация и неизопланатизм остались практически неизменными (за исключением вар. 6 из табл. 8.2), а хроматизм положения – исправлен.
5. Сравнить величины вторичного спектра $(S'_{F'} - S'_{e})_0$ для всех рассчитанных вариантов, убедиться, что он изменяется в узких пределах, за исключением вар.5 и 6 из табл. 8.1.

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры исходной системы
2. Аберрации осевого пучка исходной системы.
3. Конструктивные параметры системы после коррекции и аберрации осевого пучка.
4. Расчет вторичного спектра.

Контрольные вопросы

1. Хроматические аберрации, причина их возникновения.
2. Условие ахроматической коррекции системы из двух тонких линз. Его вывод. Подбор стекол.
3. Вторичный спектр. Условия его исправления.

Варианты заданий

Табл. 8.1

№ вар.	Марки стекол
1	K8
2	БК10
3	СТК19
4	ЛК1
5	CaF ₂
6	LiF
7	TK22
8	Ф1
9	ТФ10
10	ТФ5
11	ТБФ9

Табл. 8.2

№ вар.	Марки стекол
1	Ф1 – ТК16
2	ТФ4–СТК19
3	ТФ8–СТК12
4	ТФ8–СТК7
5	ТФ10–ТБФ9
6	ЛФ9–ТК23
7	ТФ4–СТК19
8	ЛФ9–ФК4
9	ТФ10–ТБФ9
10	ТФ8–СТК12
11	Ф1 – ТК16

Лабораторная работа № 9

Основные монохроматические параметры по Г.Г.Слюсареву

Цель работы: изучение основных параметров тонкой линзы

Задача работы: вычисление коэффициентов, связывающих основные параметры тонкой линзы P_0 , a и W_0 для стекол видимого диапазона и материалов, используемых в двух диапазонах инфракрасной области спектра (3 – 5 мкм и 8 – 14 мкм).

Порядок выполнения

Г.Г. Слюсарев установил [1,2], что между основными параметрами одиночной бесконечно тонкой линзы P , W , определяющими соответственно сферическую aberrацию $\Delta S'_{III}$ и отступление от условия изопланатизма η_{III} третьего порядка для предмета, расположенного на бесконечности и зрачка, совпадающего с линзой, существует следующая зависимость:

$$P = P_0 + a(W - W_0)^2 \quad (9.1)$$

В свою очередь основные параметры связаны с $\Delta S'_{III}$ и η_{III} следующим образом

$$P = -2\Delta S'_{III} f' / m^2 \quad (9.2)$$

$$W = 2\eta_{III} (f' / m)^2, \quad (9.3)$$

где m – радиус входного зрачка, f' – фокусное расстояние линзы

Величина P_0 в сильной степени зависит от показателя преломления материала, из которого выполнена линза, а величины a и W_0 изменяются в незначительных пределах, подтверждением чего и является целью данной работы. Задачей работы является определение значений P_0 , a и W_0 для стекол видимого диапазона и материалов, используемых в двух диапазонах инфракрасной области спектра (3 – 5 мкм и 8 – 14 мкм).

1. С помощью программного комплекса САРО, используя автоматизированную коррекцию и расчет данных о ходе луча [3] определить величину P_0 , соответствующую минимуму сферической aberrации. Для этого необходимо задать исходную линзу и минимизировать ее сферическую aberrацию. Рекомендуемые исходные значения конструктивных параметров: $\alpha_1 = 0$, $\alpha_3 = 1$, $d_1 = 0,5$, $f' = 100$. Радиус входного зрачка взять $m = 10$ мм, тогда диафрагменное число $K = 5$, при этом aberrации высшего порядка пренебрежимо малы. Параметр α_2 будет коррекционным, а его исходное значение можно выбрать произвольно в диапазоне от 0 до 1. В качестве корригируемой функции задать поперечную сферическую aberrацию на краю зрачка.

2. Выполнив автоматизированную коррекцию, необходимо рассчитать aberrации полученной линзы, а затем, пользуясь приведенными формулами (9.2), (9.3), рассчитать значения P_0 и W_0 .
3. Для определения коэффициента a в формуле (9.1) изменить произвольно параметр α_2 (для получения приемлемой точности это изменение должно составлять несколько десятых долей), рассчитать aberrации полученной линзы, вычислить по формулами (9.2) и (9.3) значения P , W . Далее из формулы (9.1) найти коэффициент a .

Расчеты провести для двух значений показателя преломления в видимой области спектра и по одному показателю в ИК областях спектра в соответствии с вариантом задания. Основная длина волны для видимого диапазона e , для первого ИК диапазона (3 – 5 мкм) 4 мкм и для второго ИК диапазона (8 – 14 мкм) 10.6 мкм

Содержание отчета

1. Расчет основных параметров P_0 тонкой линзы, для четырех значений показателя преломления
2. Определение коэффициента a и параметра W_0 .

Контрольные вопросы:

1. Сферическая aberrация третьего порядка
2. Основные параметры тонкой линзы

Варианты заданий

№ вар.	Показатели преломления		
	видимый диапазон	ИК диапазон	
		3 – 5 мкм	8 – 14 мкм
1	1,4; 2,0	1,35 (LiF)	2,4 (ZnSe)
2	1,6; 2,0	2,43 (ZnS)	2,6 (ИКС29)
3	1,3; 1,5	1,35 (LiF)	2,77 (ИКС25)
4	1,7; 2,0	3,42 (Si)	4,0 (Ge)
5	1,4; 1,6	4,02 (Ge)	2,6 (ИКС29)
6	1,5; 1,7	1,35 (LiF)	2,77 (ИКС25)
7	1,4; 1,8	3,42 (Si)	2,4 (ZnSe)
8	1,4; 1,9	2,43 (ZnS)	2,77 (ИКС25)
9	1,5; 2,0	4,02 (Ge)	2,6 (ИКС29)
10	1,8; 1,9	3,42 (Si)	4,0 (Ge)
11	1,6; 2,0	2,43 (ZnS)	2,6 (ИКС29)
12	1,8; 2,0	4,02 (Ge)	2,77 (ИКС25)

Лабораторная работа № 10

Основные параметры объектива, склеенного из двух линз

Цель работы: определение значений коэффициентов, связывающих основные параметры склеенного объектива.

Задачи работы: найти коэффициенты, связывающие основные параметры склеенного объектива для нескольких комбинаций стекол

Порядок выполнения:

Слюсарев Г.Г. установил [1,2], что между основными параметрами P и W объектива, склеенного из двух линз, при постоянном хроматическом параметре C ($C = \frac{S'_{F'} - S'_{C'}}{f'}$), предмете, расположенном на бесконечности, и входном зрачке, совпадающем с первой поверхностью, существует такая же зависимость, как и для отдельной линзы (см. предыдущую лабораторную работу):

$$P = P_0 + a(W - W_0)^2 \quad (10.1)$$

Величина P_0 зависит от комбинации стекол и параметра C , а величины a и W_0 для любой комбинации стекол, предусмотренной ГОСТ3514 – 93, практически постоянны. В лабораторной работе следует использовать комбинации стекол в соответствии с индивидуальным вариантом задания.

1. Задать исходную систему с помощью углов нулевого луча: $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0,5$, $\alpha_3 = 0,3$, $\alpha_4 = 1$. Фокусное расстояние принимаем равным $f' = 100$. Толщины линз полагаем минимальными, поскольку теоретические положения Слюсарева Г.Г. получены при толщинах, равных нулю. Толщину флинтовой линзы можно принять равной 0,1 мм, а кроновой – 2,5 мм. Если в процессе выполнения работы возникнут засечки, необходимо будет увеличить толщину кроновой линзы.
2. Задать положение зрачка на первой поверхности, угловое поле: $\sin \omega = 0,05$, радиус зрачка $H_{MAX} = 10$ мм. Задать длины волн: основная $\lambda_0 = D$, $\lambda_1 = C$, $\lambda_2 = F$. После окончания работы это позволит сопоставить результаты с таблицами [4].
3. В качестве коррекционных параметров использовать углы нулевого луча α_2 и α_3 , а в качестве корригируемых функций – абберации третьего порядка: поперечную сферическую абберацию $Y'(0)$ и хроматизм положения $S'(2-1)$ [3]. Для этого в программе SAPO необходимо задать номер пучка – «0», номер луча «0», а номера функций – 1 и 6 соответственно. Расчет будем выполнять для основного параметра $C = 0$, т.е. заданное значение

$S'(2-1) = 0 \pm 0,0001$. Заданное значение поперечной сферической аберрации должно быть невыполнимым, при этом в процессе коррекции программа максимально приблизится к невыполнимому значению, т.е. достигнет экстремальной точки, соответствующей значению P_0 . Рекомендуется задать положительное значение поперечной сферической аберрации третьего порядка, например, $Y'(0) = 1 \pm 0,001$.

4. После выполнения автоматизированной коррекции (требование 11 в программе САРО) осуществить расчет хода лучей и проанализировать полученные результаты. Для этого определить продольную сферическую аберрацию $\Delta S'_{III}$ и неизопланатизм η_{III} третьего порядка по формулам:

$$\Delta S'_{III} = 4\Delta S'_3 - \Delta S'_1, \quad (10.2)$$

$$\eta_{III} = 4\eta_3 - \eta_1, \quad (10.3)$$

где индексы 1 и 3 относятся к номерам лучей (1 соответствует лучу, идущему на краю зрачка на высоте $m = m_1$, 3 – лучу, идущему на высоте $m_3 = \sqrt{0,5m_1}$) [1,3].

5. Вычислить параметры P_0 и W_0 :

$$P_0 = -2\Delta S'_{III} f' / m^2, \quad (10.4)$$

$$W_0 = 2\eta_{III} (f' / m)^2. \quad (10.5)$$

Сравнить вычисленные значения P_0 с величинами в таблицах [4] и оценить точность. Для определения коэффициента a рассчитать объектив с параметром $P > P_0$, т.е. задать по-прежнему $S'(2-1) = 0$, а $Y'(0) = -0,1$. Повторить расчеты по формулам (10.2) и (10.3), из формул (10.4) и (10.5) находим P и W . На основании формулы (10.1):

$$a = \frac{P - P_0}{(W - W_0)^2} \quad (10.6)$$

Поменять кроновую и флинттовую линзу местами и повторить расчеты сначала. Первое положение по терминологии Слюсарева Г.Г. называется «крон впереди», второе – «флинт впереди».

Содержание отчета

1. Расчет основных параметров склеенного объектива, значения аберраций
2. Определение коэффициента a и параметров P_0, W_0 .

Контрольные вопросы:

1. Сферическая аберрация третьего порядка
2. Неизопланатизм третьего порядка.
3. Основные параметры тонкого объектива

Варианты заданий

№ вар	Марки стекол
1	К8 – ТФ4
2	К8 – ТФ2
3	К8 – Ф4
4	ТК2 – ТФ2
5	ТК16 – ТФ3
6	ТК21 – ТФ5
7	БК6 – ТФ7
8	ТК16 – ТФ2
9	БК6 – ТФ10
10	ЛК6 – ТФ5
11	СТК3 – ТФ3

Лабораторная работа №11

Расчет объектива, склеенного из двух линз

Цель работы: научиться использовать при расчете основные параметры P , W , C , закрепление теоретического материала,

Задачи работы: рассчитать двухлинзовый склеенный объектив с заданными величинами сферической aberrации $\Delta s'$, отступлением от условия изопланатизма η (комы) и исправленным хроматизмом положения, используя основные параметры P , W , C .

Порядок выполнения работы:

Основные параметры P , W , C связаны с величиной сферической aberrации $\Delta s'$, неизопланатизмом η и хроматизмом положения $\Delta S'_{F'-C'} = S'_{F'} - S'_{C'}$ выражениями:

$$P = -2 \frac{f'}{m^2} \Delta s'$$

$$W = 2 \left(\frac{f'}{m} \right)^2 \eta,$$

$$C = \frac{S'_{F'} - S'_{C'}}{f'}$$

В работе следует рассчитать объектив с заданными величинами сферической aberrации $\Delta s'$, отступлением от условия изопланатизма η (кома) и исправленным хроматизмом положения. Следовательно, $S'_{F'} - S'_{C'} = 0$, параметр $C = 0$

В склеенном компоненте – два свободных параметра для исправления aberrаций, в качестве третьего параметра (для исправления хроматизма положения) используется подбор пар стекол [2].

1. Для выбора пары стекол необходимо рассчитать величину P_0 . По рекомендации Слюсарева Г.Г. [2]:

$$P_0 = P - 0.85(W - 0.14)^2$$

Используя таблицы [4], по величинам P_0 и C подобрать марки стекол.

2. С помощью программы САРО (требование 7) рассчитать склеенный объектив [3]. Рассчитать aberrации осевого пучка полученного объектива. Выполнить автоматизированную коррекцию полученного объектива, при этом в программе САРО использовать в качестве параметров оптимизации углы нулевого луча.
3. Добиться исправления хроматизма положения и нужных величин сферической aberrации и неизопланатизма на краю зрачка.

Содержание отчета:

1. Расчет основных параметров склеенного объектива
2. Данные о полученном в результате расчета объективе (до оптимизации и после коррекции): радиусы кривизны, толщины, марки стекол и таблицы aberrаций осевого пучка лучей для основной и двух дополнительных длин волн.
3. Чертеж объектива.

Контрольные вопросы:

1. Сферическая aberrация.
2. Хроматические aberrации, причина появления хроматических aberrаций. Способы исправления.
3. Понятие неизопланатизма. Связь неизопланатизма с комой.
4. Описание системы радиусами и углами нулевого луча.
5. Основные параметры P , W , C
6. Объяснить отличие полученных aberrаций после расчета до оптимизации от желаемых величин aberrаций.

Варианты заданий

№ вар.	f' , мм	K	$\Delta s'$, мм	η , %
1	100	5	-0.2	0.5
2	120	4	0.5	-0.5
3	130	4.5	-0.3	0.6
4	140	5	0.4	-0.6
5	150	4	0.5	0.3
6	200	6	0.7	-0.3
7	210	7	-0.4	0.4
8	220	6	0.2	-0.4
9	150	5	0.2	0.2
10	110	4	0.1	-0.2
11	250	6	-0.3	0.7
12	300	7	0.35	-0.7
13	170	6,5	0.4	0.25
14	210	5	0.3	-0.25
15	160	5	0.2	0.35

Лабораторная работа №12

Расчет линзового проекционного объектива

Цель работы: научиться использовать при расчете проекционного объектива основные параметры P , W , C , закрепление теоретического материала,

Задачи работы: рассчитать двухлинзовый склеенный объектив с заданными величинами сферической аберрации, комы, исправленным хроматизмом и заданным линейным увеличением.

Порядок выполнения работы:

1. По заданной величине сферической аберрации и неизопланатизма найти величины P и W . Для компонента, работающего с линейным увеличением V :

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} V_s P \sigma'^2,$$

$$\eta = \frac{1}{2} \sigma'^2 (W + tP)$$

где t – положение зрачка, σ' – задний апертурный угол (в радианах), $\sigma' = \sigma/V$. В работе взять расстояние до предмета $s = -100$ мм, переднюю апертуру $\sin \sigma_A = 0.05$, неизопланатизм $\eta = 0.2\%$. Апертурная диафрагма расположена на компоненте (рис. 12.1)

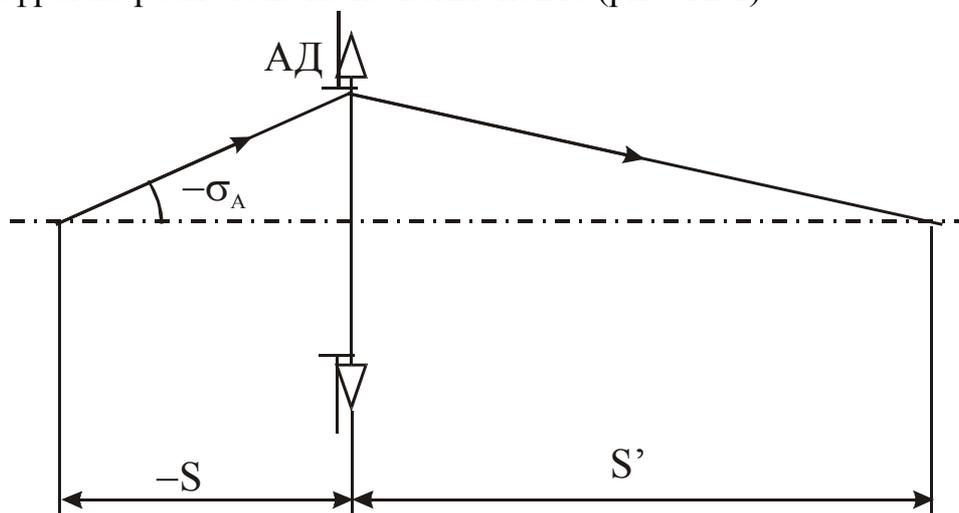


Рис. 12.1 Проекционный объектив

2. Фокусное расстояние компонента можно найти, пользуясь формулой:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s}$$

3. Основные параметры компонента P , W связаны с величинами P , W [5]:

$$P = \frac{1}{(1-V)^3} \{P - 4WV + V(1-V)[(2+\pi)2V + 1]\}$$

$$W = \frac{1}{(1-V)^2} \{W - V(1-V)[2 + \pi]\}$$

где $\pi = \sum \frac{\varphi_i}{n_i}$, φ_i – оптические силы компонентов в составе системы, n_i –

показатель преломления. Для большинства оптических систем, работающих в видимой области, $\pi \approx 0.7$.

4. В качестве рассчитываемой оптической системы выбрать систему, состоящую из склейки и отдельной линзы (рис. 12.2).

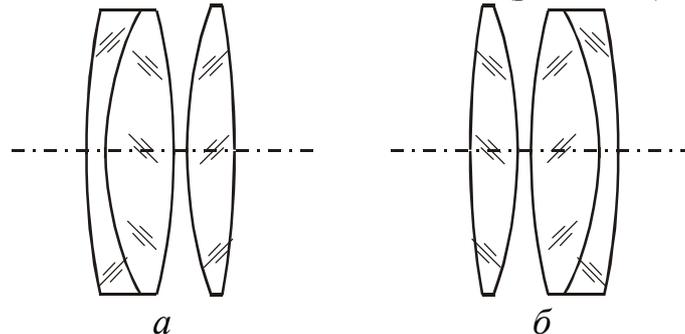


Рис. 12.2 Склеенный компонент с линзой (два варианта расположения)

Компонент обладает достаточным количеством свободных параметров для исправления aberrаций, поэтому стекла можно выбирать произвольно.

Предпочтительны стекла: К8, БК10, ТК16, СТК19, СТК3;
ТФ1, ТФ2, ТФ4, ТФ10, Ф2, Ф4;

5. Вычислив основные параметры, рассчитать компонент, состоящий из линзы и склейки с помощью программы САРО.
6. Рассчитать aberrации осевого пучка объектива. При необходимости провести оптимизацию полученного объектива.

Содержание отчета:

1. Габаритный расчет компонента
2. Расчет основных параметров компонента.
3. Параметры и характеристики объектива, полученного в результате первоначального расчета. Таблицы и графики aberrаций осевого пучка.
4. Параметры и характеристики объектива после оптимизации. Таблицы и графики aberrаций.

Контрольные вопросы

1. Сферическая aberrация и хроматизм положения компонента, работающего с конечного расстояния.
2. Возможности aberrационной коррекции компонента из склейки и отдельной линзы. Подбор стекол.

3. Описание системы радиусами и углами нулевого луча в случае конечного расстояния до предмета.
4. Объяснить отличие полученных aberrаций после расчета до оптимизации от желаемых величин aberrаций.

Варианты заданий

№ вар.	V	$\Delta s'$, мм
1	-0.5	0.2
2	-0.6	0.2
3	-0.7	0.3
4	-0.8	0.3
5	-0.8	0.4
6	-0.9	0.4
7	-1	0.5
8	-1.2	0.5
9	-1.5	0.2
10	-0.4	0.3
11	-1.1	0.4
12	-1.15	0.3
13	-0.85	0.25
14	-0.75	0.3
15	-0.65	0.2

Лабораторная работа № 13 Исследование схем линзовых объективов

Цель работы: закрепление теоретического материала, развитие навыков расчета оптических систем, сравнение коррекционных возможностей простейших объективов из тонких линз.

Задачи работы: расчет различных схем простых компонентов (до 4 линз), сравнение aberrаций и коррекционных возможностей.

Порядок выполнения:

1. Рассчитать несколько вариантов схем: простую склейку (рис. 13а), склейку с линзой – склейкой вперед или линзой вперед (рис. 13б, в), тройную склейку (рис. 13г), две склейки (рис. 13д).

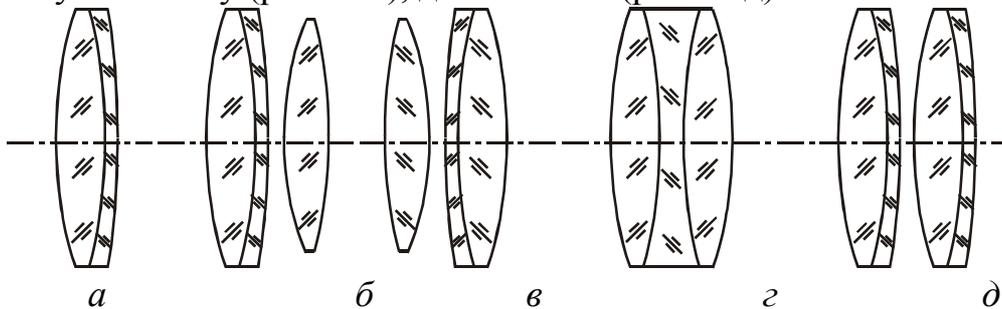


Рис. 13.1 Варианты схем тонких компонентов

Каждую комбинацию рассчитывать в двух вариантах: из сочетания стекол К8 – ТФ1 и стеклол СТК19 – ТФ10. Исходные данные для коррекции получить с помощью требования 7 программы SAPO, задав для варианта рис.13.1а $P = W = 0$, а для остальных вариантов дополнительно $C = 0$. Длины волн $e, C' F'$.

2. Осуществить автоматизированную коррекцию (требование 11 SAPO) сферической aberrации и неизопланатизма на краю отверстия $m_1 = m_{\max}$ (луч 1) для варианта рис.13.1а. Для вариантов Рис.13.1б, в, д дополнительно скорригировать хроматизм положения и сферическую aberrацию на зоне апертуры (луч 3 $m_3 = \sqrt{0,5}m_1$). Для варианта рис.13.1г скорригировать дополнительно хроматическую aberrацию на зоне (луч 3.)
3. Сравнение вариантов компонентов осуществить по сферической aberrации 5 порядка, вычисленной по формуле $\Delta s'_V = 2\Delta s'_1 - 4\Delta s'_3$, где $\Delta s'_1, \Delta s'_3$ – продольная сферическая aberrация для края зрачка (луча 1) и для луча 3, идущего на половине высоты зрачка соответственно.
4. Вычислить для вариантов рис.13.1б, г сферохроматическую aberrацию по формуле $\Delta chr = [S'(2) - S'(1)]_1 - [S'(2) - S'(1)]_0$, где $[S'(2) - S'(1)]_1, [S'(2) - S'(1)]_0$ – разность продольных сферических aberrаций для

второй и первой дополнительных длин волн на краю зрачка и на оси соответственно

Содержание отчета

1. Схемы, таблицы и графики аберраций рассчитанных компонентов
2. Сравнительная характеристика вариантов.

Контрольные вопросы

1. Коррекционные возможности различных типов компонентов
2. Использование компонентов различной сложности в качестве самостоятельных оптических систем и в составе сложных систем.

Варианты заданий

№ вар.	f'	K
1	100	2.5
2	150	3
3	200	3.5
4	250	4
5	300	2.5
6	75	2
7	350	4
8	250	5
9	125	3
10	200	3

Лабораторная работа №14 Расчет окуляра

Цель работы: рассчитать окуляр с изопланатической коррекцией aberrаций

Задачи работы: закрепление теоретического материала, изучение свойств изопланатических поверхностей.

Порядок выполнения

Рассчитать окуляр из двух плосковыпуклых линз, обладающий изопланатической коррекцией aberrаций, из заданной марки стекла и с заданным выносом зрачка в монохроматическом свете для длины волны e . Диаметр зрачка – 2 мм, угловое поле $2\omega=40^\circ$.

Расчет окуляра выполняется следующим образом.

1. Первая поверхность окуляра – плоская, вторая поверхность – изопланатическая, через нее главный луч идет без преломления (такая поверхность не вносит комы и астигматизма), см. рис. 14.1а [6]. Центр кривизны этой поверхности совпадает с осевой точкой изображения зрачка, построенного первой поверхностью. Радиус поверхности вычислить на основании расчета хода луча. Толщина линзы подбирается конструктивно.

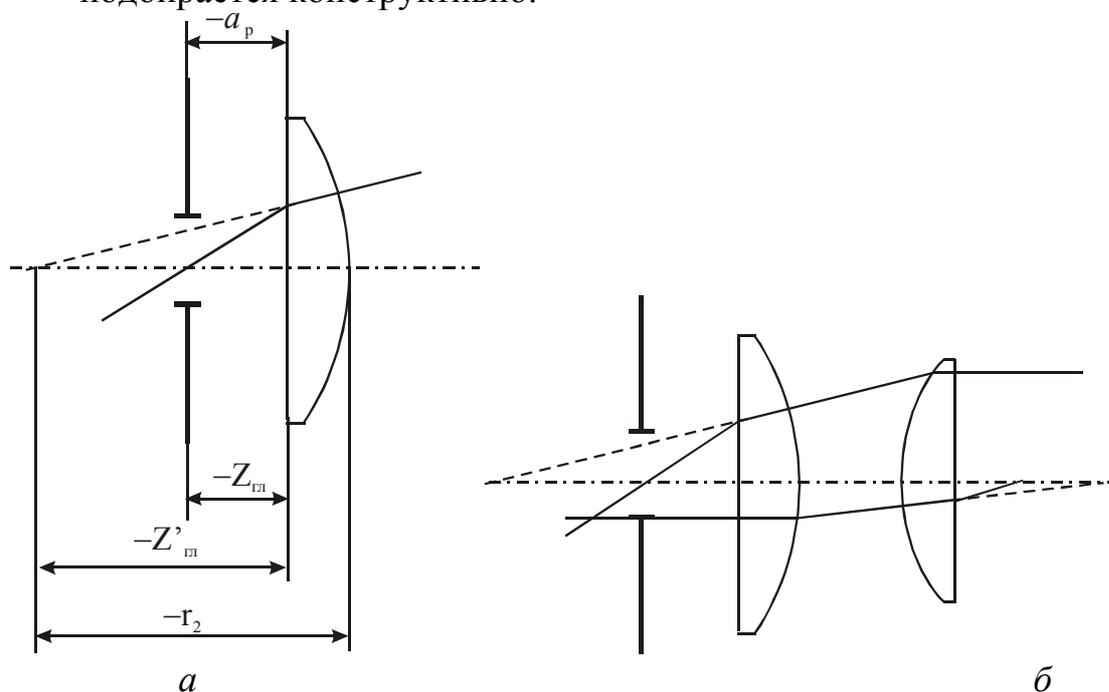


Рис. 14.1 К расчету окуляра

2. Следующая поверхность – конфокальная, апертурный луч идет через нее без преломления (рис. 14.1б). На этом этапе удобно задавать систему углами нулевого луча. Расстояние между линзами подбирается таким образом, чтобы получить коррекцию: $z'_m = -z'_s$

(можно воспользоваться программой автоматизированной коррекции). Зрачок после этой поверхности оказывается практически на бесконечности, поэтому можно последнюю поверхность сделать плоской.

3. Оценить aberrации полученного окуляра.
4. Составить общую таблицу для соотношения a_p/f' в зависимости от показателя преломления n .

Содержание отчета

1. Порядок расчета окуляра с поясняющими чертежами, численными величинами, использованными при расчете
2. Конструктивные параметры и параксиальные характеристики полученного окуляра
3. Таблицы и графики aberrаций

Контрольные вопросы

1. Окуляры в оптических системах, их особенности
2. Изопланатическая поверхность, aberrационные свойства. Ее использование в оптических системах.
3. Астигматизм, кривизна поля, астигматические отрезки.

Варианты заданий

№ вар.	Вынос зрачка, s_p , мм	Марка стекла
1	-10	K8
2	-12	TK16
3	-14	СТК19
4	-16	БК10
5	-15	СТК3
6	-13	K8
7	-9	TK16
8	-8	СТК19
9	-15	TK20
10	-17	БК6
11	-18	TK23
12	-20	СТК3
13	-15	K8
14	-13	TK16
15	-15	СТК19

Лабораторная работа №15

Исследование астигматизма на примере двухзеркального объектива

Цель работы: исследование свойств астигматизма

Задачи работы: Рассчитать двухзеркальную систему с исправленной кривизной поля, сферической абберацией и комой, исследовать вид пятна рассеяния при различных положениях плоскости установки.

Порядок выполнения

1. Выполнить габаритный расчет системы. Для этого пользуясь заданными величинами выноса изображения за первое зеркало δ и фокусного расстояния f' рассчитать величину центрального экранирования в системе с исправленной кривизной поля [5, 7].

В двухзеркальной системе в случае исправленной кривизны поля коэффициент линейного экранирования по диаметру ε определяется:

$$\varepsilon = \frac{D_2}{D_1} = \frac{3 - \sqrt{9 - 4(\delta / f' + 1)}}{2}$$

где D_2, D_1 – диаметры второго и первого зеркал соответственно, δ – положение изображения относительно поверхности первого зеркала (рис. 14.1), f' – фокусное расстояние системы.

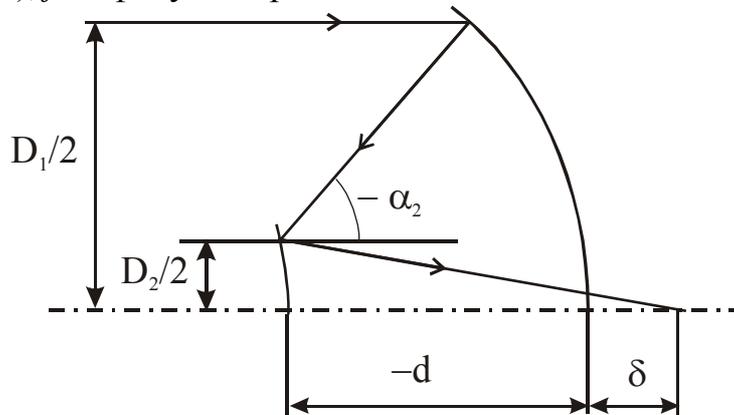


Рис. 15.1 Двухзеркальная система

2. Угол нулевого луча α_2 после отражения от первого зеркала

$$\alpha_2 = \frac{1 - \varepsilon}{d / f'}$$

Расстояние между зеркалами d :

$$d = \delta - \varepsilon f'$$

3. Задать полученную систему в программе SAPO углами нулевого луча, при этом $\alpha_1 = 0, \alpha_3 = 1, n_1 = 1, n_2 = -1, n_3 = 1$, высота первого параксиального луча на первой поверхности $h_1 = HA = f'$. Перейти от углов нулевого луча к радиусам поверхностей (требование 23 SAPO).

4. Проверить правильность выполнения габаритных расчетов: вынос поверхности изображения за поверхность первого зеркала должен совпадать с заданным, а кривизна Петцваля $z'_p = \frac{3z'_s - z'_m}{2} = 0$.
5. Записать сферические поверхности как несферические т.е. коэффициент $a_2 = 1 - e^2 = 1$ [3,8], эксцентриситет $e = 0$.
6. Используя в качестве коррекционных параметров коэффициенты a_2 для поверхностей, исправить неизопланатизм и сферическую aberrацию. Вычислив величину $z'_p = \frac{3z'_s - z'_m}{2}$, убедиться, что введение несферических поверхностей не влияет на кривизну изображения.
7. Рассмотреть вид пятна рассеяния и его изменение при перемещении плоскости установки: плоскость установки сместить на величину $DS'Y = z'_m; z'_s; \frac{z'_m + z'_s}{2}$.
Уменьшая апертуру или поле, найти такое значение, при котором число Штреля для края поля будет $St = 0,8$. Вычислить волновой астигматизм: $w_{ast} = w_m - w_s$

Содержание отчета:

1. Габаритный расчет двухзеркального объектива: расчет радиусов, воздушного промежутка, экранирования.
2. Конструктивные параметры (в том числе эксцентриситеты поверхностей), aberrации осевого пучка и узких наклонных пучков лучей для объектива с исправленным астигматизмом и сферической aberrацией.
3. Конструктивные параметры (в том числе эксцентриситеты поверхностей), таблицы и графики aberrации осевого пучка и узких наклонных пучков лучей для объектива с исправленной комой и сферической aberrацией
4. Чертеж оптической системы апланатического объектива, графики и таблицы aberrаций

Контрольные вопросы:

1. Кривизна поля. Вывод формулы для связи конструктивных параметров двухзеркального объектива в случае исправленной кривизны поля, анализ формулы. Вид пятна рассеяния
2. Астигматизм. Вид пятна рассеяния. Его изменения при смещении плоскости установки.
3. Несферические поверхности.

Варианты заданий

для всех вариантов $\sin \omega = 0,01$

№ вар.	Фокусное расстояние f', мм	Диафрагменное число K	Положение изображения δ, мм
1	1000	5	- 20
2	2000	6	40
3	800	7	- 10
4	900	8	30
5	600	7	40
6	700	8	10
7	750	6	- 50
8	1200	8	- 70
9	1000	8	- 60
10	1500	7	10
11	1400	7	20
12	850	5	30
13	900	6	- 25
14	500	5	30
15	950	7	-10

Лабораторная работа № 16

Исправление астигматизма в объективе, состоящем из склейки и одиночной линзы, расположенных на конечном расстоянии

Цель работы: закрепление теоретического материала, получение навыков расчета систем с изопланатическими поверхностями

Задачи работы: расчет линзового объектива с исправленным астигматизмом, сферической аберрацией и комой

Порядок выполнения

В системе, сколько угодно сложной, но которую можно считать тонкой, невозможно одновременно исправить сферическую аберрацию, кому и астигматизм. Поэтому для исправления астигматизма при устраненных сферической аберрации и коме рационально использовать схему на рис. 16.1, где тонкий компонент сочетается с изопланатической тонкой линзой [6]. На рисунке 16.1 F'_1 – задний фокус первого компонента

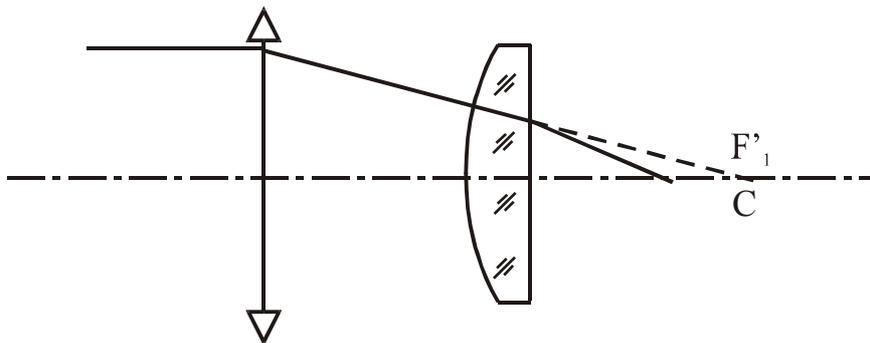


Рис. 16.1 Тонкий компонент с изопланатической линзой

В такой системе апертурный луч идет в центр кривизны выпуклой поверхности линзы, т.е. проходит эту поверхность без преломления – такую поверхность иногда называют конфокальной. Благодаря этой поверхности можно компенсировать астигматизм тонкого компонента (луч в линзу идет по нормали к поверхности, следовательно, $z'_s = 0$, при этом $z'_m \neq 0$, $z'_m = -2z'_p$), поэтому при использовании такой линзы возможно компенсировать астигматизм за счет введения меридиональной его составляющей.

1. Рассчитать тонкий компонент, склеенный из двух линз. Фокусное расстояние всей системы f' и фокусное расстояние первого компонента f'_1 в такой системе связаны следующим образом:

$$f'_1 = f'n,$$

где n – показатель преломления материала линзы.

При расчете апланатического компонента из двух склеенных линз на первом этапе стекла можно подобрать произвольно и хроматизм

положения можно не исправлять. Расчет выполнить с помощью требования 7 SAPO. Исправить сферическую aberrацию и кому для края отверстия.

- Для удобства дальнейшего расчета перейти к углам нулевого луча и добавить конфокальную (т.е. центр кривизны поверхности совпадает с фокусом первого компонента) и плоскую поверхности. При этом система будет выглядеть следующим образом.

$$\begin{array}{lll}
 \alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\
 \alpha_2 & d_1 & n_2 \\
 \alpha_3 & d_2 & n_3 \\
 \alpha_4 = 1 & d_3 & n_4 = 1 \\
 \alpha_5 = 1 & d_4 & n_5 = n \\
 \alpha_6 = n & & n_6 = 1
 \end{array}$$

где n - показатель преломления стекла линзы, n_2, n_3 - показатели преломления материала склейки.

- Используя в качестве коррекционного параметра расстояние d_3 исправить астигматизм (функция 7 для главного луча в программе SAPO).
- Изопланатическая линза с плоской последней поверхностью не вносит кому, но вносит сферическую aberrацию. Поэтому в системе скорригировать сферическую aberrацию, кому, астигматизм, используя в качестве коррекционных параметров α_2, α_3, d_3 .
- Определить основные параметры P, W первого компонента, исходя из сферической aberrации и неизопланатизма (см. лабораторную работу № 11)
- Исправить хроматизм положения в системе целиком, используя в качестве коррекционного параметра α_2 . Сделать концовку, т.е. рассчитать хроматизм положения первого компонента и определить параметр C (см. лабораторную работу № 11 «Расчет объектива, склеенного из двух линз»). По таблицам подобрать стекла и рассчитать первый компонент по основным параметрам P, W, C (требование 7 SAPO).
- Соединить изопланатическую плосковыпуклую линзу с рассчитанным компонентом. При необходимости выполнить коррекцию сферической aberrации, комы, хроматизма положения в системе целиком.
- Оценить aberrации полученной системы.

Содержание отчета:

- Параметры и характеристики склеенного компонента, таблицы и графики aberrаций

2. Параметры и характеристики склеенного компонента с линзой, таблицы и графики aberrаций.
3. Чертеж рассчитанной оптической системы

Контрольные вопросы

1. Астигматизм и кривизна изображения тонкого компонента, вывод формул.
2. Астигматические отрезки, различные варианты коррекции кривизны поля и астигматизма.
3. Изопланатические поверхности, их свойства.

Варианты заданий

№ вар.	f'	D	$2\omega, ^\circ$	<i>стекло</i>
1	200	25	5	К8
2	300	35	3,2	БК10
3	400	50	2,3	ТК16
4	150	25	5	К8
5	250	35	4	ТК20
6	350	40	3	ТК23
7	450	50	2,5	СТК19
8	500	55	2	БК8
9	400	45	3	БК6
10	300	40	3,4	БК10

Лабораторная работа № 17 Расчет зрительной трубы Галилея

Цель работы: получение навыков расчета зрительных труб, закрепление теоретического материала

Задачи работы: Рассчитать зрительную трубу Галилея с использованием метода имитационного моделирования

Порядок выполнения работы:

Зрительная труба Галилея используется как в качестве самостоятельной оптической системы, так и для скачкообразной перемены увеличения в сочетании с трубой Кеплера, а также для уменьшения расходимости лазерных пучков [2, 9, 10].

В качестве объектива и окуляра зрительной трубы Галилея использовать компоненты, склеенные из двух линз (рис. 17.1)

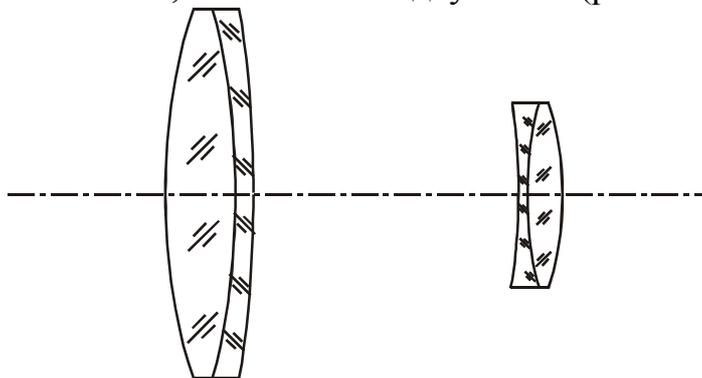


Рис. 17.1 Зрительная труба Галилея

При расчете зрительной трубы целесообразно сделать так, чтобы сферическая абберация, хроматизм положения и кома были исправлены в каждом компоненте отдельно, т.е. $P_1 = P_2 = 0$ и $W_1 = W_2 = 0$, $C_1 = C_2 = 0$.

В общем случае в системе имеет место избыточное число параметров для коррекции – P_1, P_2, W_1, W_2 . Поэтому классический способ расчета зрительной трубы состоит в решении системы уравнений для нахождения этих параметров.

Однако возможен другой способ – использование метода имитационного моделирования, с его помощью можно без решения уравнений определить необходимые для расчета склеек параметры [11]. Исходная оптическая система формируется из имитационных компонентов путем пересчета каждого из них на нужное фокусное расстояние. Затем выполняется оптимизация, а в качестве коррекционных параметров используются радиусы оптических поверхностей компонентов и коэффициенты асферических поверхностей. Габаритные характеристики оптической системы (фокусные расстояния компонентов и расстояния между ними) должны оставаться неизменными.

- Исходя из заданного увеличения зрительной трубы Γ и длины системы L рассчитать фокусные расстояния компонентов (рис.17.2):

$$f_1' = \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} L, \quad f_2' = -\frac{f_1'}{\Gamma}$$

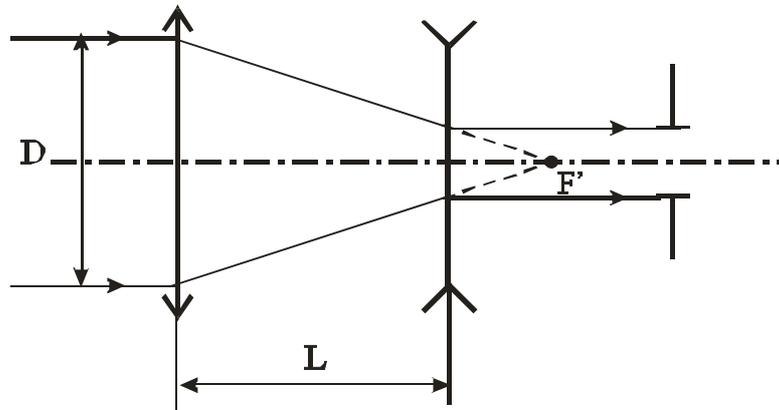


Рис. 17.2 Схема зрительной трубы Галилея

- Задать имитационную линзу

Параметры имитационной линзы (САРО):

$$r_1 = A^* \quad d_1 = 2 \quad \text{ЛК1}$$

$$r_2 = -289.62$$

* — уравнение асферической поверхности
 $y^2 + x^2 - 103,92z + 0,1796z^2 = 0$ (эксцентриситет $e = 0,9058$)

- Пересчитать имитационный компонент на нужные фокусные расстояния f_1' , f_2' . Соединить два имитационных компонента, составив зрительную трубу, расположив первый компонент в прямом ходе, а второй – в обратном ходе лучей.
- В полученной зрительной трубе осуществить коррекцию (требование 11 САРО) сферической аберрации (с точностью до $1'$), комы (неизопланатизма с точностью до $0,01\%$) и астигматизма (до $0,01$ дптр). В качестве коррекционных параметров использовать радиусы поверхностей и коэффициенты деформации (эксцентриситеты несферических поверхностей).
- В полученной системе определить аберрации каждого компонента – сферическую аберрацию и неизопланатизм. Пользуясь этими значениями, рассчитать параметры P и W для каждого компонента. Хроматические параметры взять $C_1 = C_2 = 0$. (см. лабораторную работу №11),
- Для расчета компонентов по основным параметрам P и W воспользоваться возможностями программного комплекса САРО (требование 7). Соединить рассчитанные компоненты в зрительную трубу.
- При необходимости провести коррекцию, используя в качестве коррекционных параметров углы нулевого луча и воздушный промежуток между компонентами. В качестве корригируемых

функций выбрать сферическую aberrацию, неизопланатизм, астигматизм, хроматизм положения и увеличения.

8. Определить aberrации полученной зрительной трубы.

Содержание отчета:

1. Габаритный расчет системы.
2. Полученные в результате расчета необходимые aberrации каждого компонента.
3. Расчет основных параметров компонентов
4. Оптическая схема, конструктивные параметры, таблицы и графики aberrаций полученной зрительной трубы Галилея

Контрольные вопросы

1. Особенности зрительной трубы Галилея
2. Aberrации зрительных труб
3. Суть метода имитационного моделирования

Варианты заданий

№ вар.	f	D	$2\omega, ^\circ$	L
1	1,6	18	6	25
2	2,0	18	5	30
3	2,5	18	6	35
4	3,0	18	4	40
5	4,0	18	4	45
6	2,5	18	6	50
7	2	20	5	35
8	2,5	20	4	45
9	3	20	2	45
10	1,5	15	2	25
11	1,7	18	4	25
12	3	15	4	40
13	3,5	15	3	45
14	4	20	4	45
15	2,5	25	4	45

Лабораторная работа № 18

Расчет зрительной трубы с призмой Пехана

Цель работы: развитие навыков расчета оптических систем различного назначения

Задачи работы: рассчитать зрительную трубу и оценить качество изображения

Порядок выполнения

Расчитать зрительную трубу с призмой Пехана с крышкой с заданным увеличением Γ , диаметром входного зрачка D , угловым полем 2ω и удалением выходного зрачка a'_p (рис. 18.1).

- По заданному типу окуляра определить отношение $\frac{S'_{F'}}{f'}$. Рассчитать требуемое фокусное расстояние окуляра $f'_{ок}$:

$$f'_{ок} = \frac{a'_p}{\left(\frac{S'_{F'}}{f'} + \left| \frac{1}{\Gamma} \right| \right)}$$

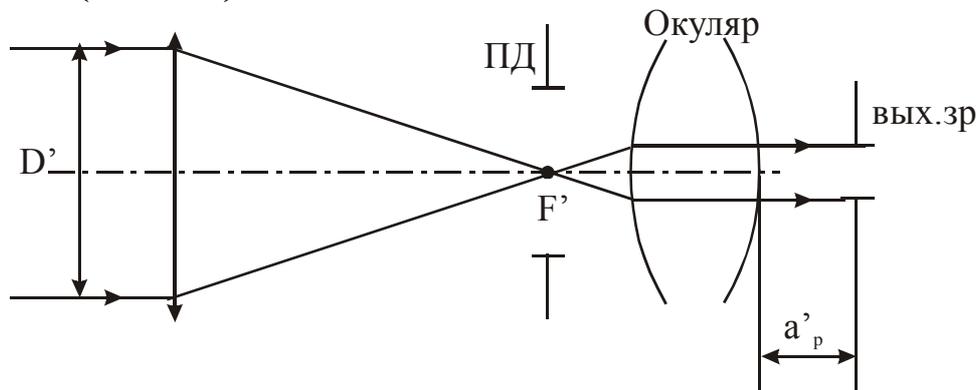


Рис. 18.1 Схема зрительной трубы

- Окуляр из каталога масштабировать на нужное фокусное расстояние, коэффициент масштабирования:

$$M = \frac{f'_{ок}}{f'_{кат}}$$

- Вычислить фокусное расстояние объектива [9, 10]: $f'_{об} = \Gamma f'_{ок}$. Угловое поле в пространстве изображений $2\omega'$: $\text{tg } \omega' = \Gamma \cdot \text{tg } \omega$.

Диаметр выходного зрачка: $D' = \frac{D}{\Gamma}$

- Окуляр задать в прямом ходе (изображение находится на бесконечно большом расстоянии), aberrации определить в обратном ходе. При задании окуляра обратить внимание на расположение диафрагмы:

для окуляра в прямом ходе зрачок расположен на объективе, т.е. перед окуляром на расстоянии $f'_{об}$ от переднего фокуса окуляра (рис.17.2). В таком положении проверить, обеспечивается ли необходимое удаление выходного зрачка (не менее заданного).

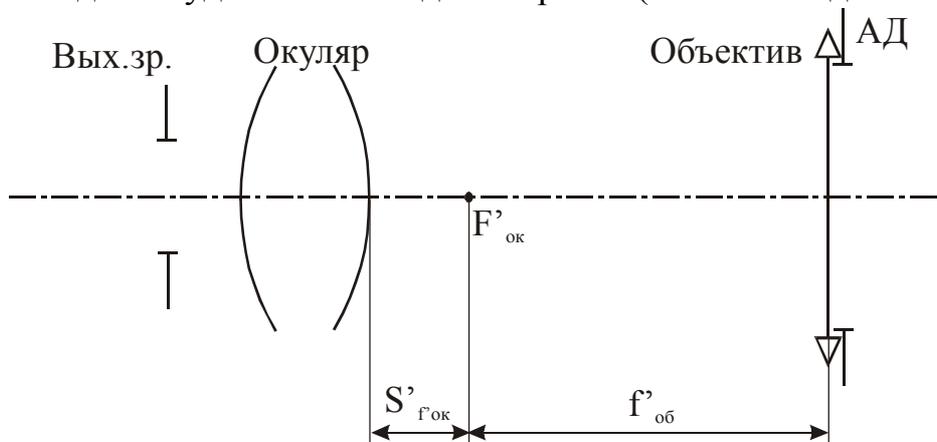


Рис. 18.2 Зрительная труба в обратном ходе

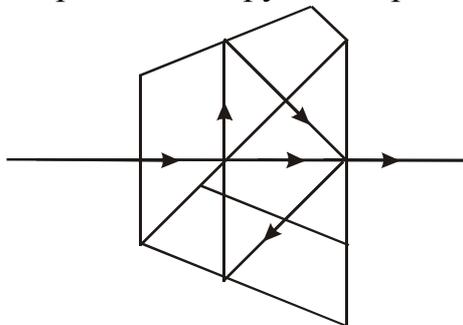


Рис. 18.3 Призма Пехана с крышей

5. Для оборачивания изображения применим призму Пехана с крышей (рис. 18.3). Расчет призмы необходимо провести следующим образом: рассчитать величину $tg\gamma = \frac{n}{2c}$, где c – коэффициент, характеризующий тип призмы и связывающий длину хода луча в стекле призмы с шириной пучка на входной грани призмы. Для призмы Пехана с крышей коэффициент $c = 4.75$
6. Вычислить величину $tg\sigma = \frac{D - D_{п}}{2f'_{об}}$, где D – диаметр входного зрачка системы, $D_{п}$ – диаметр полевой диафрагмы.
7. Расстояние от выходной грани призмы до полевой диафрагмы $s' \gg \frac{f'^2_{ок}}{100}$. Если это расстояние будет меньше вычисленной величины, то в поле зрения наблюдателя будут видны дефекты поверхности выходной грани призмы. Если, например, получилось $s' \gg 2.5$, то можно выбрать $s' = 10$, но при этом может оказаться, что призму невозможно разместить между объективом и плоскостью полевой диафрагмы, тогда необходимо уменьшать отрезок s' .

8. Рассчитать диаметр пучка на входной грани призмы:

$$D_{np} = \frac{n}{c} \cdot \frac{0.5D_{II} + s' \operatorname{tg} \sigma}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \sigma}$$

9. Длина хода луча в стекле призмы $l = c \cdot D_{np}$, задать призму вместе с окуляром, проверить, что она размещается в промежутке между объективом и полевой диафрагмой. Если при расчете оказывается, что $f'_{об} < \frac{l}{n} + s'$, то это означает, что между объективом и окуляром

не хватает места для размещения призмы, тогда можно изменить марку стекла на более тяжелую (например, заменить стекло К8, которое использовалось при расчете, на стекло БК10).

10. Добавить призму к окуляру в обратном ходе ($s = \infty$). Проверить вынос зрачков, рассчитать aberrации окуляра с призмой.

11. К окуляру с призмой рассчитать объектив. Для исправления сферической aberrации, комы и хроматизма положения во всей оптической системе должно выполняться:

$$\Delta S'_{ок} = -\Delta S'_{об}, \quad \eta_{об} = \eta_{ок}, \quad C_{ок} = -C_{об},$$

где $\Delta S'_{ок}$, $\Delta S'_{об}$, $\eta_{ок}$, $\eta_{об}$ – сферическая aberrация и неизопланатизм окуляра с призмой и объектива соответственно.

$$C_{ок} = \frac{S'_{F'} - S'_{C'}}{f'} - \text{хроматический параметр для окуляра с призмой.}$$

12. Далее следовать порядку расчета склеенного объектива (см. лабораторную работу №11 «Расчет объектива, склеенного из двух линз»). Соединить рассчитанный объектив с окуляром и призмой. Определить aberrации. При необходимости провести автоматизированную коррекцию, изменять при этом следует только объектив, а для сохранения положения изображения использовать расстояние между объективом и призмой. В полученной схеме сферическая aberrация на краю зрачка не должна превышать $1'$, хроматизм положения не более $3' - 5'$.

Симметричные окуляры

$$f^* = 20, 2\omega = 40^\circ, S'_{F'} / f' = 0.745$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	54.70	1.5	Ф102	17.5
2	16.81	6	К8	17.5
3	-24.39	0.1	Воздух	17.5
4	24.39	6	К8	17.5
5	-16.81	1.5	Ф102	17.5
6	-54.70			17.5

$$f^* = 25, 2\omega = 40^\circ, S'_{F'} / f' = 0.745$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	68.66	1.5	Ф102	22
2	21.01	7.5	К8	22
3	-30.58	0.1	Воздух	22
4	30.58	7.5	К8	22
5	-21.01	1.5	Ф102	22
6	-68.66			

$$f^* = 30, 2\omega = 40^\circ, S'_{F'} / f' = 0.745$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	82.41	2.5	Ф102	26
2	25.02	8.5	К8	26
3	-36.06	0.2	Воздух	26
4	36.06	8.5	К8	26
5	-25.02	2.5	Ф102	26
6	-82.41			

Окуляры Кельнера

$$f^* = 20, 2\omega = 50^\circ, S'_{F'} / f' = 0.365$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	53.26	5	К8	19.5
2	-24.92	14.5	Воздух	19.5
3	14.39	4.5	БК6	11.2
4	-10.73	1	Ф13	11.2
5	-76.45		воздух	11.2

$$f' = 25, 2\omega = 50^\circ, S'_{F'} / f' = 0.365$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	66.18	6	К8	24.5
2	-31.09	18	Воздух	24.5
3	18.05	5.5	БК6	14
4	-13.54	1.5	Ф13	14
5	-95.53		воздух	14

Окуляры Эрфле

$$f' = 20, 2\omega = 55^\circ, S'_{F'} / f' = 0.675$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	-44.89	1.5	Ф13	29
2	25.54	13	К8	29
3	-25.54	0.2	Воздух	29
4	56.76	6.5	К8	29
5	-56.76	0.2	Воздух	29
6	23.54	11	К8	26
7	27.5	1.5	Ф13	26
8	-136.30			26

$$f' = 25, 2\omega = 55^\circ, S'_{F'} / f' = 0.675$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	-56.01	1.7	Ф13	36.5
2	31.89	15	К8	36.5
3	-31.89	0.25	Воздух	36.5
4	70.78	7.6	К8	36.5
5	-70.78	0.25	Воздух	36.5
6	29.41	13.8	К8	32.5
7	-34.41	1.8	Ф13	32.5
8	-170.23			32.5

Окуляр №1

$$f' = 16.3, 2\omega = 60^\circ, S'_{F'} / f' = 0.755$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	- 17.219	2	ТФ4	19.1
2	26.49	10	ТК16	24.6
3	- 20.09	0.1	воздух	26.5
4	∞	4.3	ТК16	29
5	- 37.07	0.1	воздух	29.2
6	37.07	4.3	ТК16	29
7	∞	0.1	воздух	28.4
8	14.457	7	ТК16	24.6
9	70.96	2	ТФ4	22.8
10	17.418		воздух	18.5

Окуляр № 2

$$f' = 28.8, 2\omega = 50^\circ, S'_{F'} / f' = 0.731$$

№ п/п	Радиусы	Толщины	Марки стекол	Световые диаметры
			воздух	
1	- 39.08	4	ЛФ5	32.5
2	∞	5.17	воздух	35.9
3	∞	7	СТК19	39.8
4	-47.64	0.2	воздух	40.8
5	∞	5	СТК19	41
6	-130.92	0.2	воздух	41
7	165.58	5	СТК19	40.5
8	∞	0.2	воздух	39.5
9	31.05	13.5	ТК16	37.2
10	-36.64	3.4	ТФ4	34.7
11	∞		воздух	30.2

Содержание отчета

1. Габаритный расчет системы. Расчет призмы.
2. Аберрации окуляра с призмой.
3. Расчет объектива, конструктивные параметры и аберрации объектива.
4. Конструктивные параметры зрительной трубы, таблицы и графики аберраций. Оптическая схема Зрительной трубы с призмой Пехана.

Контрольные вопросы

1. Использование призм и призмённых систем в зрительных трубах.
2. Объективы зрительных труб
3. Критерии качества изображения и контроль качества зрительных труб

Варианты заданий

№ вар.	Γ	D	2ω	a'_p, мм	Рекомендуемый тип окуляра
1	7	50	$7^{\circ}30'$	12	Кельнера
2	8	30	7	12	№1
3	8	40	7	15	Кельнера
4	10	40	6	15	Эрфле
5	6,5	30	8	14	№2
6	9	40	5	14	Кельнера
7	10	40	4	14	Симметричный
8	11	45	4	15	№1
9	7	30	5	15	симметричный
10	6	30	9	15	№2
11	9	40	6	15	№2
12	8	35	7	15	№1
13	6	50	6	16	Симметричный
14	5,5	45	7	16	симметричный
15	7,5	50	6	18	№1

Лабораторная работа № 19

Расчет линзовой оборачивающей системы с параллельным ходом лучей

Цель работы: получение навыков расчета линзовых оборачивающих систем, изучение aberrаций симметричных систем

Задачи работы: расчет линзовой оборачивающей системы с параллельным ходом лучей между компонентами.

Порядок выполнения

Линзовые оборачивающие системы используются преимущественно в зрительных трубах с целью получения прямого изображения и требуемой длины (перископичности), а также для установки призм Дове.

Простейшая и наиболее часто встречающаяся оборачивающая система состоит из двух одинаковых симметрично расположенных компонентов, каждый из которых склеен из двух линз, с параллельным ходом апертурного луча между ними (см. рис. 19.1)

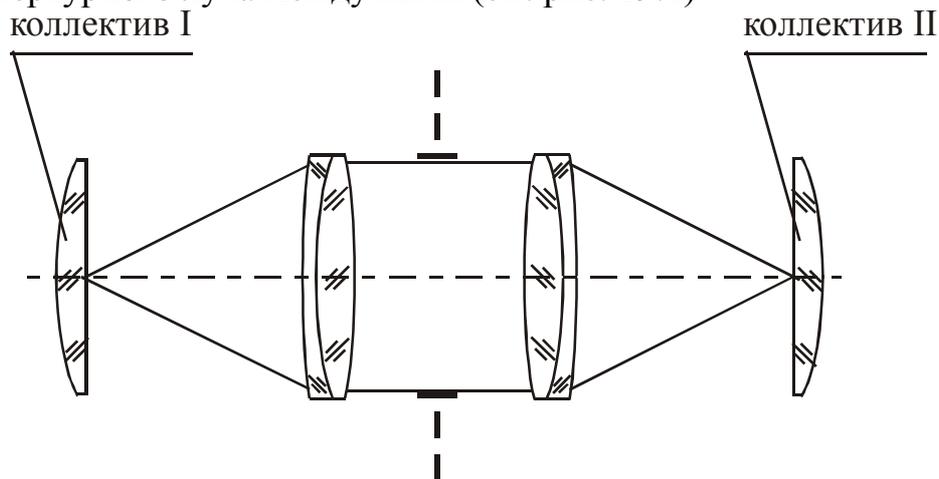


Рис. 19.1 Линзовая оборачивающая система

Такая оборачивающая система работает с линейным увеличением $V = -1$ с конечного расстояния на конечное. С помощью коллектива *I*, установленного в плоскости предмета, изображение входного зрачка зрительной трубы располагается посередине между компонентами. С помощью коллектива *II* обеспечивается сопряжение выходного зрачка с входным зрачком окуляра.

Благодаря такому расположению компонентов в оборачивающей системе обеспечивается симметричный ход лучей, что позволяет автоматически устранить кому. Вынос зрачков относительно компонентов позволяет устранить астигматизм за счет введения комы в половинках оборачивающей системы.

1. Рассчитать склеенный из стекол СТК19 – ТФ10 компонент (требование 7 САРО), основные параметры $P = W = 0$.

2. Используя полученную систему в качестве исходной осуществить коррекцию сферической аберрации на краю отверстия и астигматизма на краю поля изображения (требование 11 САРО). Таблица описания корригируемых функций выглядит при этом следующим образом:

НЛ	НПУЧ	НЛУЧ	НОМЕРА	ФУНКЦИЙ			ТРЕБ.ЗНАЧ.	ДОПУСКИ
1	0	1	1					0.001
2	1	0	7					0.01
3								
4								
5								
6								

Предварительно задать входной зрачок совмещенным с компонентом и убедиться, что решения нет.

3. После выполнения коррекции найти основной параметр W :

$$W = 2 \left(\frac{f'}{m} \right)^2 \eta$$

Найти сферическую аберрацию третьего порядка: $\Delta s'_{III} = 4\Delta s'_3 - \Delta s'_1$, где $\Delta s'_1$, $\Delta s'_3$ – продольная сферическая аберрация лучей, идущих на край зрачка на высоте $m_1 = m_{\max}$ и на высоте $m_3 = \sqrt{0,5}m_1$ соответственно.

Вычислить параметр P :

$$P = -2 \frac{f'}{m^2} \Delta s'_{III}$$

Найти комбинацию стекол по величине P_0 $P_0 = P - 0.85(W - 0.14)^2$, параметр $C = 0$ [4].

4. Заменить комбинацию стекол СТК19 – ТФ10 на найденную комбинацию и повторить коррекцию сферической аберрации и астигматизма. Убедиться, что хроматизм положения исправлен.
5. Составить оборачивающую систему из двух компонентов, задав положение апертурной диафрагмы посередине между ними. Убедиться, что отступление от условия изопланатизма, астигматизм, сферическая аберрация и хроматизм положения исправлены.

Содержание отчета

1. Расчет основных параметров компонентов линзовой оборачивающей системы.
2. Конструктивные параметры и аберрации компонента линзовой оборачивающей системы
3. Конструктивные параметры и аберрации линзовой оборачивающей системы целиком.

Контрольные вопросы

1. Астигматизм тонкого компонента с вынесенным зрачком
2. Связь астигматизма и комы тонкого компонента с вынесенным зрачком
3. Аберрации оптических систем с симметричным ходом луча.

Варианты заданий

Для всех вариантов диафрагменное число $K = 5$.

№ вар.	$f', \text{ мм}$	$-s_p, \text{ мм}$	$\mu = \sin \omega$
1	125	60	0,1
2	125	50	0,1
3	150	60	0,08
4	150	75	0,08
5	170	85	0,088
6	170	70	0,088
7	200	80	0,075
8	200	100	0,075
9	200	70	0,075
10	200	65	0,075
11	250	125	0,05
12	250	100	0,05
13	250	80	0,05
14	180	90	0,08
15	180	70	0,08

Литература:

1. Вычислительная оптика. Справочник под ред. Русинова М.М. – Л.: Машиностроение, 1984
2. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. – Л., Машиностроение, 1975
3. Инструкция к программе САРО
4. Трубка С.В. Расчет двухлинзовых склеенных объективов. – Л., Машиностроение, 1984
5. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. – Л., Машиностроение, 1969
6. Грамматин А.П. Синтез оптических систем, состоящих из линз с апланатическими и изопланатическими поверхностями и бесконечно тонких компонентов. - ГОИ, Труды ГОИ, 1981, т. 49, вып. 183, с. 23
7. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. – Л., Машиностроение, 1968
8. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике. – М., Недра, 1973
9. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. – М.-Л., Машиностроение, 1966
10. Апенко М.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика. М., Наука, 1971
11. Грамматин А.П., Колесник Е. В. Расчет оптических систем с применением метода имитационного моделирования //Оптический журнал, Т.71, №4 (2004)



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.

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Кафедра прикладной и компьютерной оптики – одна из крупнейших кафедр российских ВУЗов, занимающихся задачами современной оптической науки

Кафедра возникла при слиянии двух кафедр оптического факультета: теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики. Поэтому на кафедре учат специалистов, имеющих самое широкое представление об оптике в целом, от проектирования оптических систем самого разного назначения до компьютерной обработки изображений и интерферограмм .

Овладение такими разнообразными знаниями невозможно без практической работы с приборами, и кафедра имеет в своем составе несколько учебно-исследовательских лабораторий.

В лаборатории оптических измерений и контрольно-измерительных приборов студенты получают знания и навыки в области метрологии, учатся измерять характеристики оптических систем и параметры деталей и материалов.

Лаборатория микроскопов и медицинских оптических приборов знакомит с различными типами микроскопов (поляризационными, биологическими, металлографическими), методами наблюдения микрообъектов и т.п., а также с приборами, применяемыми офтальмологами для диагностики зрения.

Лаборатория геодезических приборов позволяет получить начальные навыки работы с теодолитами, дальномерами другими

приборами, применяемыми в геодезии и картографии, узнать особенности проектирования различных их узлов и конструкции.

В лабораториях компьютерных средств контроля оптики и исследования качества оптического изображения занимаются проблемами контроля качества оптических поверхностей оптической системы в целом, а также компьютеризации и автоматизации этих процессов.

В учебном процессе используются научный потенциал и лабораторная база крупнейшего в России научного центра в области оптики – ВНИЦ ГОИ им. С.И.Вавилова, ведущего оптического предприятия – ОАО "ЛОМО".

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П.Королева, Ю.А.Гагарина, премиями Минвуза.

За период существования кафедры было подготовлено более 150 кандидатов наук, из них 30 иностранцев, а также 16 докторов наук. Большинство научных и производственных подразделений в области прикладной оптики в России, а также многие в США, Израиле и Китае возглавляют ученики нашей научной школы.

В настоящее время кафедра прикладной и компьютерной оптики факультета Оптико-информационных систем и технологий является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов в области оптотехники.

**Александр Пантелеймонович Грамматин
Галина Эдуардовна Романова**

**Методы проектирования оптических систем.
Автоматизация проектирования оптических
систем**

Методические указания к лабораторным работам

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Зав. редакционно-издательским отделом

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати 17.03.08

Отпечатано на ризографе

Заказ № 1129

Тираж 150 экз.