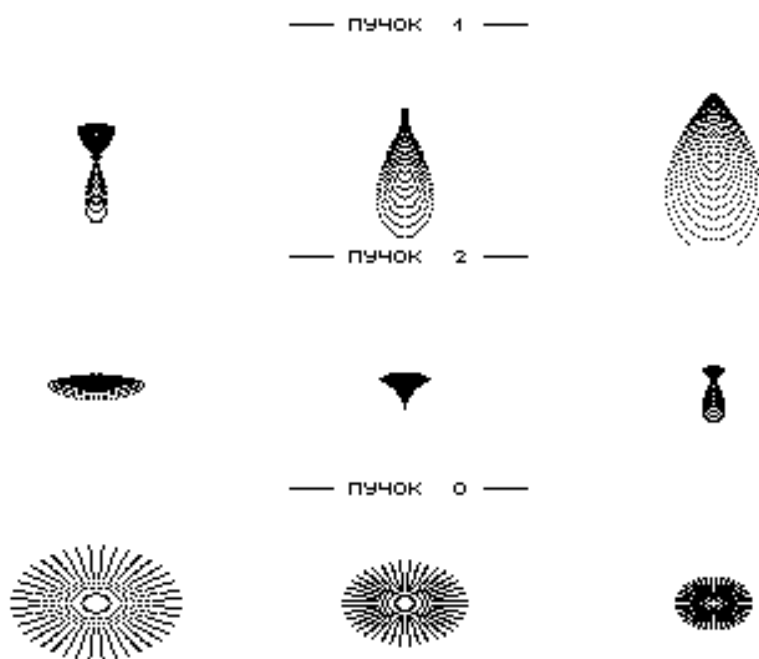


Т.В. ИВАНОВА

ОСНОВЫ ОПТИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО
ПРАКТИКУМА



Санкт-Петербург
2009

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

Т.В. ИВАНОВА

ОСНОВЫ ОПТИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО
ПРАКТИКУМА

Под редакцией профессора А.А.Шехонина



Санкт-Петербург
2009

Иванова Т.В. **Основы оптики. Методические рекомендации к выполнению лабораторного практикума.** Под редакцией Шехонина А.А. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 133 .

Приводится описание лабораторные работы по курсу «Основы оптики», которые проводятся при помощи программного комплекса OPAL-PC. В описании лабораторных работ приводятся задание для работы, подробное описание и пример выполнения лабораторной работы, примеры выполнения отчетов, индивидуальные задания и перечень вопросов для защиты лабораторной работы.

Для студентов оптических направлений подготовки и специальностей:
200200.62, 200203.65, 200204.65, 140400.62, 200201.65.

Рекомендовано к печати Советом факультета оптико-информационных систем и технологий, протокол № 6 от 10 февраля 2009 г.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2009 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, 2009

©Иванова Т.В., 2009

Введение

В данном пособии рассматриваются лабораторные работы, которые проводятся по курсу «Основы оптики». Теоретический материал по курсу «Основы оптики» изложен в пособии [1], а практические занятия – в пособии [3, 4].

В системе дистанционного обучения ДО ИТМО имеется электронная версия конспекта, описания лабораторных работ и практических занятий, а также аттестующие и обучающие тесты по дисциплине [2]. На сайте кафедры ПиКО (<http://aco.ifmo.ru>) также имеется электронная версия конспекта лекций, описания лабораторных и практических занятий.

Лабораторные работы проводятся при помощи программного комплекса OPAL-PC. В описании лабораторных работ приводятся задание для работы, подробное описание и пример выполнения лабораторной работы и выполнения отчета, индивидуальные задания и перечень вопросов для защиты лабораторной работы. Также приводятся ссылки на те разделы теоретического материала, которые необходимо изучить перед выполнением лабораторной работы.

В системе дистанционного обучения ДО ИТМО имеются обучающие тесты к каждой лабораторной работе, включающие в себя теоретический материал, необходимый для выполнения данной работы. В качестве допуска к выполнению лабораторной работы необходимо выполнить тест либо устно ответить на вопросы преподавателя.

В приложении 1 пособия содержатся примеры выполнения отчета. В электронной версии пособия (в системе ДО ИТМО и на сайте кафедры ПиКО) имеются варианты заданий к лабораторным работам в формате PDF, включающие в себя шаблон отчета.

В приложении 2 приводится краткое описание работы с программным комплексом OPAL-PC.

Лабораторная работа №1. Знакомство с программой OPAL-PC

Цель работы: Знакомство с программой OPAL-PC, закрепление знаний правила знаков, приобретение практических навыков создания оптической системы.

Подробное описание программы OPAL-PC приводится в приложении 2 «Описание работы с программой OPAL-PC».

1.1. Задание для работы

Создать 8 оптических систем с разными типами линз. Каждую систему сохранить в отдельном файле и показать преподавателю.

1.1.1. Линзы с одной плоской поверхностью

Плоско-выпуклая $\Phi > 0$	Выпукло-плоская $\Phi > 0$	Плоско-вогнутая $\Phi < 0$	Вогнуто-плоская $\Phi < 0$

Для линз, у которых одна поверхность плоская, главная плоскость проходит через вершину неплоской поверхности.

1.1.2. Линзы-мениски

Выпукло-вогнутый собирающий мениск $\Phi > 0$	Вогнуто-выпуклый собирающий мениск $\Phi > 0$	Выпукло-вогнутый рассеивающий мениск $\Phi < 0$	Вогнуто-выпуклый рассеивающий мениск $\Phi < 0$
$ r1 < r2 $	$ r1 > r2 $	$ r1 > r2 $	$ r1 < r2 $

1.2. Пример выполнения работы

1.2.1. Создание оптической системы

Прежде всего, необходимо создать оптическую систему с заданными параметрами. Подробное описание работы с OPAL-PC приведено в приложении 2 «Описание работы с программой OPAL-PC». Создать новую оптическую систему можно при помощи пункта «Файл / Новая оптическая система». Диффрагму можно поставить на 1-й поверхности и задать заднюю апертуру $A' = 0.1$. Длина волны $e = 0.54607$.

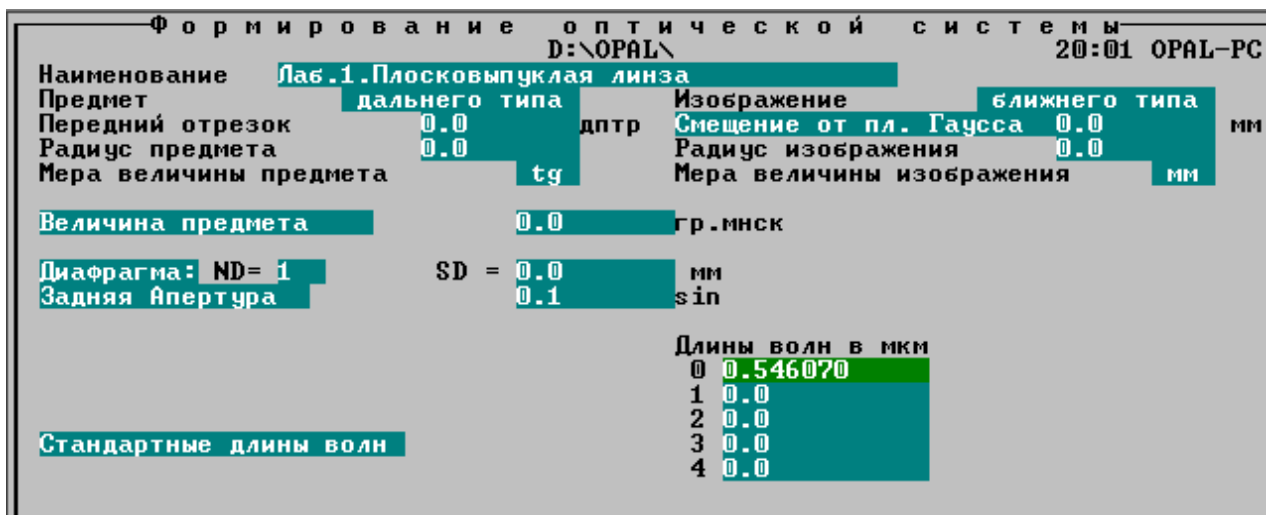


Рис.1.1. Параметры предмета, изображения, диффрагмы.

Конструктивные параметры (пункт «Система / Конструктивные параметры») необходимо записать как показано на рисунке.

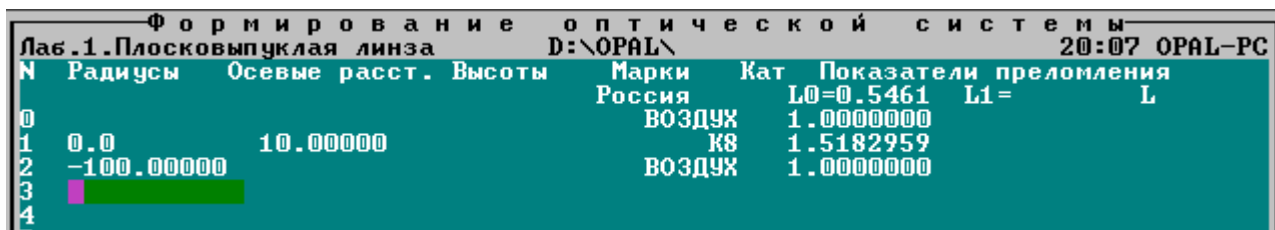


Рис.1.2. Конструктивные параметры.

Марку стекла можно взять K8, показатели преломления стекол вычисляются автоматически по марке стекла.

Значение и знаки радиусов кривизны линзы должны быть такими, чтобы профиль линзы выглядел как в задании.

1.2.2. Просмотр профиля линзы

Профиль линзы можно посмотреть при помощи пункта меню «Анализ Габаритов и aberrаций / Ход лучей в оптической системе».

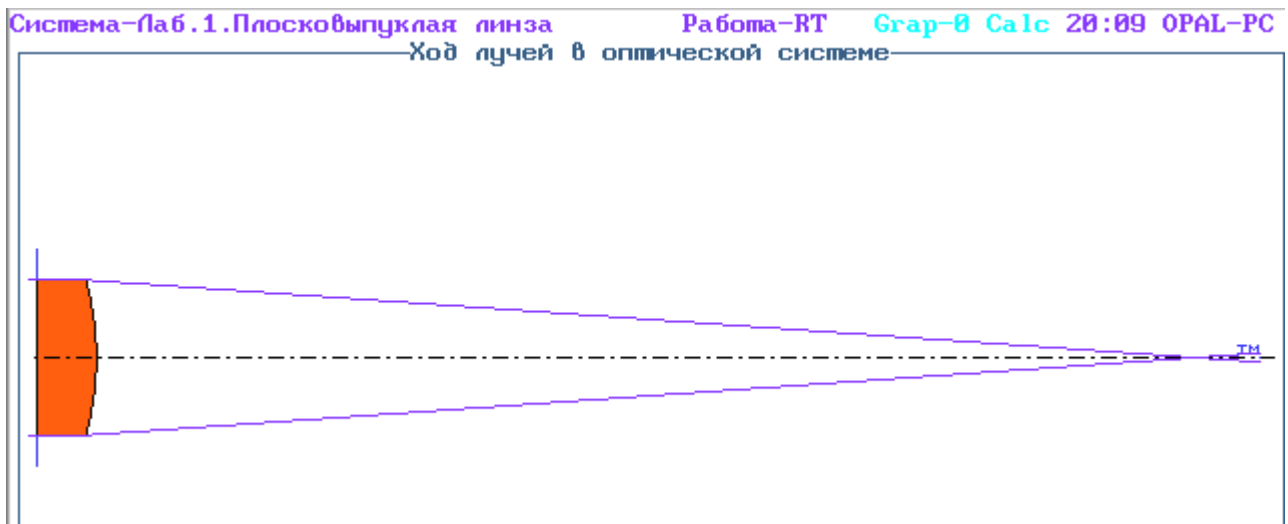


Рис.1.3. Ход лучей в линзе.

1.2.3. Сохранение оптической системы

Сохранить оптическую систему можно при помощи пункта меню «**Файл / Запись оптической системы**».

Лабораторная работа №2. Определение параксиальных параметров склеенного объектива

Цель работы: углубление знаний по разделу «Идеальные оптические системы», приобретение практических навыков расчета характеристик оптических систем в параксиальной области.

2.1. Задание для работы

1. По заданным конструктивным параметрам (радиусы поверхностей, толщины, марки оптических материалов) определить параксиальные характеристики (f' , f , S'_F , S_F , S'_H , S_H) склеенного объектива и его компонентов.
2. Используя соотношения для идеальной оптической системы определить передний отрезок S , задний отрезок S' , и увеличение β склеенного объектива. Проверить с помощью программы OPAL правильность решения.
3. Определить линейное увеличение первой линзы β_1 и положение ее изображения S'_1 , приняв передний отрезок первой линзы равным переднему отрезку объектива ($S_1 = S_{об}$).
4. Определить линейное увеличение второй линзы β_2 и положение ее изображения S'_2 , приняв передний отрезок второй линзы равным заднему отрезку первой линзы ($S_2 = S'_1$).
5. Построить изображение графически через объектив и через каждую линзу в отдельности.

2.2. Краткие теоретические сведения

Теоретические сведения, необходимые для выполнения работы приведены в главе «5. Геометрическая теория оптических изображений» пособия [1].

Для проверки теоретических знаний, необходимых для выполнения данной работы, можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№2. Определение параксиальных параметров склеенного объектива».

2.3. Пример выполнения работы

2.3.1. Создание оптической системы

Прежде всего, необходимо создать оптическую систему с заданными параметрами в программе для расчета оптических систем (например, OPAL-PC). Подробное описание работы с OPAL-PC приведено в приложении 2 «Описание работы с программой OPAL-PC». Создать новую оптическую систему можно при помощи пункта «Файл / Новая оптическая система». Предмет и изображение для данного типа системы должны быть ближнего

типа. Диафрагму можно поставить на 2-й поверхности и задать заднюю апертуру $A' = 0.1$. Длина волны $e = 0.54607$.

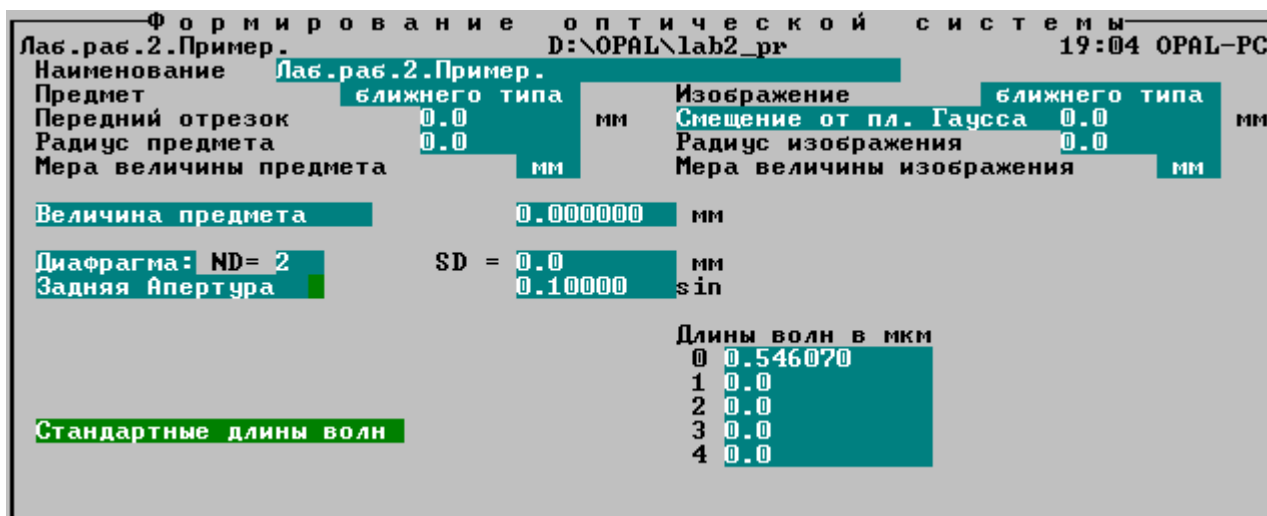


Рис.2.1. Параметры предмета, изображения, диафрагмы.

Конструктивные параметры (пункт «Система / Конструктивные параметры») необходимо записать (в соответствии со своим вариантом) как показано на рисунке 2.2.

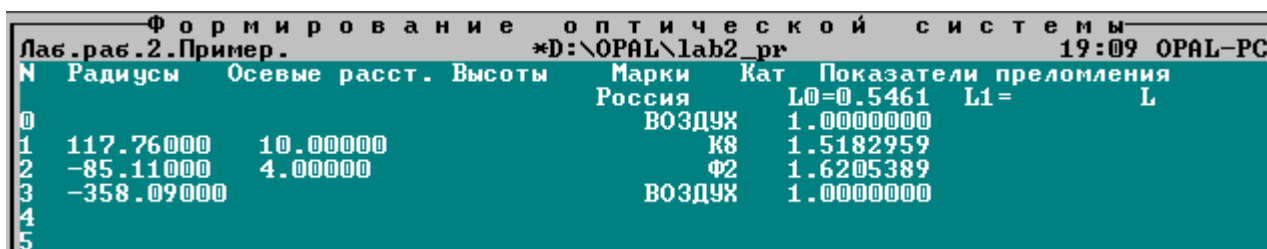


Рис.2.2. Конструктивные параметры.

В OPAL-PC показатели преломления стекол вычисляются автоматически по марке стекла.

2.3.2. Определение паракиальных характеристик объектива

Значение паракиальных характеристик можно посмотреть в программе OPAL (пункт «Система / Паракиальные характеристики») или вычислить самостоятельно (приложение «Вычисление и отображение паракиальных характеристик оптической системы» электронного учебника [2]). Значение паракиальных характеристик для заданной оптической системы показано на рисунке.

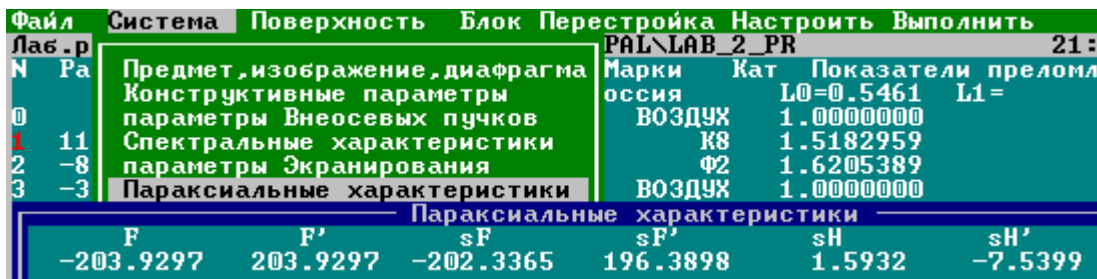


Рис.2.3. Паракиальные характеристики.

2.3.3. Определение параксиальных характеристик отдельных линз

Параксиальные характеристики отдельных линз вычисляются аналогично параксиальным характеристикам объектива, при условии, что **линзы находятся в воздухе** (показатель преломления до линзы и после линзы должен быть равен единице).

Первая линза

Конструктивные параметры:

Формирование оптической системы						
Лаб. раб. 2. Пример. *D:\OPAL\lab2_pr						
N	Радиусы	Осевые расст.	Высоты	Марки	Кат	Показатели преломления
0				Россия	L0=0.5461	1.0000000
1	117.76000	10.00000		ВОЗДУХ	K8	1.5182959
2	-85.11000	4.00000		ВОЗДУХ		1.0000000
3						
4						
5						

Рис.2.4. Конструктивные параметры первой линзы.

Значение параксиальных характеристик:

Параксиальные характеристики					
F	F'	sF	sF'	sH	sH'
-96.9511	96.9511	-93.0625	94.1407	3.8886	-2.8105

Рис.2.5. Значение параксиальных характеристик первой линзы.

Вторая линза

Конструктивные параметры:

Формирование оптической системы						
Лаб. раб. 2. Пример. *D:\OPAL\lab2_pr 19:15 OPAL-PC						
N	Радиусы	Осевые расст.	Высоты	Марки	Кат	Показатели преломления
0				Россия	L0=0.5461	L1= L
1	-85.11000	4.00000		ВОЗДУХ	Ф2	1.6205389
2	-358.09000			ВОЗДУХ		1.0000000
3						
4						
5						

Рис.2.6. Конструктивные параметры второй линзы.

Параксиальные характеристики					
F	F'	sF	sF'	sH	sH'
180.9325	-180.9325	180.1586	-184.1887	-.7739	-3.2562

Рис.2.7. Значение параксиальных характеристик второй линзы.

2.3.4. Определение S , S' , β объектива

Кроме конструктивных параметров в индивидуальном задании дается одна из следующих характеристик:

- линейное увеличение объектива β ;
- расстояние от задней главной плоскости до изображения a' ;
- расстояние от последней поверхности объектива до изображения S'

Зная параксиальные характеристики, можно вычислить положение предмета, изображения и линейное увеличение по формулам идеальной оптической системы.

При вычислениях следует обратить внимание, на то, что передний и задний отрезки S и S' (для близкого предмета и изображения) – это расстояние от первой/последней поверхности объектива до предмета/изображения. Таким образом, передний и задний отрезки S и S' можно выразить через отрезки z и z' :

$$S = z + S_F,$$

$$S' = z' + S'_F.$$

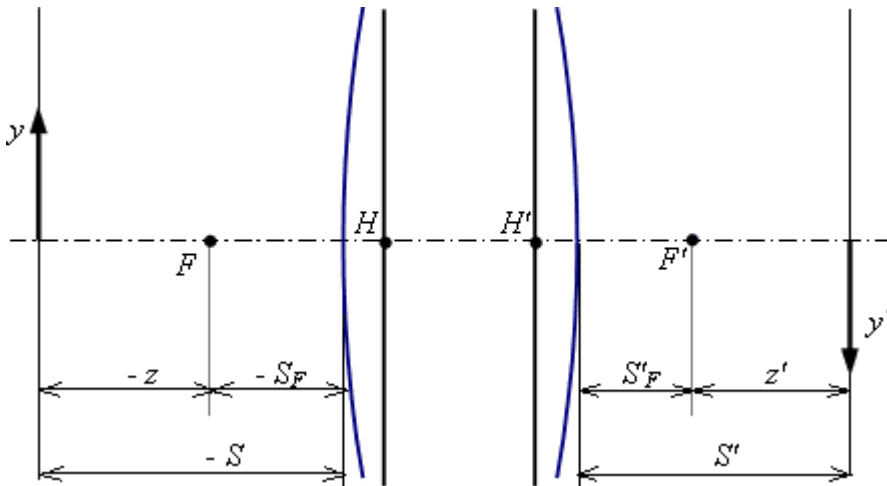


Рис.2.8. Передний и задний отрезки.

Вычисления:

$$\beta = -\frac{f}{z}, \text{ следовательно } z = -\frac{f}{\beta} = \frac{203.930}{3} = 67.977 \text{ мм};$$

$$\beta = -\frac{z'}{f'}, \text{ следовательно } z' = -f' \cdot \beta = -203.930 \cdot 3 = -611.789 \text{ мм};$$

$$S = z + SF = 67.977 - 202.337 = -134.36 \text{ мм};$$

$$S' = z' + SF' = -611.789 + 196.390 = -415.399 \text{ мм}.$$

2.3.5. Проверка правильности вычислений для объектива

Теперь можно проверить правильность проведенных вычислений при помощи программы OPAL. Если задать вычисленный передний отрезок, то увеличение и задний отрезок, приведенные в пункте «Параксиальные характеристики», должны совпасть с вычисленными (допускается погрешность вычислений не более чем во 2-м знаке после запятой).

В данном случае, если задать передний отрезок $S = -134.36$ мм, то увеличение $\beta = 3.000^\times$, а задний отрезок $S' = 415.400$ мм.

Параксиальные характеристики							
F	F'	s _F	s _{F'}	s _H	s _{H'}	L	
-203.9297	203.9297	-202.3365	196.3898	1.5932	-7.5399	-401.40	
s	s'	s'G	U	s _P	s _{P'}		
(мм)	(мм)	(мм)		(дптр)	(дптр)		
0	-134.36000	-415.40011	-415.40011	3.00000	7.08502	2.42177	

Рис.2.9. Параксиальные характеристики объектива.

2.3.6. Определение S' и β для первой линзы

Задний отрезок и линейное увеличение первой линзы вычисляются так же, как и для всего объектива, но исходными данными служит значение переднего отрезка, который принимают равным переднему отрезку всего объектива:

$$S_1 = S = -134.36 \text{ мм}.$$

Вычисления:

$$z_1 = S_1 - SF_1 = -134.36 + 93.063 = -41.297 \text{ мм};$$

$$\beta_1 = -\frac{f_1}{z_1} = -\frac{-96.951}{-41.297} = -2.348^\times;$$

$$z'_1 = -f'_1 \cdot \beta_1 = -96.951 \cdot (-2.348) = 227.605 \text{ мм};$$

$$S'_1 = z'_1 + SF'_1 = 227.605 + 94.141 = 321.746 \text{ мм}.$$

2.3.7. Определение S' и β для второй линзы

Задний отрезок и линейное увеличение первой линзы вычисляются так же, как и для первой линзы. Передний отрезок второй линзы принимают равным заднему отрезку первой линзы:

$$S_2 = S'_1 = 321.746 \text{ мм}.$$

Вычисления:

$$z_2 = S_2 - SF_2 = 321.746 - 180.159 = 141.587 \text{ мм};$$

$$\beta_2 = -\frac{f_2}{z_2} = -\frac{180.933}{141.587} = -1.278^\times;$$

$$z'_2 = -f'_2 \cdot \beta_2 = 180.933 \cdot (-1.278) = -231.211 \text{ мм};$$

$$S'_2 = z'_2 + SF'_2 = -231.211 - 184.189 = -415.400 \text{ мм}.$$

2.3.8. Проверка правильности вычислений для отдельных линз

Если вычисление заднего отрезка первой и второй линзы были проведены без ошибок, то задний отрезок второй линзы должен совпасть с задним отрезком всей системы:

$$S'_2 = -415.400 \text{ мм}, S' = -415.399 \text{ мм}.$$

Если вычисление линейного увеличения первой и второй линзы были проведены без ошибок, то должно выполняться соотношение $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$, где β – увеличение всей системы, β_1 , β_2 – увеличения первой и второй линзы:

$$\beta = 3.000^\times, \beta_1 \cdot \beta_2 = -2.348 \cdot -1.278 = 3.000^\times.$$

2.4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

1. Рассчитанные параксиальные характеристики склеенного объектива и каждой линзы в отдельности.
2. Расчеты по формулам идеальной оптической системы на основании заданных в индивидуальном задании исходных данных для склеенного объектива и отдельных линз.
3. Чертежи объектива и отдельных линз с указанием положения и численного значения кардинальных точек и отрезков (3 чертежа).
4. Чертежи с указанием переднего и заднего отрезков и графическим построением изображения через склеенный объектив и через каждую линзу в отдельности (3 чертежа).

Пример выполнения отчета приводится в приложении 1.

2.4.1. Графическое построение изображения через объектив и его компоненты

При построении изображения положение предмета определяется вычисленным передним отрезком, размер предмета произвольный. После выполнения построений положение изображения должно совпасть с вычисленным задним отрезком.

Правила графического построения изображения подробно рассматриваются в пособии [3, 4] (глава «Построение хода лучей в оптической системе») и в электронном учебнике [2] (раздел практических занятий «Построение хода лучей в оптической системе» и приложение «Построение хода лучей через тонкие компоненты»).

2.5. Индивидуальные варианты задания

	r1	r2	r3	d1	d2	Марка стекла	Марка стекла	Исходные данные
1	60.21	-44.25	-129.30	8.00	2.90	К8	ТФ1	$a' = 25.0$
2	51.94	-20.51	-103.39	4.50	1.50	ТК2	Ф2	$\beta = -1.2^x$
3	67.12	-54.54	-237.90	3.50	2.00	БФ13	ТФ10	$s' = 40.6$
4	36.31	-24.16	-80.54	4.00	1.50	ТК2	Ф2	$\beta = -0.7^x$
5	60.61	-46.98	-126.20	5.00	3.50	К14	ТФ3	$s' = 70.1$
6	63.83	-47.53	-179.40	3.50	2.00	БК10	ТФ3	$\beta = 2.0^x$
7	69.90	-30.55	-185.57	4.30	1.60	ТК2	Ф2	$s' = 50.6$
8	42.26	24.37	∞	1.20	1.60	ТФ1	К8	$a' = 50.6$
9	61.62	-44.40	∞	7.00	2.00	ТК2	Ф2	$\beta = 0.6^x$
10	83.45	36.98	-209.31	2.00	3.50	Ф2	К8	$\beta = 0.7^x$
11	51.94	-20.51	-109.39	4.50	1.50	ТК2	Ф2	$\beta = 0.7^x$
12	52.36	30.20	∞	1.50	2.00	ТФ1	К8	$\beta = 0.8^x$
13	88.56	-63.50	-219.48	8.50	2.90	К8	ТФ1	$s' = 50.1$
14	81.25	44.41	-271.85	2.50	8.00	ТФ1	К8	$a' = 40.3$
15	73.28	39.08	-433.50	1.90	6.20	ТФ1	К8	$\beta = 2.0^x$
16	78.29	41.72	-469.70	2.00	4.00	ТФ1	К8	$a' = 40.3$
17	117.76	-85.11	-358.09	10.00	4.00	К8	Ф2	$\beta = 2.0^x$
18	108.34	55.28	-364.42	3.00	9.00	ТФ1	К8	$\beta = 0.5^x$
19	163.27	73.99	-83.09	2.50	7.00	БФ12	БК8	$s' = 200.0$
20	36.31	-24.16	-80.54	4.00	1.50	ТК2	Ф2	$\beta = 2.5^x$
21	51.94	-20.51	-109.34	4.50	1.50	ТК2	Ф2	$\beta = -0.9^x$
22	54.04	-42.33	-146.25	5.70	1.90	К8	ТФ1	$\beta = 0.5^x$
23	60.61	46.98	-126.20	5.00	3.50	К14	ТФ3	$a' = 35.0$
24	60.21	-44.25	-129.30	8.00	2.90	К8	ТФ2	$s' = 55.0$
25	36.30	-24.16	-80.54	4.00	1.50	ТК2	Ф2	$\beta = -2.5^x$
26	60.21	-44.25	-129.30	8.00	2.90	К8	ТФ2	$a' = 25.0$
27	67.12	-54.54	-237.90	3.50	2.00	БФ13	ТФ10	$\beta = 2.0^x$
28	28.53	-41.32	-152.07	3.00	1.70	БК10	ТФ3	$\beta = -2.0^x$
29	48.60	-38.36	-127.34	3.00	1.50	БК10	ТФ4	$a' = 30.0$
30	37.40	-47.53	-179.40	3.50	2.00	БК10	ТФ3	$\beta = -1.5^x$

2.6. Вопросы для защиты

1. Кардинальные точки и отрезки, передний и задний отрезки, отрезки a , a' , z , z' (определения, обозначения).
2. Угловое, продольное, линейное увеличение (определения, основные соотношения).

Все определения можно посмотреть в глоссарии электронного учебника [2].

Для защиты лабораторной работы можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№2. Определение параксиальных параметров склеенного объектива».

Лабораторная работа №3. Ограничение пучков лучей в оптических системах

Цель работы: углубление знаний по разделу «Ограничение пучков лучей в оптических системах». Приобретение практических навыков в определении положения входного и выходного зрачков.

3.1. Задание для работы

В соответствии с индивидуальным заданием разобраться с ограничением пучков лучей в заданном объективе и выполнить необходимые расчеты. Определить положение и диаметры апертурной диафрагмы, входного и выходного зрачков.

Все расчеты по определению положения зрачков выполнить самостоятельно, задавая диафрагму как предмет и находя ее изображение в пространстве изображений через последующую часть системы в прямом ходе лучей, и ее изображение в пространстве предметов через предшествующую часть системы в обратном ходе лучей.

Данные о положении входного и выходного зрачков в объективе, которые приводятся в программе OPAL, использовать только для проверки собственных расчетов.

3.2. Краткие теоретические сведения

Теоретические сведения, необходимые для выполнения работы приведены в главе «7. Реальные оптические системы. Ограничения пучков», в параграфе «7.2. Ограничения пучков лучей» пособия [1].

Относительное отверстие

Относительное отверстие – это абсолютное значение отношения диаметра входного зрачка к заднему фокусному расстоянию системы D/f' . Относительное отверстие принято выражать в виде дроби $1:k$ (например, $1:3.5$), где k – **диафрагменное число** (величина, обратная относительному отверстию):

$$D/f' = 1:k.$$

Телецентрический ход

Если апертурная диафрагма установлена в задней фокальной плоскости оптической системы, то главный луч в пространстве предметов пойдёт параллельно оптической оси. Такой ход главного луча называют **телецентрическим в пространстве предметов**.

Если апертурная диафрагма установлена в передней фокальной плоскости оптической системы, то главный луч в пространстве изображений пойдёт параллельно оптической оси. Такой ход главного луча называют **телецентрическим в пространстве изображений**.

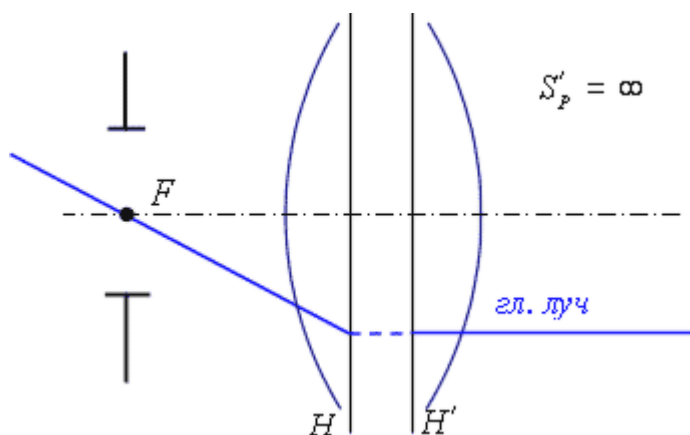


Рис.3.1. Телецентрический ход луча.

Для проверки теоретических знаний, необходимых для выполнения данной работы, можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№3. Ограничение пучков лучей в оптических системах».

3.3. Пример выполнения работы

Рассмотрим пример выполнения лабораторной работы.

3.3.1. Задание

Конструктивные параметры:

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	Стекло
1	37,11	7,5	ТК23
2	∞	9,2	
3	-60,81	2,8	Ф4
4	37,67	9,6	
5	123,31	6,0	ТК20
6	-47,42		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 2.9 мм от 4-ой поверхности. Относительное отверстие объектива 1:2.8. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 24^\circ$.

3.3.2. Создание оптической системы

Прежде всего, необходимо создать оптическую систему с заданными параметрами в программе для расчета оптических систем (например, OPAL-PC). Подробное описание работы с OPAL-PC приведено в приложении 2 «Описание работы с программой OPAL-PC». Создать новую оптическую систему можно при помощи пункта «Файл / Новая оптическая система». Предмет находится в бесконечности (дальнего типа), изображение – ближнего типа. Угловое поле $2\omega = 24^\circ$, следовательно, величина предмета $\omega = 12^\circ$. Диафрагма находится после 4-ой поверхности, на расстоянии 2.9 мм. Переднюю апертуру можно сосчитать, зная относительное отверстие, но для этого нужно знать фокусное расстояние, поэтому вначале можно задать произвольную величину передней апертуры (например, 10 мм), а после

выполнения вычислений заменить ее правильным значением. Длина волны $e = 0.54607$.

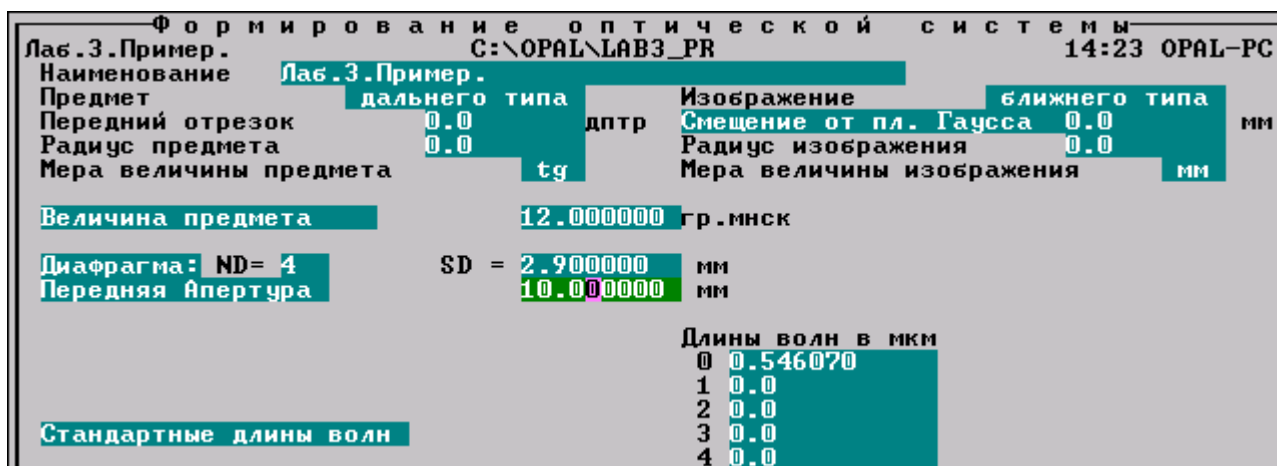


Рис.3.2. Параметры предмета, изображения, диафрагмы.

После задания конструктивных параметров (пункт «Система / Конструктивные параметры») можно посмотреть значение параксиальных характеристик (пункт «Система / Параксиальные характеристики»).



Рис.3.3. Параксиальные характеристики.

3.3.3. Определение диаметра входного зрачка

Поскольку задано относительное отверстие объектива $D/f' = 1:2.8$, то зная фокусное расстояние объектива, можно найти диаметр входного зрачка D :

$$D = f' / 2.8 = \frac{100.267}{2.8} = 35.8 \text{ мм.}$$

Теперь в OPAL-е можно задать правильную переднюю апертуру. Передняя апертура для предмета дальнего типа – это половина диаметра входного зрачка:

$$A = \frac{D}{2} = \frac{35.8}{2} = 18 \text{ мм.}$$

3.3.4. Первая часть системы (до апертурной диафрагмы)

По определению, входной зрачок – изображение апертурной диафрагмы через предшествующую часть системы в обратном ходе лучей, а выходной

зрачок – изображение апертурной диафрагмы через последующую часть системы. Поэтому, для того чтобы найти положение и диаметры входного и выходного зрачков, надо разделить оптическую систему на две части:

- первая часть – часть системы, расположенная до апертурной диафрагмы;
- вторая часть – часть системы, расположенная после апертурной диафрагмы.

Рассмотрим первую часть системы (с 1 по 4 поверхность). Чтобы определить ее параксиальные характеристики, можно выделить нужные поверхности (клавиша «F7»), тогда параксиальные характеристики будут относиться только к этой части системы.

Файл	Система	Поверхность	Блок	Перестройка	Настроить	Выполнить
Лаб.3				РАЛ\lab3_pr		18:40 OPAL-PC
N	Pa	Предмет, изображение, диафрагма		Марки	Кат	Показатели преломления
0		Конструктивные параметры		воздух	L0=0.5461	L1 = L
1	37	параметры Внеосевых пучков		TK23	1.0000000	
2	0.	Спектральные характеристики		воздух	1.5914770	
3	-6	параметры Экранирования		Ф4	1.0000000	
		Параксиальные характеристики			Ф4	1.6284713
Параксиальные характеристики						
Блока <1 -4 поверхности >						
	F	F'	sF	sF'	sH	sH' L
	205.6607	-205.6607	289.7162	-157.2644	84.0555	48.3962 19.50

Рис.3.4. Параксиальные характеристики первой части объектива.

3.3.5. Определение положения входного зрачка

Рассмотрим апертурную диафрагму как предмет, а входной зрачок как ее изображение через первую часть системы в обратном ходе. Или, что то же самое, входной зрачок – как предмет, а апертурную диафрагму – как его изображение.

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии $S'_{1Ad} = 2.9$ мм от последней поверхности первой части системы.

Используя формулу отрезков, получим:

$$z'_1 = S'_{1Ad} - SF'_1 = 2.9 + 157.264 = 160.164 \text{ мм},$$

$$-\frac{z'_1}{f'_1} = -\frac{f_1}{z_1} = \beta_1, \text{ следовательно,}$$

$$z_1 = \frac{f_1 \cdot f'_1}{z'_1} = \frac{-205.661 \cdot 205.661}{160.164} = -264.081 \text{ мм},$$

$$S_p = z_1 + SF_1 = -264.081 + 289.716 = 25.636 \text{ мм}.$$

3.3.6. Диаметр апертурной диафрагмы

Чтобы найти диаметр апертурной диафрагмы, нужно знать линейное увеличение между входным зрачком и апертурной диафрагмой:

$$\beta_1 = -\frac{z'_1}{f'_1} = -\frac{160.164}{-205.661} = 0.779^\times.$$

Тогда диаметр апертурной диафрагмы:

$$D_{АД} = \beta_1 \cdot D = 0.779 \cdot 35.8 = 27.88 \text{ мм.}$$

3.3.7. Вторая часть системы (после апертурной диафрагмы)

Рассмотрим теперь вторую часть системы, расположенную после апертурной диафрагмы (с 5 по 6 поверхность). Ее параксиальные характеристики.

Файл Система Поверхность Блок Перестройка Настроить Выполнить		PAL\LAB3_PR		12:52 OPAL-PC	
Лаб.3					
N	Pa	Предмет, изображение, диафрагма	Марки	Кат	Показатели преломления
0		Конструктивные параметры	оссия	L0=0.5461	L1= L
1	37	параметры Внеосевых пучков	ВОЗДУХ	1.0000000	
2	0.	Спектральные характеристики	TK23	1.5914770	
3	-6	параметры Экранирования	ВОЗДУХ	1.0000000	
		Параксиальные характеристики	Ф4	1.6284713	
Параксиальные характеристики					
Блока (5 -6 поверхности)					
	F	F'	sF	sF'	sH
	-55.5754	55.5754	-52.8716	54.5356	2.7038
					sH'
					-1.0398
					L
					6.00

Рис.3.5. Параксиальные характеристики второй части объектива.

3.3.8. Положение выходного зрачка

Рассмотрим апертурную диафрагму как предмет, а выходной зрачок – как изображение.

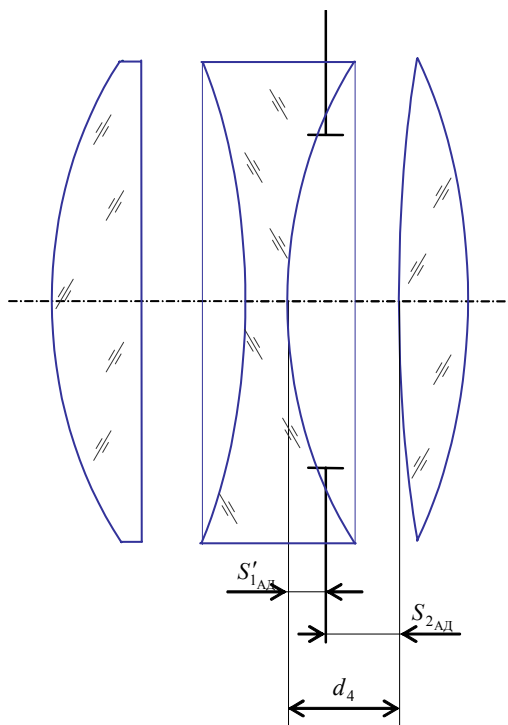


Рис.3.6. Положение входного зрачка.

Передний отрезок (расстояние от апертурной диафрагмы до 4-ой поверхности) можно вычислить, зная расстояние между 1-й и 2-й частями

системы (d_4). Апертурная диафрагма находится на расстоянии $S_{2_{AD}}$ от первой поверхности рассматриваемой части системы:

$$S_{2_{AD}} = S'_{1_{AD}} - d_4 = 2.9 - 9.6 = -6.7 \text{ мм}.$$

Используя формулу отрезков, получим:

$$z_2 = S_{2_{AD}} - SF_2 = -6.7 + 52.871 = 46.172 \text{ мм};$$

$$-\frac{z'_2}{f'_2} = -\frac{f_2}{z_2} = \beta_2, \text{ следовательно,}$$

$$z'_2 = \frac{f_2 \cdot f'_2}{z_2} = \frac{-55.575 \cdot 55.575}{46.172} = -66.892 \text{ мм},$$

$$S'_p = z'_2 + SF'_2 = -66.892 + 54.536 = -12.359 \text{ мм}.$$

3.3.9. Диаметр выходного зрачка

Чтобы найти диаметр выходного зрачка, нужно знать линейное увеличение между апертурной диафрагмой и выходным зрачком:

$$\beta_2 = -\frac{z'_2}{f'_2} = -\frac{-66.892}{55.575} = 1.204^\times.$$

Тогда диаметр выходного зрачка:

$$D' = \beta_2 \cdot D_{AD} = 1.204 \cdot 27.88 = 33.56 \text{ мм}.$$

3.3.10. Проверка правильности вычислений при помощи OPAL-а

Проверим правильность вычислений. Положения зрачков и апертуры можно посмотреть в пункте «Анализ габаритов и аберраций / Габариты пучков». Чтобы положение зрачков для изображения ближнего типа выводилось в мм, необходимо поменять настройки этого пункта как показано на рисунке. Данные необходимо выводить в текстовом режиме (клавиша «F6»). Нас интересуют значения для осевого пучка (на рисунке выделены рамкой).

The screenshot shows the OPAL software interface. The top menu bar includes 'Система-Лаб.3.Пример.', 'Работа-RT', 'Text-0 Menu 13', and 'Edit'. The main menu lists five options, with '4. Габариты пучков' selected. Below the menu, there are two windows. The first window is titled 'Габариты пучков' and shows a table with columns for 'N', 'Апертуры передние', 'Апертуры задние', and 'Положение зрачков (мм)'. The second window is titled 'Габариты пучков' and shows a table with columns for 'N', 'Апертуры передние', 'Апертуры задние', and 'Положение зрачков (мм)'. The table in the second window has the following data:

N	Апертуры передние		Апертуры задние		Положение зрачков (мм)	
	Ax	Ay	Ax'	Ay'	Sp	Sp'
1	18.20	17.98	-.17773	-.17203	26.179	-12.528
0	18.11	18.11	-.18079	-.18079	25.636	-12.359

Рис.3.7. Габариты пучков.

Итак, сравним вычисленные значения положений зрачков с приведенными в OPAL:

$$S_p = 25.636 \text{ мм}, S'_p = -12.359 \text{ мм}.$$

Положения зрачков совпали полностью.

Задняя апертура для изображения ближнего типа определяется через синус апертурного угла $A' = n' \cdot \sin \alpha'$.

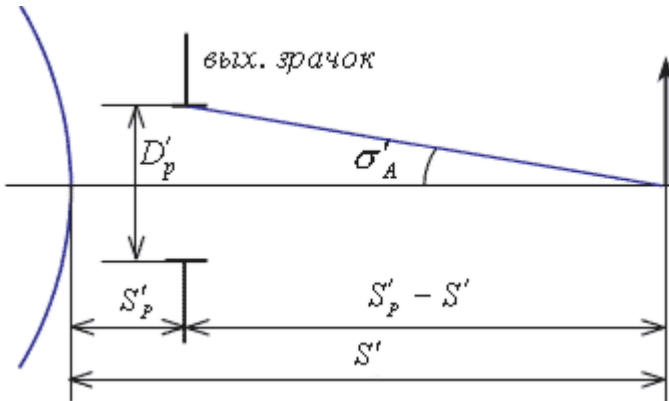


Рис.3.8. Задняя апертура.

Зная диаметр зрачка и положение предмета, можно рассчитать заднюю апертуру:

$$\operatorname{tg} \sigma'_A = \frac{D'}{2 \cdot (S' - S'_p)} = \frac{33.56}{2 \cdot (81.63 + 12.359)} = 0.178531;$$

$$A' = 1 \cdot \sin(\operatorname{arctg} \sigma'_A) = \sin(\operatorname{arctg}(0.178531)) = 0.175752.$$

В OPAL-е значение задней апертуры $A' = -0.18079$. Значение задней апертуры немного отличается из-за того, что в OPAL-е габариты пучков считаются более точно с использованием реальных лучей. Для внеосевого пучка положение зрачков также может немного отличаться от вычисленного из-за аберраций главных лучей.

3.4. Оформление работы

В отчёте должны быть приведены:

1. Последовательность решения задачи и необходимые расчёты.
2. Чертеж объектива с указанием положения и диаметров входного и выходного зрачков, апертурной диафрагмы.
3. Чертежи, иллюстрирующие перенос диафрагмы в пространство предметов и в пространство изображений.
4. Ход апертурного луча и ход главного луча без виньетирования и в присутствии виньетирования.

Пример выполнения отчета и чертежей приводится в приложении 1.

3.4.1. Последовательность решения задачи и необходимые расчёты.

Последовательность решения задачи и необходимые расчёты приведены в примере выполнения отчета.

3.4.2. Чертеж объектива с указанием положения и диаметров зрачков и апертурной диафрагмы

На чертеже в масштабе отображается оптическая система объектива, а также входной и выходной зрачок. Указывается положение входного зрачка S_p и его диаметр D , положение выходного зрачка S'_p и его диаметр D' , а также положение $S_{АД}$ и диаметр $D_{АД}$ апертурной диафрагмы.

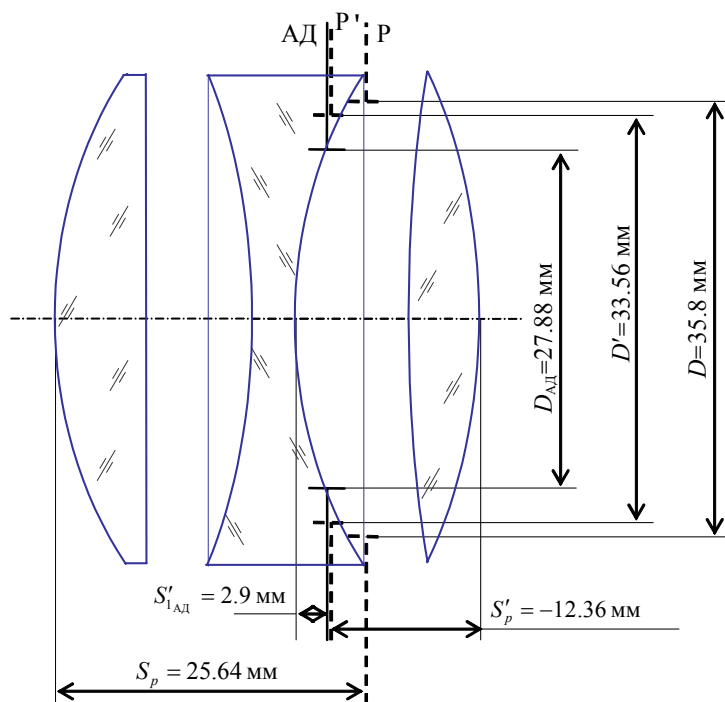


Рис.3.9. Чертеж объектива.

3.4.3. Чертежи, иллюстрирующие перенос диафрагмы в пространство предметов и в пространство изображений

На первом чертеже в масштабе отображается первая часть оптической системы, с обозначением главных и фокальных плоскостей. В качестве предмета берется апертурная диафрагма и графически строится ее изображение через первую часть системы в обратном ходе лучей. Изображение должно совпасть с входным зрачком.

На втором чертеже в масштабе отображается вторая часть оптической системы, с обозначением главных и фокальных плоскостей. В качестве предмета берется апертурная диафрагма и графически строится ее изображение через вторую часть системы в прямом ходе лучей. Изображение должно совпасть с выходным зрачком.

Правила графического построения изображения (в том числе в обратном ходе лучей) подробно рассматриваются в практическом занятии «Построение хода лучей в оптической системе» пособия [3,4] и приложении «Построение хода лучей через тонкие компоненты» электронного учебника [2].

3.4.4. Построение хода апертурного и главного реальных лучей

Координаты апертурного и главного реальных лучей можно посмотреть в пункте «Анализ габаритов и аберраций / Ход лучей в оптической системе». В таблице показаны высоты луча на каждой поверхности.

Система-Лаб.3.Пример. Работа-RT Text-0 View 13:11 OPAL-PC

Ход лучей в оптической системе

N Пов	Апертурн ос. пучка	Главный	П у ч о к		N 1		Боковой	Световые высоты	Стрелки
			Верхний	Нижний	Y =	Y			
1	18.114	5.478	21.336	-14.639	12.0000	3.335	21.336	6.747	
2	17.555	4.139	21.049	-14.484	17.671	2.892	21.049	.000	
3	15.153	1.299	16.254	-14.068	15.145	.768	16.254	-2.213	
4	14.494	.804	14.494	-14.494	14.487	-.454	14.494	2.900	
5	15.439	-1.866	13.702	-17.858	15.547	-2.596	17.858	1.300	
6	15.503	-2.816	13.343	-18.061	15.615	-2.948	18.061	-3.574	
Апертурная диафрагма									
4	14.494	.000	14.494	-14.494	14.487	-.454	14.494		

Рис.3.10. Координаты лучей в оптической системе.

Чтобы построить ход главного реального луча при виньетировании, нужно задать виньетирование в пункте меню «Система / параметры Внеосевых пучков».

Файл Система Поверхность Блок Перест

Лаб.3

0 Предмет, изображение, диафрагма

1 Конструктивные параметры

2 параметры Внеосевых пучков

3 Спектральные характеристики

4 параметры Экранирования

5 Параксиальные характеристики

6 параметры Внеосевых пучков

7 ТОЧКИ НА ПРЕДМЕТЕ

8 ВИНЬЕТИРОВАНИЕ

относ.	гр.мсек	верх	низ
1.0000	12.000000	0.25	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0

Рис.3.11. Задание виньетирования.

Теперь можно посмотреть координаты главного реального луча при виньетировании в пункте «Анализ габаритов и аберраций / Ход лучей в оптической системе».

Система-Лаб.3.Пример. Работа-RT Text-0 View 13:15 OPAL-PC

Ход лучей в оптической системе

N Пов	Апертурн ос. пучка	Главный	П у ч о к		N 1		Боковой	Световые высоты	Стрелки
			Верхний	Нижний	Y =	Y			
1	18.114	3.593	20.013	-14.639	12.0000	2.596	20.013	5.859	
2	17.555	2.354	19.421	-14.484	17.640	2.162	19.421	.000	
3	15.153	-.179	14.668	-14.068	15.118	.144	15.153	-1.918	
4	14.494	-.646	13.119	-14.494	14.456	-1.049	14.494	2.900	
5	15.439	-3.440	12.075	-17.858	15.512	-3.243	17.858	1.300	
6	15.503	-4.374	11.600	-18.061	15.577	-3.591	18.061	-3.574	
Апертурная диафрагма									
4	14.494	-1.485	13.046	-14.494	14.456	-1.049	14.494		

Рис.3.12. Координаты лучей в оптической системе в присутствии виньетирования.

Построение хода лучей производится по координатам луча на каждой поверхности.

Построение хода апертурного луча

Апертурный луч в пространстве предметов идет из осевой точки предмета через крайнюю точку входного зрачка. Поскольку предмет находится в бесконечности, апертурный луч идет параллельно оптической оси. Так как входной, выходной зрачки и апертурная диафрагма сопряжены, то апертурный луч должен пройти и через крайнюю точку апертурной диафрагмы и выходного зрачка (на рисунке продолжение апертурного луча, проходящее через край входного и выходного зрачка, обозначается пунктирной линией).

Построение хода главного луча

Теперь построим ход главного луча. Главный луч в пространстве предметов, согласно определению, это луч, идущий из крайней точки предмета в центр входного зрачка. Так как предмет находится в бесконечности, то главный луч нужно провести под углом, соответствующим размеру предмета (в данном случае 12°) в центр входного зрачка. Главный луч в пространстве изображений пройдет из крайней точки изображения в центр выходного зрачка (задний отрезок можно посмотреть в пункте меню «Система / Параксиальные характеристики»). Так как входной, выходной зрачки и апертурная диафрагма сопряжены, то главный луч должен пройти и через центр апертурной диафрагмы. На рисунке продолжение апертурного луча, проходящее через край входного и выходного зрачка, обозначается пунктирной линией. При виньетировании главный луч будет проходить через центр свободной части апертурной диафрагмы.

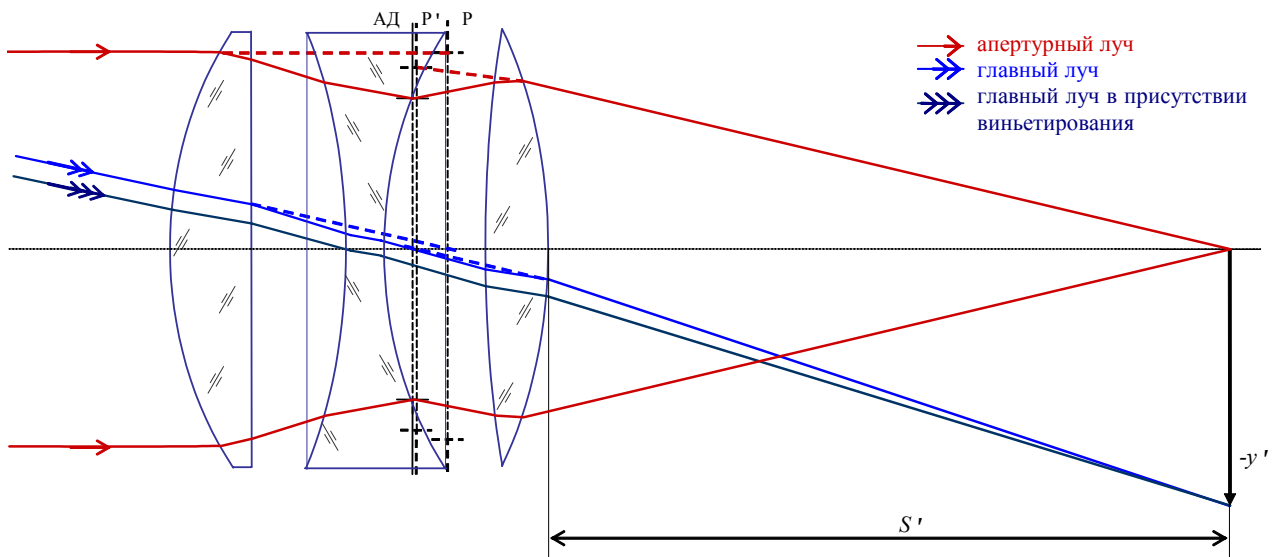


Рис.3.13. Построение хода апертурного и главного лучей.

Вид апертурной диафрагмы для осевой точки и края поля в присутствии виньетирования можно посмотреть в пункте «Анализ габаритов и аберраций / Габариты пучков».

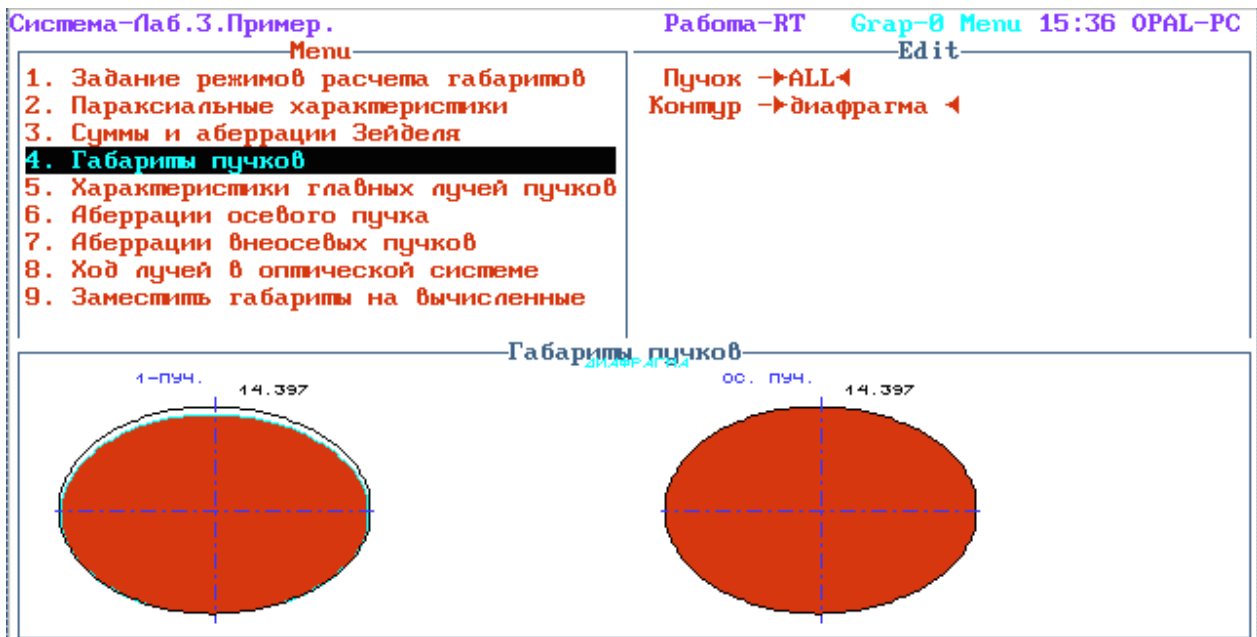


Рис.3.14. Габариты пучков.

3.5. Индивидуальные варианты задания

Вариант №1

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	17,1	2,85	ТК16
2	∞	4,05	
3	-33,57	0,90	ЛФ5
4	14,56	5,05	
5	245,50	0,80	ОФ1
6	15,17	5,10	ТК16
7	-23,53		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 1.88 мм от 4-ой поверхности. Относительное отверстие 1:3.5. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 10^\circ$.

Вариант №2

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	63,326	4,5	БК10
2	342,82	0,3	
3	37,544	10,2	ЛК3
4	-201,148	20,3	Ф6
5	24,110	20,95	
6	62,888	3,1	ТФ8
7	123,34		

Апертурная диафрагма расположена после 5-ой поверхности. Положение входного зрачка $S_p = 83$ мм. Относительное отверстие 1:2. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 5^\circ$.

Вариант №3

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	8,57	2,21	K14
2	8,63	13,78	
3	8,63	2,21	K14
4	-8,57		

Апертурная диафрагма расположена посередине между линзами. Относительное отверстие 1:8. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 20^\circ$.

Вариант №4

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	20,8	11,4	TK16
2	21,6	23,0	
3	-21,6	11,4	TK16
4	-20,8		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 11.5 мм от 2-ой поверхности. Относительное отверстие 1:6. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 60^\circ$.

Вариант №5

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	30,0	5,7	TK16
2	1100,0	6,2	
3	-74,0	1,9	БФ12
4	30,0	10,3	
5	175,0	3,8	TK16
6	-49,0		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 5 мм после 4-ой поверхности. Относительное отверстие 1:5. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 5^\circ$. Виньетирование 10% снизу.

Вариант №6

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	25,29	7,7	TK16
2	-1900,60	6,0	
3	-41,58	4,0	ТФ1
4	21,04	6,0	
5	46,56	7,7	TK16
6	-31,68		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 2 мм после 4-ой поверхности. Относительное отверстие 1:4. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 40^\circ$. Виньетирование 25% сверху.

Вариант №7

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	39,98	12,2	ТК16
2	-30004,9	9,5	
3	-65,739	6,3	ТФ1
4	33,264	9,5	
5	73,613	12,7	ТК16
6	-50,087		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 1.5 мм от 4-ой поверхности. Относительное отверстие 1:2.8. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 30^\circ$.

Вариант №8

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	19,99	6,1	ТК16
2	-1502,45	4,8	
3	-32,87	3,2	ТФ1
4	16,632	4,8	
5	36,807	6,1	ТК16
6	-25,043		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 1.5 мм от 4-ой поверхности. Диаметр входного зрачка $D=19$ мм. Линейное поле в пространстве изображений $2y'=20$ мм.

Вариант №9

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	14,205	7,0	К8
2	33,0	3,0	Ф1
3	15,26	14,5	
4	-15,26	3,0	Ф1
5	-33,0	7,0	К8
6	-14,205		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 7.25 мм от 3-ой поверхности. Относительное отверстие 1:8. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 60^\circ$.

Вариант №10

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	19,03	6,68	К8
2	32,82	2,24	
3	17,18	1,49	Ф13
4	12,59	17,80	
5	-14,33	1,69	Ф13
6	-19,39	2,53	
7	-36,97	7,54	К8
8	-20,48		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 8.9 мм после 4-ой поверхности. Относительное отверстие 1:5.6. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 60^\circ$.

Вариант №11

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	19,56	4,1	ТК23
2	∞	5,02	
3	-33,28	1,48	Ф4
4	19,83	5,44	
5	67,49	3,2	ТК20
6	-26,74		

Апертурная диафрагма совпадает по положению с 1-ой поверхностью. Относительное отверстие 1:5. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 20^\circ$.

Вариант №12

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	-43,85	21,14	Ф1
2	-74,30	5,28	
3	254,1	10,57	БК6
4	-95,94	0,53	
5	118,6	5,28	ТФ3
6	44,36	10,57	БФ7
7	-820,4		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 40 мм перед 1-ой поверхностью. Относительное отверстие 1:5.6. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 24^\circ$.

Вариант №13

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	46,45	5,3	ТК16
2	268,5	0,4	
3	25,94	5,8	БФ13
4	52,0	7,5	К1
5	-264,2	1,8	ТФ2
6	16,444	13,9	
7	-1043,65	2,8	ОФ1
8	44,51	10,6	БФ13
9	-15,03	2,9	БФ7
10	-95,06		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 6.7 мм после 6-ой поверхности. Относительное отверстие 1:2.8. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 28^\circ$.

Вариант №14

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	19,861	5,8	ТК16
2	1445,4	4,6	
3	-32,73	3,4	ТФ1
4	16,368	4,6	
5	36,84	5,8	ТК16
6	-25,06		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 1.6 мм от 4-ой поверхности. Диаметр входного зрачка $D=18$ мм. Линейное поле в пространстве изображений $2y' = 20$ мм.

Вариант №15

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	-8,590	2,22	К14
2	8,670	13,8	
3	-8,670	2,22	К14
4	-8,590		

Апертурная диафрагма расположена посередине между линзами. Относительное отверстие 1:8. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 4^\circ$.

Вариант №16

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	26,82	4,1	1,6130
2	96,76	0,35	
3	17,62	4,05	1,6701
4	35,12	3,55	1,4724
5	∞	1,0	1,6887
6	11,89	5,04	
7	-93,05	2,2	1,5000
8	18,68	11,85	1,6701
9	-47,62		

Апертурная диафрагма расположена посередине между 6-ой и 7-ой поверхностями. Относительное отверстие 1:3.5. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 40^\circ$.

Вариант №17

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	20,80	11,4	ТК16
2	21,63	23,0	
3	-21,63	11,4	ТК16
4	-20,80		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 11.5 мм от 2-ой поверхности. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 51^\circ$. Относительное отверстие 1:6.

Вариант №18

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	127,64	19,8	ТК16
2	430,5	3,92	
3	106,66	20,0	ТК16
4	175,39	10,0	ЛФ9
5	65,77	44,0	
6	-75,68	10,0	ЛФ9
7	177,42	25,0	ТК21
8	-103,04	9,0	
9	-3597,0	24,0	ТК21
10	-191,43	10,0	БФ6
11	-285,1		

Апертурная диафрагма расположена после 5-ой поверхности на расстоянии 22 мм. Относительное отверстие 1:2.8. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 14^\circ$.

Вариант №19

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	-94,41	8,1	СТК9
2	-2312,0	0,1	
3	378,4	3,9	СТК9
4	459,20	10,9	
5	-162,93	2,0	Ф8
6	85,7	24,6	
7	-207,0	2,0	ЛФ9
8	373,3	1,5	
9	309,7	12,2	СТК9
10	-103,76	240,0	
11	∞	4,0	К8
12	∞		

Апертурная диафрагма расположена после 6-ой поверхности на расстоянии 11 мм. Диаметр апертурной диафрагмы 17.72 мм. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 46^\circ$.

Вариант №20

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	-94,41	8,1	СТК9
2	-2312,0	0,1	
3	378,4	3,9	СТК9
4	459,20	10,9	
5	-162,93	2,0	Ф8
6	85,7	24,6	
7	-207,0	2,0	ЛФ9
8	373,3	1,5	
9	309,7	12,2	СТК9
10	-103,76	240,0	
11	∞	4,0	К8
12	∞		

Апертурная диафрагма находится после 6-ой поверхности на расстоянии 11.5 мм. Диаметр апертурной диафрагмы 15 мм. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 30^\circ$.

Вариант №21

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	19,14	3,11	ТК14
2	-81,31	6,32	
3	-19,54	1,56	Ф2
4	22,355	6,66	
5	237,72	2,59	ТК14
6	-22,355		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 3,82 мм от 4-ой поверхности. Диаметр апертурной диафрагмы 12 мм. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 4^\circ$.

Вариант №22

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	19,14	3,11	ТК14
2	-81,31	6,32	
3	-19,54	1,56	Ф2
4	22,355	6,66	
5	237,72	2,59	ТК14
6	-22,355		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 3.8 мм от 4-ой поверхности. Диаметр апертурной диафрагмы 11 мм. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 6^\circ$.

Вариант №23

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	23,751	1,75	ЛФ5
2	20,0	11,2	ТК4
3	41,262	0,14	
4	19,06	1,67	ТФ5
5	14,32	16,46	
6	-13,995	1,31	ТФ5
7	-49,878	0,25	
8	-21,905	11,0	ТК16
9	-24,323	2,2	ЛФ5
10	-23,0		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 8.2 мм от 5-ой поверхности. Диаметр апертурной диафрагмы 8 мм. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 4^\circ$.

Вариант №24

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	82,41	7,6	СТК9
2	-704,7	0,1	
3	570,2	3,7	СТК9
4	335,7	9,6	
5	-143,22	1,9	Ф8
6	81,66	2,5	
7	-254,7	1,9	ЛФ9
8	261,8	1,4	
9	280,5	10,4	СТК9
10	-103,28	226,2	
11	∞	8,0	К8
12	∞		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 10.3 мм от 6-ой поверхности. Диаметр диафрагмы 16.5 мм. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 8^\circ$.

3.6. Вопросы для защиты

5. Апертурная диафрагма, входной и выходной зрачки (определения).
6. Обобщенные апертуры и положения зрачков (определения, обозначения).
7. Главный и апертурный лучи.
8. Виньетирование.

Все определения можно посмотреть в глоссарии электронного учебника [2].

Для защиты лабораторной работы можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№3. Ограничение пучков лучей в оптических системах».

Лабораторная работа №4. Исследование аберраций осевой точки

Цель работы: углубление знаний по разделу «Аберрации оптических систем» и приобретение практических навыков определения аберраций осевого пучка, плоскости наилучшей установки и диаметра пятна рассеяния.

4.1. Задание для работы

1. В соответствии с индивидуальным заданием определить аберрации осевого пучка (поперечные, продольные, волновые, хроматизм и неизопланатизм) склеенного объектива. Составить таблицу аберраций и построить графики.
2. На основании таблиц определить приблизительный диаметр пятна рассеяния для основной длины волны. Определить диаметр пятна рассеяния по точечным диаграммам (для основной длины волны). Сравнить полученные значения.
3. Определить плоскость наилучшей установки, в которой диаметр пятна рассеяния будет минимальным, при помощи фокусируемых диаграмм.
4. Определить примерный диаметр пятна рассеяния, в котором содержится 80% энергии, в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки.

Определить аберрации и построить графики для плоскости наилучшей установки.

4.2. Краткие теоретические сведения

Теоретические сведения, необходимые для выполнения работы приведены в главе «8. Аберрации оптических систем» пособия [1].

Для проверки теоретических знаний, необходимых для выполнения данной работы, можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№4. Исследование аберраций осевой точки».

4.3. Указания по выполнению работы.

Задание:

r1	r2	r3	d1	d2	Марка стекла	Марка стекла	Относительное отверстие
110,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:4

4.3.1. Создание оптической системы

Прежде всего, необходимо создать оптическую систему с заданными параметрами в программе для расчета оптических систем (например, OPAL-PC). Подробное описание работы с OPAL-PC приведено в приложении 2 «Описание работы с программой OPAL-PC». Создать новую оптическую систему можно при помощи пункта «Файл / Новая оптическая система». Предмет находится в бесконечности (дальнего типа), изображение – ближнего

типа. Поскольку в данной работе рассматриваются aberrации осевого пучка, величину предмета можно задать равной нулю. Диафрагму можно поставить на первой поверхности. Длины волн: $e = 0.54607$, $F' = 0.48000$, $C' = 0.64380$.

Переднюю апертуру можно сосчитать, зная относительное отверстие, но для этого нужно знать фокусное расстояние, поэтому вначале можно задать произвольную величину передней апертуры (например, 1 мм), а после выполнения вычислений заменить ее правильным значением.

После задания конструктивных параметров (пункт «Система / Конструктивные параметры») можно посмотреть значение параксиальных характеристик (пункт «Система / Параксиальные характеристики») и вычислить диаметр входного зрачка:

$$D = \frac{f'}{4} = \frac{204.4167}{4} = 51.104 \text{ мм.}$$

Теперь в OPAL-е можно задать правильную переднюю апертуру:

$$A = \frac{D}{2} = \frac{51.104}{2} = 25.552 \text{ мм.}$$

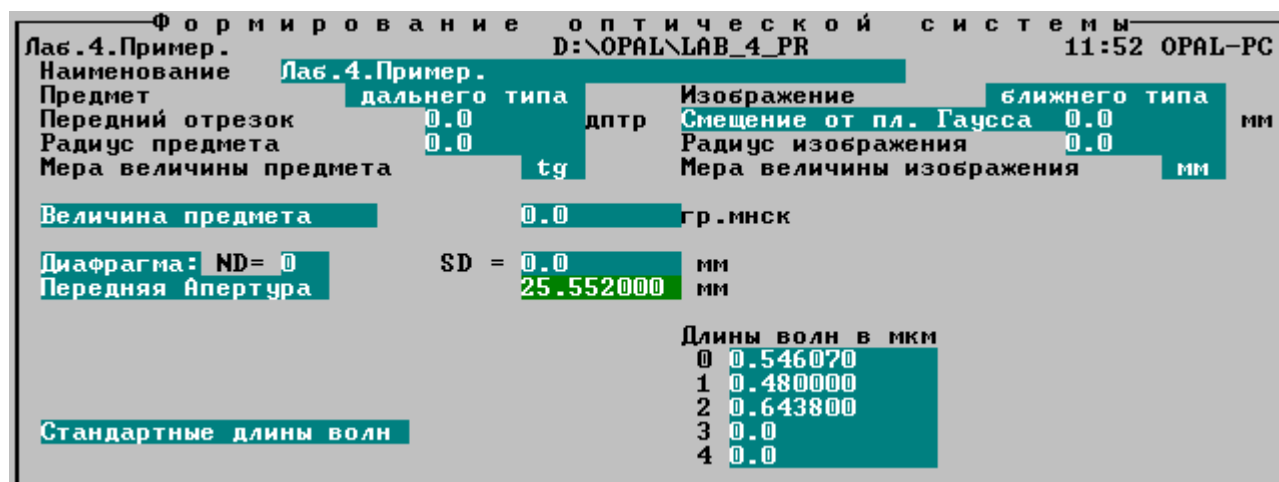


Рис.4.1. Параметры предмета, изображения, диафрагмы.

4.3.2. Определение aberrаций осевого пучка

Aberrации осевого пучка можно посмотреть в пункте «Анализ Габаритов и aberrаций / Aberrации осевого пучка». В текстовом режиме можно посмотреть числовые значения aberrаций, а графическом – графики aberrаций (переключение режимов по клавише «F6»).

В изображении осевой точки, если излучение монохроматическое, присутствует только одна aberrация – сферическая. Если в излучении присутствует несколько длин волн, то возникают также хроматизм положения и сферохроматизм.

Аберрации осевого пучка

Опн. зр -коор.	Продольные аберрации (мм)			Поперечные аберрации (мм)		
	0	1	2	0	1	2
1.000	.44639	.87061	.30286	.054506	.106065	.037013
.866	.21379	.57617	.12062	.022632	.060879	.012777
.707	.06919	.37522	.02199	.005984	.032401	.001902
.500	.00115	.25561	-.00392	.000070	.015614	-.000240
.000	.00000	.20707	.03372	.000000	.000000	.000000

Тг' *100	Волновые аберрации (дл. волн)			Неизопл. (%)	H ЗР (мм)
	0	1	2		
12.211	1.6195	5.7919	.9508	.6805	25.5520
10.586	.5382	3.3985	.2645	.4999	22.1287
8.649	.0834	1.8191	.0455	.3266	18.0680
6.117	-.0158	.7704	.0340	.1601	12.7760
.000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000

Рис.4.2. Текстовый режим.

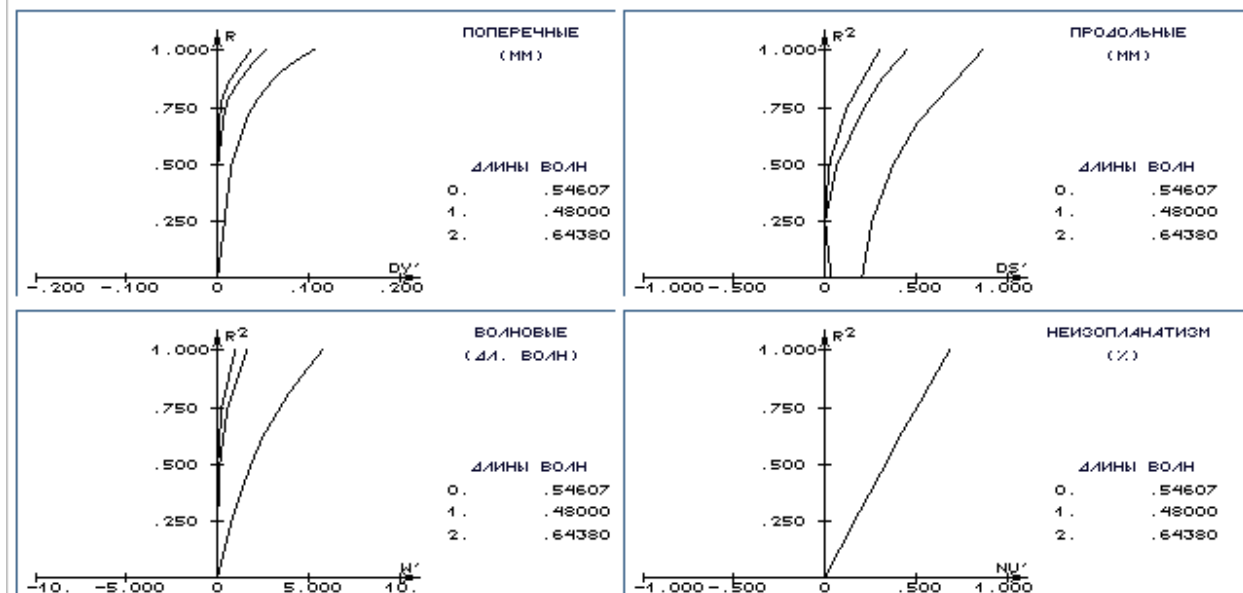


Рис.4.3. Графический режим.

В данной лабораторной работе необходимо определить величину продольной, поперечной и волновой аберраций осевого пучка, хроматизм и неизопланатизм.

Таблица численных значений аберраций оформляется в виде:

отн. зр. коор. ρ	Продольные aberrации $\Delta S'$ (мм)			хроматизм $S'_{F'} - S'_{C'}$	Поперечные aberrации $\Delta y'$ (мм)		
	λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$		λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$
1.000	0.44639	0.87061	0.30286	0.56775	0.054506	0.106065	0.037013
0.866	0.21379	0.57617	0.12062	0.45555	0.022632	0.060879	0.012777
0.707	0.06919	0.37617	0.02199	0.35418	0.005984	0.032401	0.001902
0.500	0.00115	0.25561	-0.00392	0.25953	0.000070	0.015614	-0.000240
0.000	0.00000	0.20707	0.03372	0.17335	0.000000	0.000000	0.000000
отн. зр. коор. ρ	Волновые aberrации W (дл. волн)			неизопл. η	зр. коор. P_y		
	λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$				
1.000	1.6195	5.7919	0.9508	0.6805	25.5520		
.866	0.5382	3.3985	0.2645	0.4999	22.1287		
.707	0.0834	1.8191	0.0455	0.3266	18.0680		
.500	-0.0158	0.7704	0.0340	0.1601	12.7760		
.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

Хроматизм на оси – это хроматизм положения, остальные значения хроматизма – сферохроматизм.

Чтобы сравнить вычисленное значение сферохроматизма с приведенным в OPAL-е, необходимо поменять настройки пункта «Аберрации осевого пучка» как показано на рисунке 4.4. Значения хроматизма положения и сферохроматизма выделены рамкой.

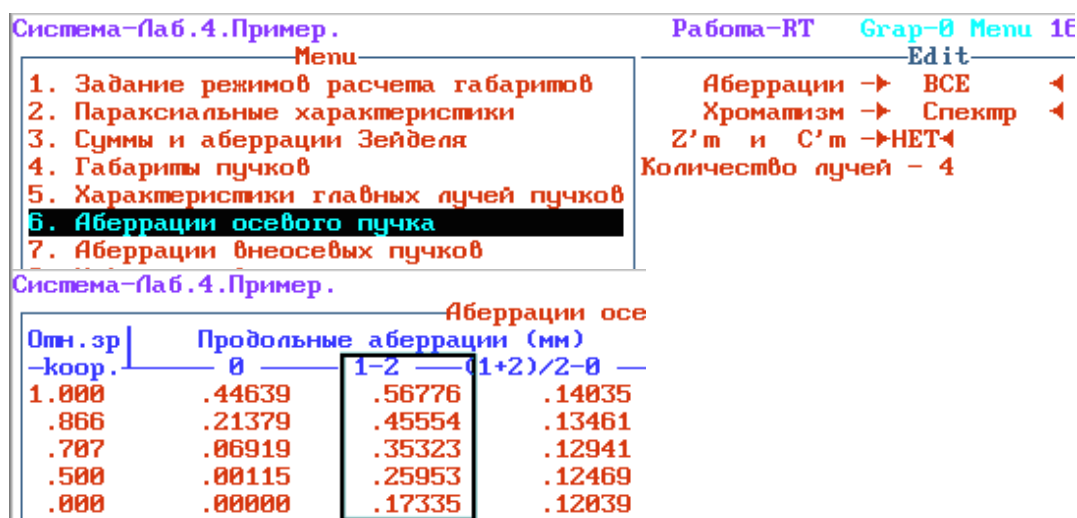


Рис.4.4. Хроматизм положения и сферохроматизм.

4.3.3. Определение диаметра пятна рассеяния

В геометрическом приближении диаметр пятна рассеяния можно определить по максимальной величине поперечной aberrации:

$$d_{n.p.} \approx 2\Delta y'_{\max}.$$

Максимальное (по модулю) значение поперечной aberrации для центральной длины волны $\Delta y'_{\max} = 0.054506$ мм, следовательно, диаметр пятна рассеяния:

$$d \approx 0.109012 \text{ мм}.$$

Более точно определить диаметр пятна рассеяния можно в OPAL-е, пункт «Анализ геометрического изображения / Точечная диаграмма». Чтобы исследовать пятно рассеяния для центральной длины волны, нужно установить параметр «Характеристики <Монохроматические>», и чтобы значение было более точным, установить количество точек на зрачке **1152**.

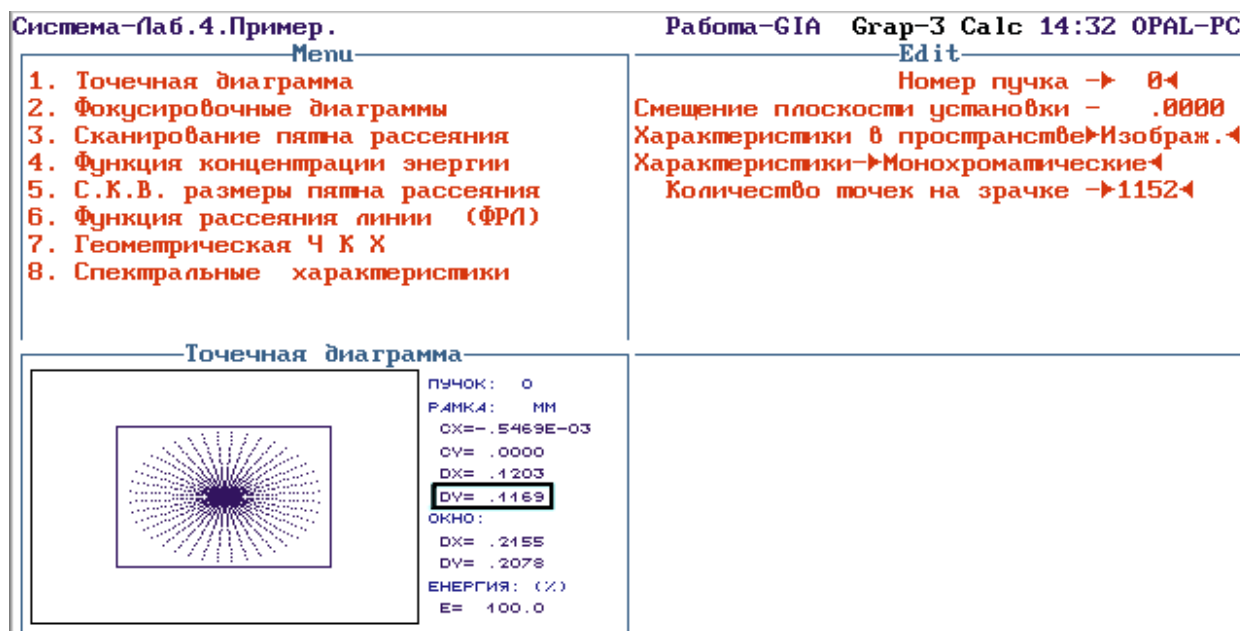


Рис.4.5. Точечная диаграмма.

Изменяя размер рамки (клавиши «+» и «-» на дополнительной клавиатуре), необходимо найти минимальный размер рамки, при котором в нее попадают все лучи. В этом случае диаметр рамки (на рисунке выделено рамкой) будет соответствовать диаметру пятна рассеяния:

$$d \approx 0.1169 \text{ мм.}$$

Диаметр пятна рассеяния, в который попадает 80% энергии, также определяется при помощи рамки (по нажатию клавиши «Enter» вычисляется энергия лучей, попавших в рамку).



Рис.4.6. Определения диаметра пятна рассеяния.

В данном случае, диаметр пятна рассеяния, в который попадает 80% энергии $d \approx 0.05195 \text{ мм}$.

4.3.4. Определение плоскости наилучшей установки

Определить плоскость наилучшей установки можно при помощи пункта «Фокусировочные диаграммы». В настройках необходимо задать начальное

смещение плоскости установки и шаг по расфокусировке, и подобрать их значения таким образом, чтобы найти положение плоскости установки, в котором диаметр пятна рассеяния будет минимальным, с точностью до 0.05 мм.

Вначале можно задать начальное смещение 0 мм, и шаг по расфокусировке 0.1 мм.

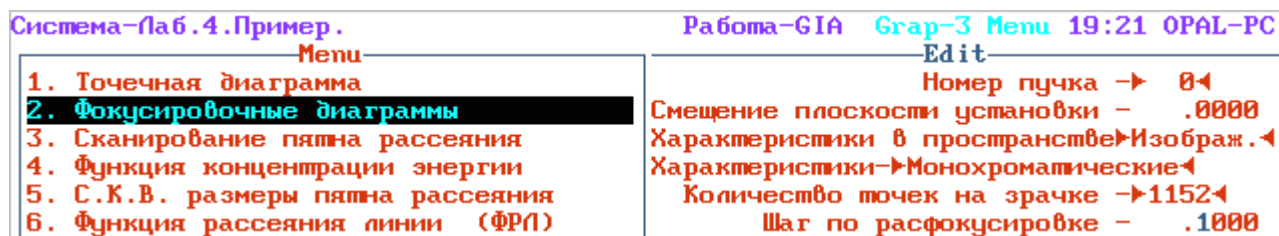


Рис.4.7. Параметры фокусирующих диаграмм.

Затем из рисунка можно определить смещение, при котором диаметр пятна рассеяния будет минимальным. Величина смещения относительно начального для каждого кружка рассеяния приведена в верхней части окна. В данном случае минимальное пятно рассеяния будет при смещении 0.2 мм.

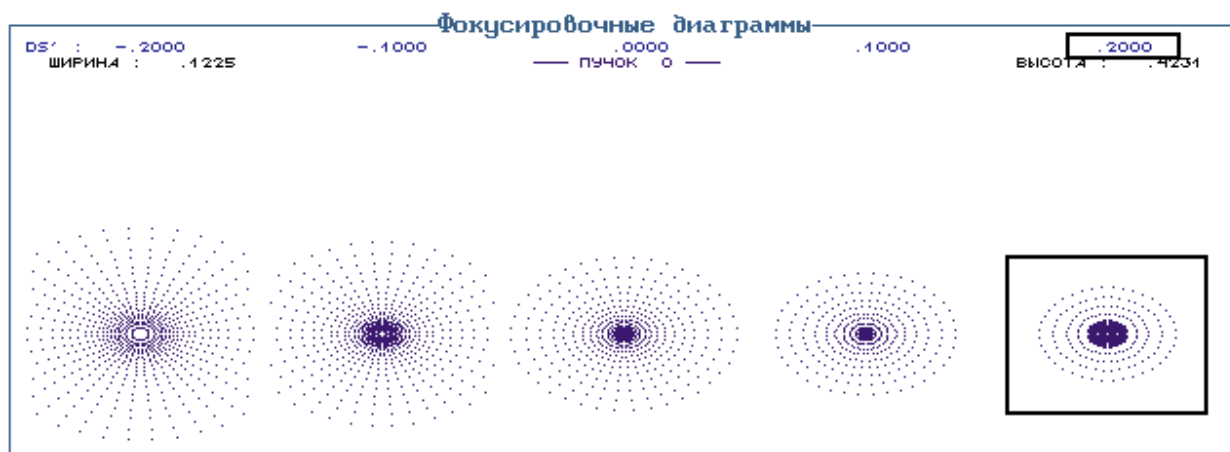


Рис.4.8. Фокусирующие диаграммы без смещения плоскости установки.

Однако, возможно, самое минимальное пятно рассеяния будет при еще большем смещении, поэтому нужно задать найденное смещение (0.2 мм) как начальное и еще раз посмотреть на результат. Таким образом, нужно добиться того, чтобы минимальное пятно рассеяния было не на краю рисунка, а в центре. В данном случае минимальный диаметр будет при смещении 0.1 мм относительно начального 0.2 мм, т.е. окончательное смещение $0.1 + 0.2 = 0.3$ мм.

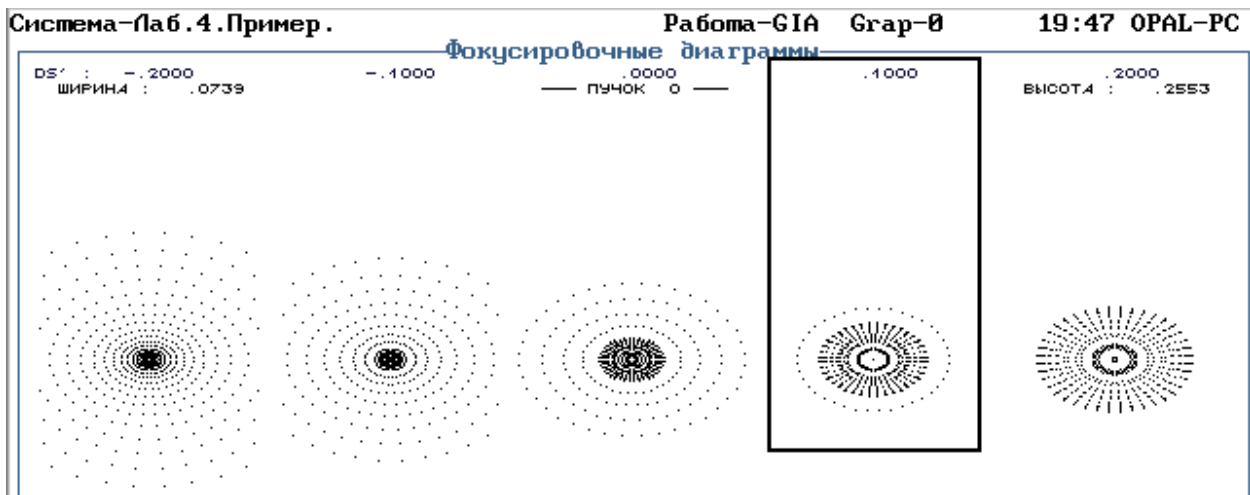


Рис.4.9. Фокусировочные диаграммы со смещенной плоскостью установки.

Теперь полученное смещение нужно задать как начальное, уменьшить шаг по расфокусировке до 0.05 мм и найти окончательное смещение.

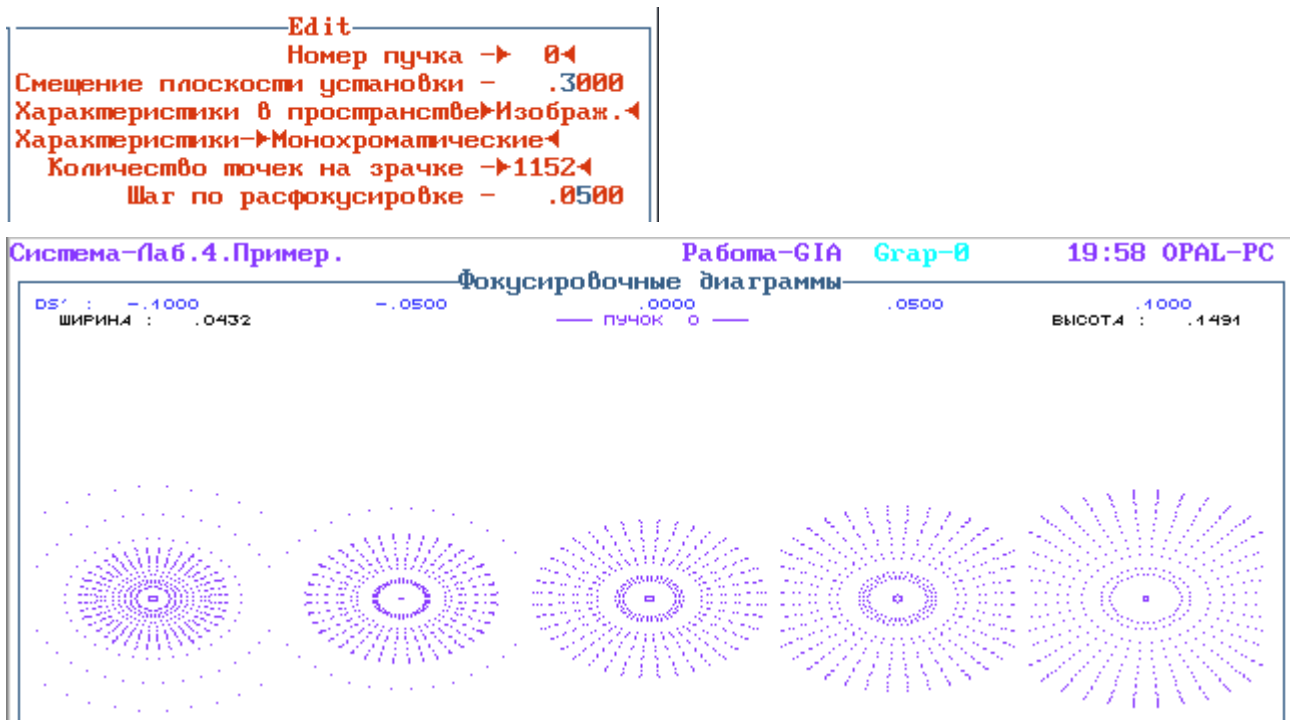


Рис.4.10. Изменение шага по расфокусировке.

Таким образом, общее смещение плоскости установки: $\delta = 0.3$ мм.

Приблизительно определить плоскость наилучшей установки можно через максимальную величину продольной абберации: $\delta \approx \frac{2}{3} \cdot \Delta S'_{\max} = \frac{2}{3} \cdot 0.446 = 0.297$ мм. В данном случае вычисленное значение плоскости наилучшей установки совпадает с подобранным по фокусировочным диаграммам с точностью до 0.03 мм.

4.3.5. Определение диаметра пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки

Диаметр пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки определяется при помощи точечных диаграмм:



Рис.4.11. Диаметр пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки.

Диаметр пятна рассеяния $d \approx 0.04247$ мм.

Диаметр пятна рассеяния, содержащий 80% энергии $d \approx 0.03398$ мм.

4.3.6. Определение aberrаций осевого пучка в плоскости наилучшей установки

Чтобы определить aberrации осевого пучка в плоскости наилучшей установки, необходимо в пункте «Формирование / Предмет, изображение, диафрагма» задать вычисленное смещение плоскости изображения от плоскости Гаусса:

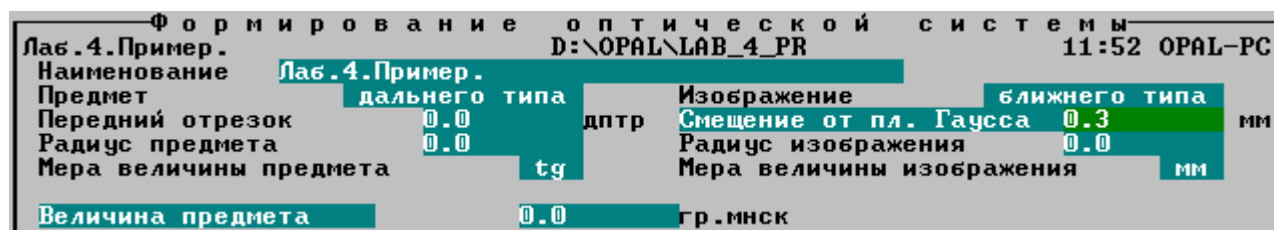
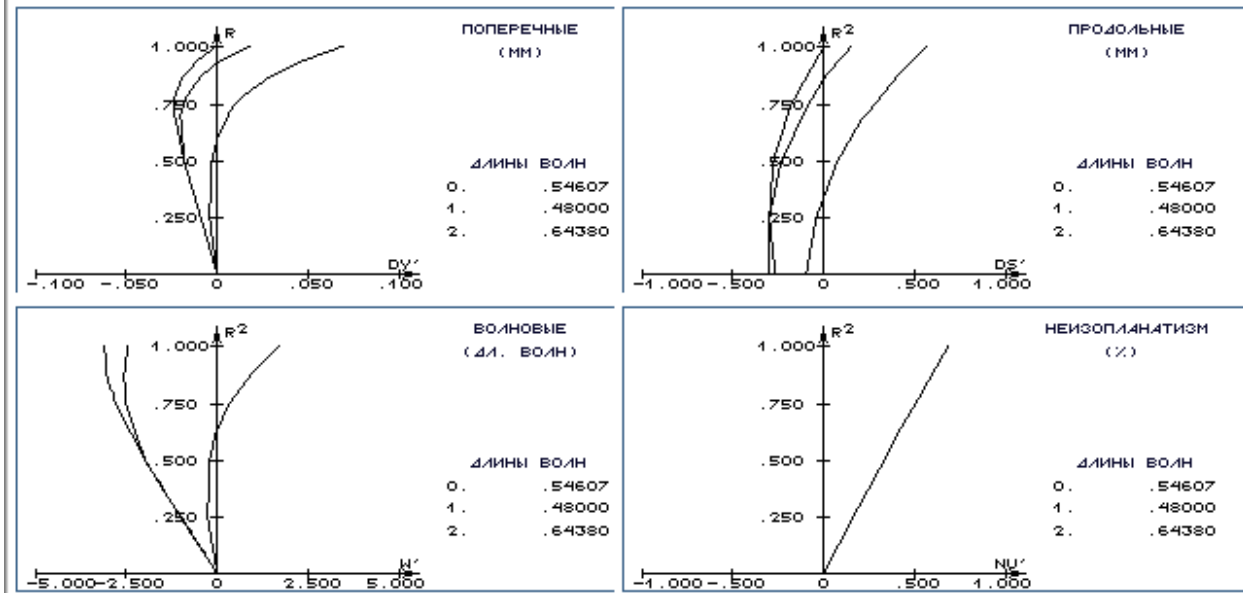


Рис.4.12. Смещение плоскости изображения от плоскости Гаусса.

Текстовые значения и графики поперечных aberrаций в плоскости наилучшей установки показаны на рисунке 4.13. Из рисунка видно, что поперечные и волновые aberrации стали значительно меньше.



Аберрации осевого пучка

Опн. зр -коор.	Продольные аберрации (мм)			Поперечные аберрации (мм)		
	0	1	2	0	1	2
1.000	.14639	.57061	.00286	.017875	.069517	.000349
.866	-.08621	.27617	-.17938	-.009127	.029180	-.019001
.707	-.23081	.07522	-.27801	-.019962	.006495	-.024052
.500	-.29885	-.04439	-.30392	-.018279	-.002712	-.018590
.000	-.30000	-.09293	-.26628	.000000	.000000	.000000

Тг' *100	Волновые аберрации (дл. волн)			Неизопл. (%)	H ЗР (мм)
	0	1	2		
12.211	-2.4425	1.7315	-3.1125	.6798	25.0000
10.586	-2.5165	.3446	-2.7909	.4993	21.6506
8.649	-1.9583	-.2223	-1.9965	.3262	17.6777
6.117	-1.0392	-.2529	-.9893	.1600	12.5000
.000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000

Рис.4.13. Аберрации осевого пучка.

4.4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

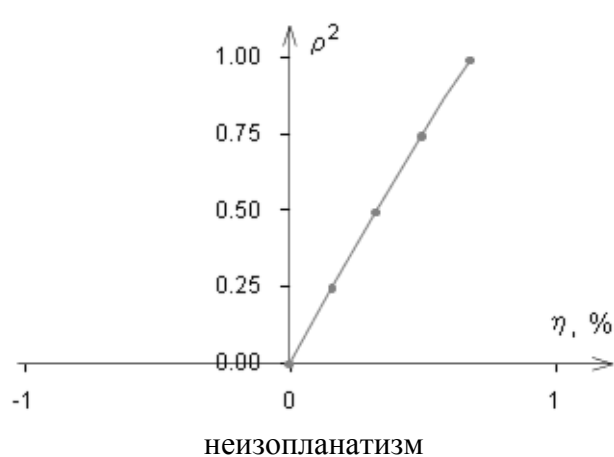
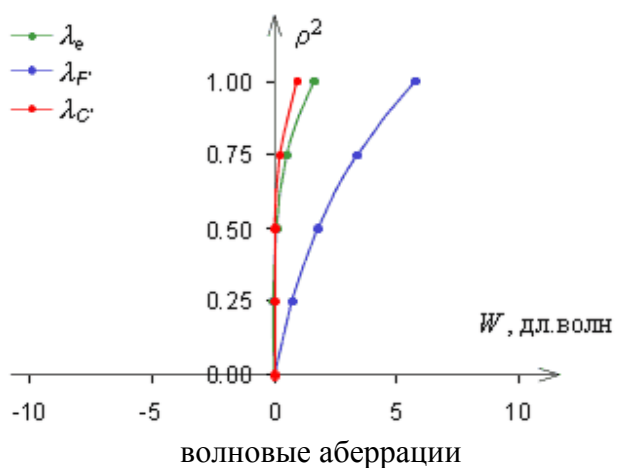
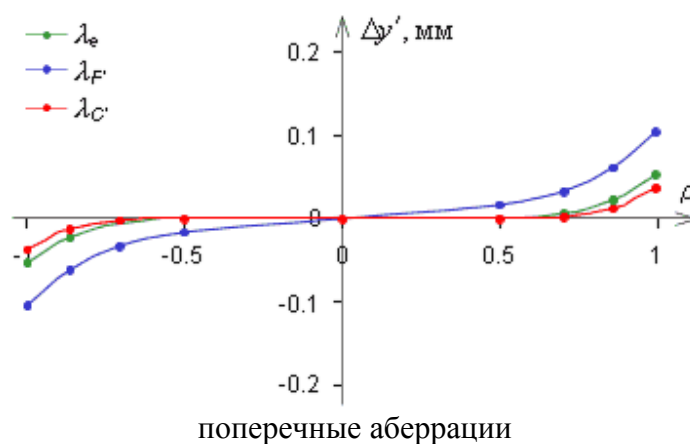
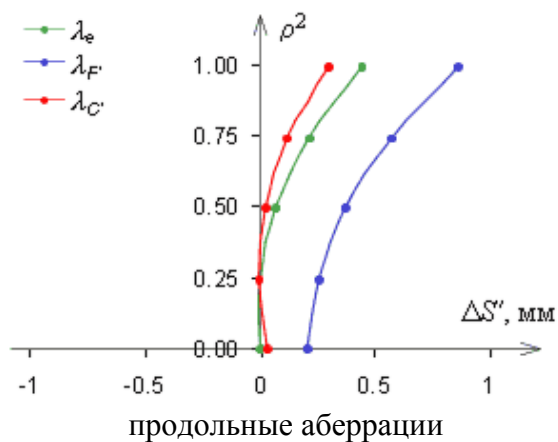
1. Конструктивные параметры склеенного объектива и линз, оптическая схема объектива, параксиальные характеристики.
2. Численные значения и графики аберраций осевого пучка в плоскости Гаусса и плоскости наилучшей установки.
3. Таблица диаметров пятна рассеяния в различных положениях плоскости изображения.

Пример выполнения отчета приводится в приложении 1.

4.4.1. Оформление графиков aberrаций

При построении графика поперечных aberrаций можно воспользоваться тем, что для осевого пучка он нечетно симметричен относительно оси y .

Графики aberrаций оформляются следующим образом:



4.5. Индивидуальные варианты задания

Вариант	r1	r2	r3	d1	d2	Марка стекла	Марка стекла	Относительное отверстие
1	117,76	-85,11	-358,09	10,0	4,0	К8	Ф2	1:3
2	108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:3
3	123,19	-64,82	-669,63	5,0	2,0	ТК2	Ф2	1:3
4	163,27	73,99	-830,90	2,5	7,0	БФ12	БК6	1:3,5
5	208,18	-130,14	-2783,6	4,0	3,0	ТК2	Ф2	1:7
6	163,27	73,99	-830,90	3,0	7,0	БФ12	БК6	1:3,5
7	307,6	-165,99	-1548,0	8,0	6,0	ТК2	Ф2	1:2,5
8	289,0	-166,38	-2167,39	7,0	4,0	ТК2	Ф2	1:5
9	60,61	-46,98	-126,2	5,0	3,5	К14	ТФ3	1:5
10	63,83	-47,53	-179,4	3,5	2,0	БК10	ТФ3	1:7
11	60,21	-44,25	-129,3	8,0	2,9	К8	ТФ2	1:8
12	60,62	-44,33	-137,77	8,5	3,2	К8	ТФ1	1:8
13	216,63	48,87	-119,22	3,0	9,0	БФ12	КФ4	1:4
14	185,94	50,39	-135,93	3,0	9,0	БФ12	КФ4	1:4
15	110,82	55,08	-330,31	3,0	8,5	ТФ1	К8	1:7
16	67,12	-54,54	-237,9	3,5	2,0	БФ13	ТФ10	1:7
17	36,31	-24,16	-80,54	4,0	1,5	ТК2	Ф2	1:6
18	51,94	-20,51	-109,39	4,5	1,5	ТК2	Ф2	1:5
19	59,04	-42,33	-146,25	5,7	1,9	К8	ТФ1	1:5
20	45,5	25,47	-578,17	1,3	4,0	ТФ1	К8	1:4
21	69,9	-30,55	-185,57	4,3	1,6	ТК2	Ф2	1:4
22	42,26	24,37	∞	1,2	1,6	ТФ1	К8	1:5
23	61,62	-44,4	∞	7,0	2,0	ТК2	Ф2	1:4
24	52,36	30,2	∞	1,5	2,0	ТФ1	К8	1:6
25	83,45	36,98	-209,31	2,0	3,5	ТФ2	К8	1:7
26	88,56	-63,5	-219,48	8,5	2,9	К8	ТФ1	1:8
27	81,25	44,41	-271,85	2,5	8,0	ТФ1	К8	1:7
28	73,28	39,08	-433,5	1,9	6,2	ТФ1	К8	1:6
29	78,29	41,72	-469,7	2,0	4,0	ТФ1	К8	1:5
30	108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:3
31	60,21	-44,25	-129,3	8,0	2,9	К8	ТФ2	1:5
32	60,62	-44,33	-137,77	8,5	3,2	К8	ТФ1	1:6
33	216,63	48,87	-119,22	3,0	9,0	БФ12	КФ4	1:7
34	185,94	50,39	-135,93	3,0	9,0	БФ12	КФ4	1:7
35	110,82	55,08	-330,31	3,0	8,5	ТФ1	К8	1:7
36	67,12	-54,54	-237,9	3,5	2,0	БФ13	ТФ10	1:6
37	36,31	-24,16	-80,54	4,0	1,5	ТК2	Ф2	1:5
38	51,94	-20,51	-109,39	4,5	1,5	ТК2	Ф2	1:8
39	59,04	-42,33	-149,25	5,7	1,9	К8	ТФ1	1:8
40	45,5	25,47	-578,17	1,3	4,0	ТФ1	К8	1:4
41	117,76	-85,11	-358,09	10,0	4,0	К8	Ф2	1:5
42	108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:7
43	123,19	-64,82	-669,63	5,0	2,0	ТК2	Ф2	1:8
44	163,27	73,99	-830,90	2,5	7,0	БФ12	БК6	1:6
45	208,18	-130,14	-2783,6	4,0	3,0	ТК2	Ф2	1:5
46	163,27	73,99	-830,90	3,0	7,0	БФ12	БК6	1:4
47	307,6	-165,99	-1548,0	8,0	6,0	ТК2	Ф2	1:7
48	289,0	-166,38	-2167,39	7,0	4,0	ТК2	Ф2	1:8

49	60,61	-46,98	-126,2	5,0	3,5	K14	ТФ3	1:5
50	63,83	-47,53	-179,4	3,5	2,0	БК10	ТФ3	1:6
51	69,9	-30,55	-185,57	4,3	1,6	ТК2	Ф2	1:4
52	42,26	24,37	∞	1,2	1,6	ТФ1	К8	1:7
53	61,62	-44,4	∞	7,0	2,0	ТК2	Ф2	1:6
54	52,36	30,2	∞	1,5	2,0	ТФ1	К8	1:5
55	83,45	36,98	-209,31	2,0	3,5	Ф2	К8	1:8
56	88,56	-63,5	-219,48	8,5	2,9	К8	ТФ1	1:8
57	81,25	44,41	-271,85	2,5	8,0	ТФ1	К8	1:7
58	73,28	39,08	-433,5	1,9	6,2	ТФ1	К8	1:6
59	78,29	41,72	-469,7	2,0	4,0	ТФ1	К8	1:5
60	108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:3

4.6. Вопросы к защите

1. Волновая, поперечные, продольные aberrации и их взаимосвязь.
2. Сферическая aberrация и расфокусировка.
3. Хроматические aberrации, хроматизм положения и сферохроматизм.
4. Относительные зрачковые и предметные координаты.
5. Графики aberrаций (обозначения осей координат, определение величины aberrаций по графикам).

Все определения можно посмотреть в глоссарии электронного учебника [2].

Для защиты лабораторной работы можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№4. Исследование aberrаций осевой точки».

Лабораторная работа №5. Исследование аберраций внеосевой точки

Цель работы: углубление знаний по разделу «Аберрации оптических систем» и приобретение практических навыков определения аберраций внеосевой точки для узкого и широкого пучка лучей.

5.1. Задание для работы

1. В соответствии с индивидуальным заданием определить для 2-х точек поля аберрации узкого пучка лучей (астигматизм, кривизну изображения, дисторсию, хроматизм увеличения) объектива. Составить таблицу аберраций и построить графики.
2. Определить аберрации широкого пучка лучей в меридиональном и сагиттальном сечениях. Составить таблицу аберраций и построить графики.
3. По поперечным аберрациям определить величину комы для первого и второго пучка.
4. Определить диаметр и зарисовать пятно рассеяния для заданной апертуры и апертуры, уменьшенной в 10 раз.

Определить для уменьшенной апертуры плоскость наилучшей установки по точечным диаграммам и сравнить со значением кривизны.

5.2. Краткие теоретические сведения

Монохроматические аберрации внеосевой точки можно разделить на две группы: аберрации узкого пучка лучей и аберрации широкого пучка лучей.

К аберрациям узкого пучка лучей относятся: астигматизм, кривизна изображения, дисторсия. Из хроматических аберраций – хроматизм увеличения.

Аберрации широкого пучка – поперечные аберрации в меридиональном и сагиттальном сечении.

Теоретические сведения, необходимые для выполнения работы приведены в главе «8. Аберрации оптических систем» пособия [1].

Для проверки теоретических знаний, необходимых для выполнения данной работы, можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№5. Исследование аберраций внеосевой точки».

5.3. Пример выполнения работы

5.3.1. Создание оптической системы

Задание

r1	r2	r3	d1	d2	Марка стекла	Марка стекла	Относительное отверстие	2ω, град.	Sp, мм
108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:4	4	-30

Прежде всего, необходимо создать оптическую систему с заданными параметрами в программе для расчета оптических систем (например, OPAL-PC). Подробное описание работы с OPAL-PC приведено в приложении 2 «Описание работы с программой OPAL-PC». Создать новую оптическую систему можно при помощи пункта «Файл / Новая оптическая система». Предмет находится в бесконечности (дальнего типа), изображение – ближнего типа. Величина предмета задана: $2\omega = 4^\circ$, следовательно $\omega = 2^\circ$. Задано и положение входного зрачка $S_p = -30$ мм. Длины волн: $e = 0.54607$, $F' = 0.48000$, $C' = 0.64380$.

Переднюю апертуру можно сосчитать, зная относительное отверстие, но для этого нужно знать фокусное расстояние, поэтому вначале можно задать произвольную величину передней апертуры (например, 1 мм), а после выполнения вычислений заменить ее правильным значением.

После задания конструктивных параметров (пункт «Система / Конструктивные параметры») можно посмотреть значение параксиальных характеристик (пункт «Система / Параксиальные характеристики») и вычислить диаметр входного зрачка:

$$D = \frac{f'}{4} = \frac{199.9857}{4} = 50 \text{ мм.}$$

Теперь в OPAL-е можно задать правильную переднюю апертуру:

$$A = \frac{D}{2} = \frac{50}{2} = 25 \text{ мм.}$$

Формирование оптической системы		D:\OPAL\LAB_5_PR		16:43 OPAL-PC	
Наименование	Лаб.5.Пример.	Предмет	дальнего типа	Изображение	ближнего типа
Передний отрезок	0.0	дптр		Смещение от пл. Гаусса	0.000000 мм
Радиус предмета	0.0			Радиус изображения	0.0
Мера величины предмета		tg		Мера величины изображения	мм
Величина предмета		2.000000	гр.мнск		
Вх. зрачок	ND= 999	SD =	-30.000000 мм		
Передняя Апертура			25.000000 мм		
Стандартные длины волн		Длины волн в мкм			
		0	0.546070		
		1	0.480000		
		2	0.643800		
		3	0.0		
		4	0.0		

Рис.5.1. Параметры предмета, изображения, диафрагмы.

Поскольку в задании нужно исследовать aberrации внеосевых пучков, необходимо задать их параметры (пункт «Система / Параметры Внеосевых пучков»). Первый пучок обычно задают выходящим из крайней точки предмета (относительная координата на предмете $\sigma = 1.0$), а второй пучок – выходящим из точки предмета с относительной координатой $\sigma = 0.707$).

ТОЧКИ НА ПРЕДМЕТЕ		ВИНЬЕТИРОВАНИЕ		ОТРЕЗКИ		РАССТОЯНИЕ
относ.	гр.мсек	верх	низ	передние	задние	до диафрагмы
1.0000	2.000000	0.0	0.0	0.0	0.3000	-30.0000
0.7070	1.245143	0.0	0.0	0.0	0.3000	-30.0000
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3000	-30.0000
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3000	-30.0000
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3000	-30.0000

Рис.5.2. Параметры внеосевых пучков.

5.3.2. Определение aberrаций узкого пучка лучей

Аберрации узких пучков лучей можно посмотреть в пункте «Анализ Габаритов и aberrаций / Характеристики главных лучей пучков». В текстовом режиме можно посмотреть числовые значения aberrаций, а в графическом – графики aberrаций (переключение режимов по клавише «F6»).

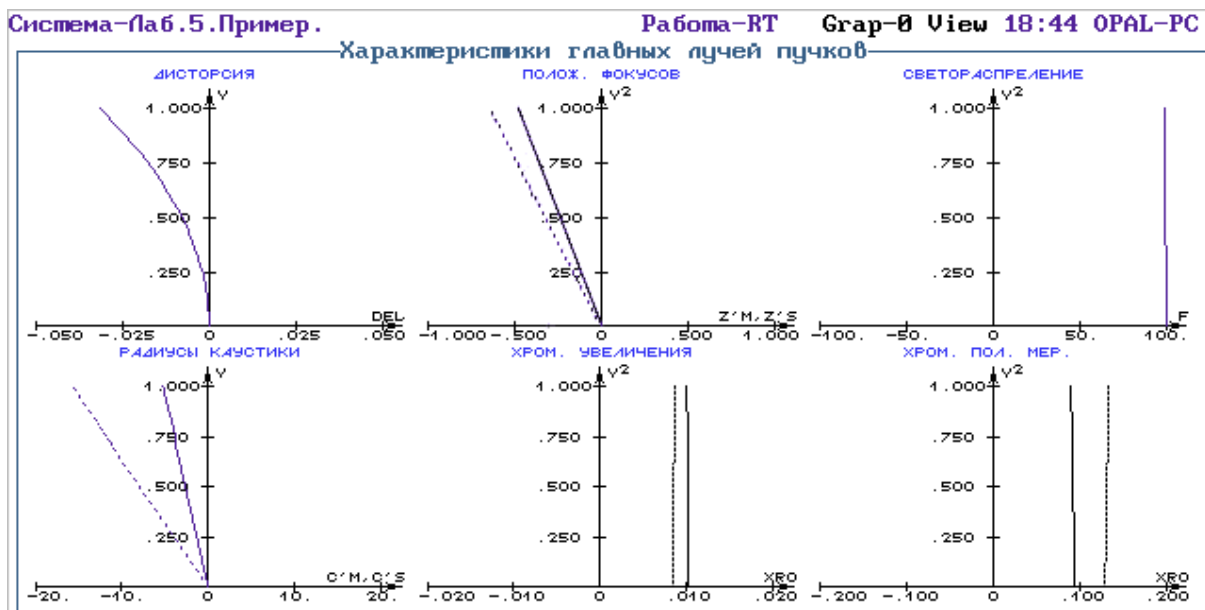


Рис.5.3. Характеристики главных лучей пучков (графический режим).

N	Величина предмета относ.	Величина изображ. (гр.мсек)	Величина изображ. относ.	Дисторсия (мм)	Дисторсия %	Астигмат.отрезки Z'm	Астигмат.отрезки Z's
1	1.000	2.000000	1.000	-6.990290	-.0315	.002201	-.6422
2	.707	1.245143	.707	-4.942913	-.0157	.000778	-.4712
0	.000	.000000	.000	.000000	.0000	.0000	.0000

Рис.5.4. Характеристики главных лучей пучков (текстовый режим).

Чтобы определить величину хроматизма увеличения, необходимо изменить настройки пункта «Характеристики главных лучей» как показано на рисунке.

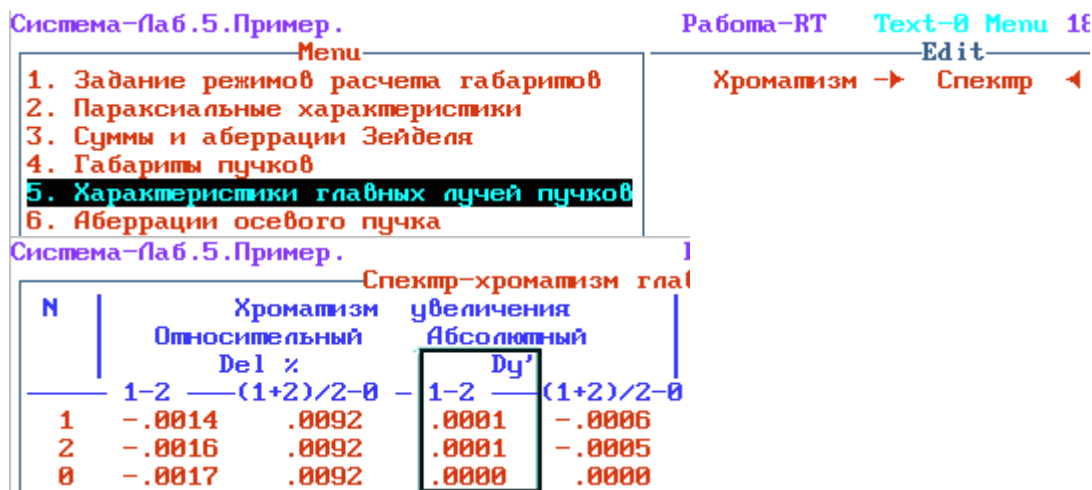


Рис.5.5. Хроматизм увеличения.

Астигматизм и кривизна вычисляются самостоятельно по астигматическим отрезкам. В результате таблица аберраций для узкого пучка лучей будет выглядеть следующим образом:

Величина предмета		Величина изображения	Астигматические отрезки		астигматизм	кривизна	Дисторсия		Хроматизм увеличения
σ относ.	ω (гр. минсек)	y' (мм)	z'_m (мм)	z'_s (мм)	$z'_m - z'_s$ (мм)	$\frac{z'_m + z'_s}{2}$ (мм)	$\Delta y'_0$ (мм)	$\Delta\%$	$y'_{F'} - y'_{C'}$ (мм)
1.000	2°00'00"	-6.9903	-0.6422	-0.4728	-0.1694	-0.5575	0.00220	-0.0315	0.0001
0.707	1°24'51"	-4.9429	-0.4712	-0.3865	-0.0847	-0.4289	0.00077	-0.0157	0.0001
0.000	0°00'00"	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.0000	0.0000

Пример оформления графиков аберраций узкого пучка лучей приведен в параграфе «5.4.1. Оформление графиков аберраций узкого пучка лучей».

5.3.3. Определение аберраций широкого пучка лучей

Аберрации широкого пучка для внеосевой точки разделяются на аберрации в меридиональном и сагиттальном сечениях.

Меридиональное сечение

Лучи, лежащие в меридиональной плоскости, в ней и остаются. Поэтому все точки пересечения меридиональных лучей лежат в плоскости изображения на оси y' . В OPAL-е поперечные аберрации внеосевого пучка можно посмотреть в пункте «Аберрации внеосевых пучков».

Вых. координаты Канон. (tg' *100)		Аберрации внеосевых пучков			в (мм)
		Поперечные аберрации			
		0	1	2	
Меридиональное сечение		Пучок 1 $\gamma =$			2.0000
1.000	15.55	-.22828	-.19535	-.23085	
.866	13.85	-.18587	-.16223	-.18431	
.707	11.84	-.13508	-.11938	-.13113	
.500	9.23	-.07793	-.06912	-.07365	
.000	2.94	.00000	-.00059	-.00070	
-.500	-3.31	.01205	-.00143	.00944	
-.707	-5.90	-.00541	-.02968	-.00429	
-.866	-7.88	-.03956	-.07613	-.03224	
-1.000	-9.53	-.09439	-.14514	-.07864	
Меридиональное сечение		Пучок 2 $\gamma =$			1.2451
1.000	14.65	-.16190	-.12677	-.16607	
.866	12.96	-.13553	-.11031	-.13503	
.707	10.96	-.09988	-.08315	-.09650	
.500	8.35	-.05769	-.04833	-.05355	
.000	2.08	.00000	-.00042	-.00049	
-.500	-4.17	.01124	-.00141	.00827	

Рис.5.6. Аберрации внеосевых пучков в меридиональном сечении.

Таблица поперечных аберраций в меридиональном сечении для центральной длины волны оформляется в виде:

вых. зр. к-ты ρ'	Поперечные аберрации $\Delta y'$ (мм)	
	1 пучок, $\omega = 2^\circ$	1 пучок, $\omega = 2^\circ$
1.000	-0.22828	-0.16190
0.866	-0.18587	-0.13553
0.707	-0.13508	-0.09988
0.500	-0.07793	-0.05769
0.000	0.00000	0.00000
-0.500	0.01205	0.01124
-0.707	-0.00541	0.00086
-0.866	-0.03956	-0.02332
-1.000	-0.09439	-0.06540

Сагиттальное сечение

Чтобы определить поперечные аберрации в сагиттальном сечении, необходимо изменить настройки пункта «Аберрации внеосевых пучков» как показано на рисунке.

Menu	Edit
1. Задание режимов расчета габаритов	Пучок → ALL ←
2. Параксиальные характеристики	Сечение пучка → Сагиттальное ←
3. Суммы и аберрации Зейделя	Аберрации → Поперечные ←
4. Габариты пучков	Хроматизм → Аберрация ←
5. Характеристики главных лучей пучков	Количество лучей - 4
6. Аберрации осевого пучка	Вид зрач.коорд → tg' *100 ←
7. Аберрации внеосевых пучков	

Рис.5.7. Параметры аберраций внеосевых пучков.

Поперечные аберрации широкого пучка лучей в сагиттальном сечении содержат две составляющие: $\Delta x'$ и $\Delta y'$.

Выходные координаты		Аберрации внеосевых пучков								
Радиус	(tg' *100)		Поперечные		абerrации		θ		(мм)	
	x	y	Δx'	Δy'	Δx'	Δy'	1	2	Δx'	Δy'
Сагиттальное сечение		Пучок 1		γ=		2.0000				
1.000	12.52	2.95	-.05044	-.04767	-.00925	-.05076	-.05908	-.0462		
.866	10.85	2.95	-.05739	-.03439	-.02776	-.03679	-.05990	-.0335		
.707	8.86	2.95	-.05103	-.02208	-.03137	-.02384	-.04936	-.0217		
.500	6.26	2.94	-.03471	-.01064	-.02377	-.01181	-.03112	-.0108		
Сагиттальное сечение		Пучок 2		γ=		1.2451				
1.000	12.51	2.09	-.03999	-.03368	.00108	-.03585	-.04855	-.0326		
.866	10.84	2.08	-.04823	-.02429	-.01869	-.02599	-.05067	-.0236		
.707	8.85	2.08	-.04347	-.01560	-.02388	-.01684	-.04175	-.0153		
.500	6.26	2.08	-.02933	-.00752	-.01843	-.00834	-.02570	-.0076		

Рис.5.8. Аберрации внеосевых пучков в сагиттальном сечении.

При определении аберраций в сагиттальном сечении обычно рассматривают только лучи, лежащие в одной половине сечения, так как составляющая $\Delta y'$ будет **четно симметричной**, а составляющая $\Delta x'$ **нечетно симметричной**.

Пример оформления таблицы поперечных аберраций широкого пучка лучей в сагиттальном сечении для центральной длины волны:

вых. зр. к-ты ρ'	1 пучок, $\omega = 2^\circ$		2 пучок, $\omega = 1^\circ 24' 51''$	
	Поперечные аберрации $\Delta x'$ (мм)	Поперечные аберрации $\Delta y'$ (мм)	Поперечные аберрации $\Delta x'$ (мм)	Поперечные аберрации $\Delta y'$ (мм)
1.000	-0.05044	-0.04767	-0.03999	-0.03368
0.866	-0.05739	-0.03439	-0.04823	-0.02429
0.707	-0.05103	-0.02208	-0.04347	-0.01560
0.500	-0.03471	-0.01064	-0.02933	-0.00752
0.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Пример оформления графиков аберраций широкого пучка лучей приведен в пункте «5.4.2. Оформление графиков аберраций широкого пучка лучей».

Определение комы

Величину комы можно определить из поперечных аберраций в меридиональном сечении:

$$k = \frac{\Delta y'_{\rho=1} + \Delta y'_{\rho=-1}}{2} - \Delta y'_{\rho=0}, \text{ где } \Delta y'_{\rho=1} - \text{ поперечная аберрация луча,}$$

проходящего через верхний край зрачка ($\rho = 1.0$), $\Delta y'_{\rho=-1}$ – поперечная аберрация луча, проходящего через нижний край зрачка ($\rho = -1.0$), $\Delta y'_{\rho=0}$ – поперечная аберрация луча, проходящего через центр зрачка ($\rho = 0.0$).

Кома для первого пучка:

$$k = \frac{-0.22828 - 0.09439}{2} - 0.0 = -0.06695 \text{ мм.}$$

Кома для второго пучка:

$$k = \frac{-0.16190 - 0.06540}{2} - 0.0 = -0.04825 \text{ мм.}$$

5.3.4. Определение диаметра пятна рассеяния

Диаметр и форму пятна рассеяния можно определить при помощи пункта «Анализ геометрического изображения / Точечная диаграмма». Чтобы исследовать пятно рассеяния для центральной длины волны, нужно установить параметр «Характеристики <Монохроматические>», и чтобы значение было более точным, установить количество точек на зрачке **1152**. Исследуемый пучок можно выбрать при помощи параметра «Номер пучка».

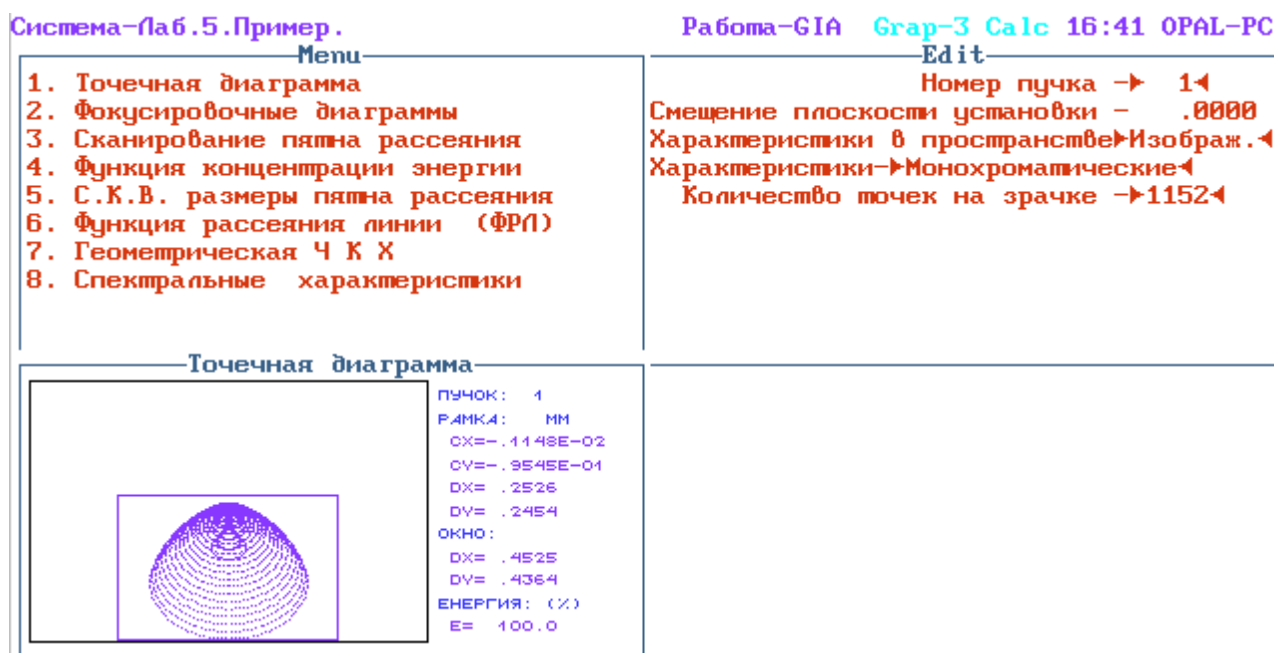


Рис.5.9. Определение диаметра пятна рассеяния по точечной диаграмме.

Изменяя размер рамки (клавиши «+» и «-» на дополнительной клавиатуре), необходимо найти минимальный размер рамки, при котором в нее попадают все лучи. В этом случае размер рамки будет соответствовать диаметру пятна рассеяния:

$$d \approx 0.2454 \text{ мм.}$$

Форму пятна необходимо зарисовать (пример оформления в параграфе «5.4.3. Оформление таблицы размеров и формы пятна рассеяния»).

Диаметр и форма пятна рассеяния второго пучка находятся аналогично.

Для большей наглядности при изучении пятен рассеяния величину апертуры можно уменьшить в 10 раз (пункт «Формирование / Предмет, изображение, диафрагма»).



Рис.5.10. Изменение величины апертуры.

В этом случае величина aberrаций широкого пучка станет значительно меньше, и влияние aberrаций узкого пучка (астигматизма и дисторсии) станет более заметно.

Диаметр и форма пятна рассеяния при уменьшенной апертуре для первого и второго пучка находятся аналогично.

5.3.5. Определение плоскости наилучшей установки

Определить плоскость наилучшей установки можно при помощи пункта «Фокусировочные диаграммы». В настройках необходимо задать смещение плоскости установки и шаг по расфокусировке, и подобрать их значения таким образом, чтобы найти положение плоскости установки, в котором диаметр пятна рассеяния будет минимальным, а форма наиболее близка к кругу (с точностью до 0.05 мм).

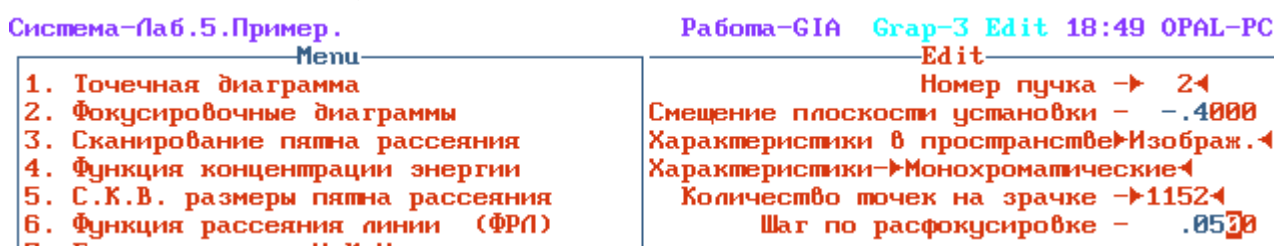


Рис.5.11. Фокусировочные диаграммы – задание шага по расфокусировке.

Для каждого пучка плоскость наилучшей установки нужно подбирать отдельно. На рисунке ясно видно положение плоскости наилучшей установки для второго пучка. Для первого пучка необходимо сместить плоскость изображения «влево» (к оптической системе), а для осевого пучка – «вправо» (от оптической системы) (поиск плоскости наилучшей установки по точечным диаграммам подробно разбирается в описании лабораторной работы №4 - 4.3.4. Определение плоскости наилучшей установки).

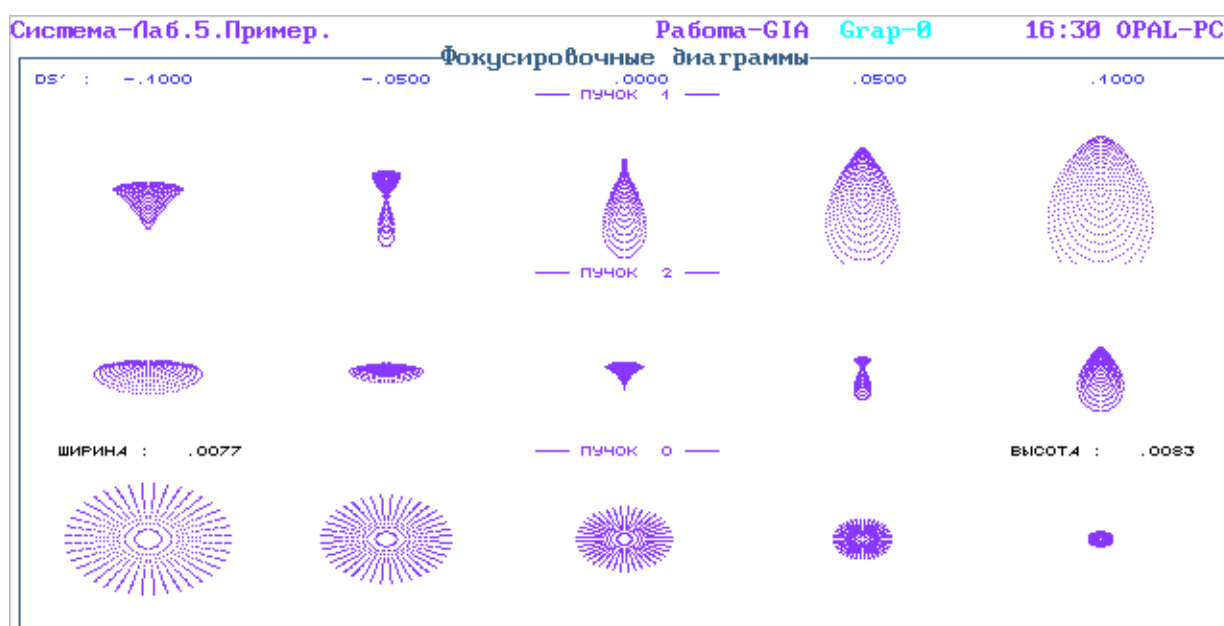


Рис.5.12. Фокусировочные диаграммы.

В результате для всех пучков положение плоскости наилучшей установки будет таким, как показано в таблице:

номер пучка	положение плоскости наилучшей установки (по точечным диаграммам)	кривизна, (мм)
1 пучок	-0.5	-0.5575
2 пучок	-0.4	-0.4289
осевой пучок	-0.05	0.0000

Как видно из таблицы, для очень маленькой апертуры положение плоскости наилучшей установки приблизительно совпадает с кривизной.

5.4. Оформление работы

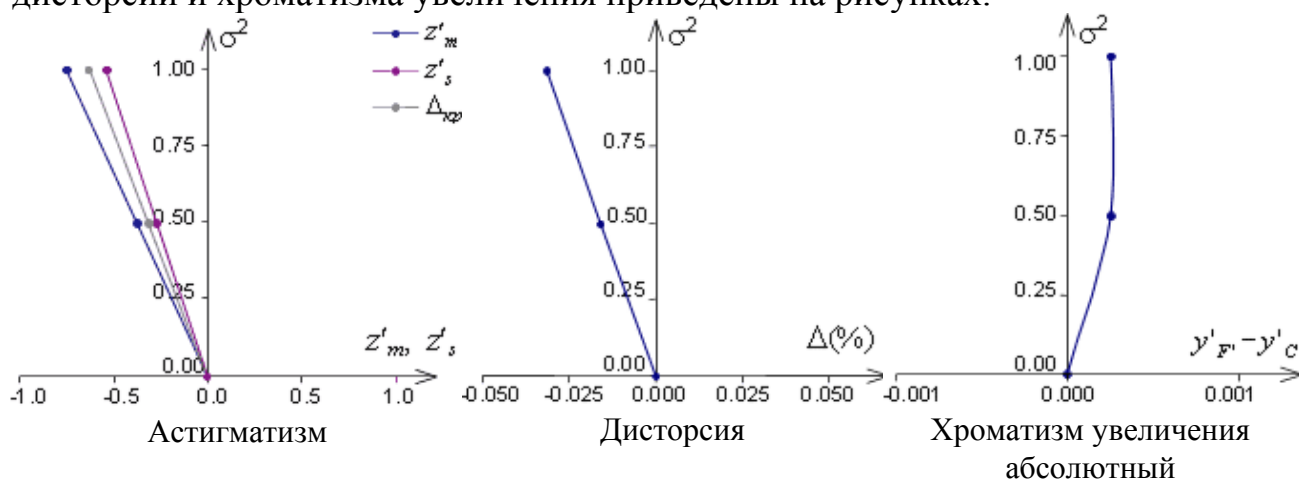
В отчете должны быть приведены:

1. Конструктивные параметры и оптическая схема объектива.
2. Численные значения и графики aberrаций внеосевых пучков.
3. Диаметр и форма пятна рассеяния для первого и второго пучка.
4. Положение плоскости наилучшей установки.

Пример выполнения отчета приводится в приложении 1.

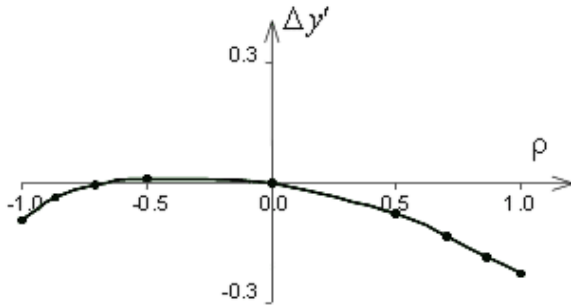
5.4.1. Оформление графиков aberrаций узкого пучка лучей

Примеры построения графиков астигматических отрезков, кривизны, дисторсии и хроматизма увеличения приведены на рисунках.

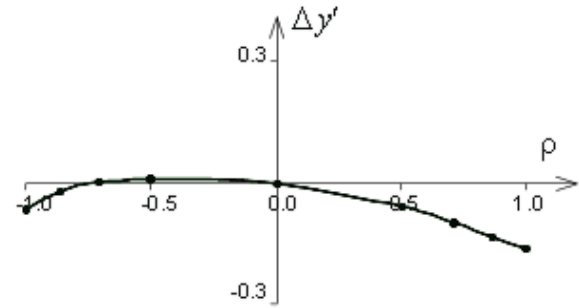


5.4.2. Оформление графиков aberrаций широкого пучка лучей

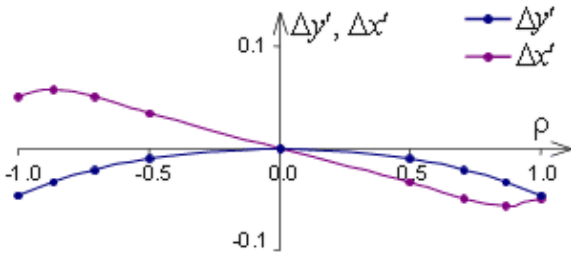
Пример оформления графиков aberrаций широкого пучка лучей:



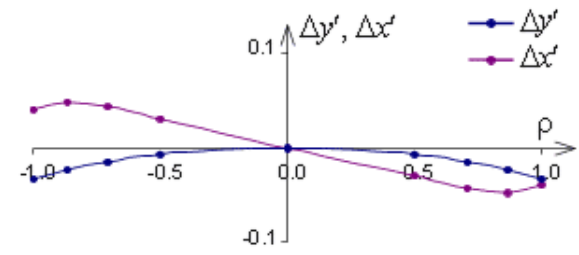
Поперечные aberrации в меридиональном сечении (1 пучок)



Поперечные aberrации в меридиональном сечении (2 пучок)



Поперечные aberrации в сагиттальном сечении (1 пучок)



Поперечные aberrации в сагиттальном сечении (2 пучок)

5.4.3. Оформление таблицы размеров и формы пятна рассеяния

1 пучок		2 пучок	
передняя апертура $A = 25$ мм			
	<p>размер пятна: $d = 0.24$ мм</p>		<p>размер пятна: $d = 0.24$ мм</p>
передняя апертура $A = 2.5$ мм			
	<p>размер пятна: $d = 0.015$ мм</p>		<p>размер пятна: $d = 0.015$ мм</p>

5.5. Задание для работы

Вариант	r1	r2	r3	d1	d2	Марка стекла	Марка стекла	Относительное отверстие	2ω , град.	Sp , мм
1	117.76	-85.11	-358.09	10.0	4.0	К8	Ф2	1:6	5	$-f'/2$
2	108.34	55.28	-364.42	3.0	9.0	ТФ1	К8	1:6	5	$-f'/2$
3	123.19	-64.82	-669.63	5.0	2.0	ТК2	Ф2	1:7	5	$-f'/2$
4	163.27	73.99	-830.90	2.5	7.0	ВФ12	БК6	1:7	5.5	$-f'/3$
5	208.18	-130.14	-2783.6	4.0	3.0	ТК2	Ф2	1:10	5.5	$-f'/3$
6	163.27	73.99	-830.90	3.0	7.0	ВФ12	БК6	1:7	5.5	$-f'/3$
7	307.6	-165.99	-1548.0	8.0	6.0	ТК2	Ф2	1:8	2	$-f'$
8	289.0	-166.38	-2167.39	7.0	4.0	ТК2	Ф2	1:9	2	$-f'$
9	60.61	-46.98	-126.2	5.0	3.5	К14	ТФ3	1:5	4	$-f'$
10	63.83	-47.53	-179.4	3.5	2.0	БК10	ТФ3	1:7	4	$-f'$
11	60.21	-44.25	-129.3	8.0	2.9	К8	ТФ2	1:8	4.5	-50,0
12	60.62	-44.33	-137.77	8.5	3.2	К8	ТФ1	1:8	4.5	-50,0

13	216,63	48,87	-119,22	3,0	9,0	БФ12	КФ4	1:8	4.5	-50,0
14	185,94	50,39	-135,93	3,0	9,0	БФ12	КФ4	1:8	4.5	-30,0
15	110,82	55,08	-330,31	3,0	8,5	ТФ1	К8	1:7	4	-30,0
16	67,12	-54,54	-237,9	3,5	2,0	БФ13	ТФ10	1:7	5	$-f'/2$
17	36,31	-24,16	-80,54	4,0	1,5	ТК2	Ф2	1:6	5	$-f'/2$
18	51,94	-20,51	-109,39	4,5	1,5	ТК2	Ф2	1:5	5	$-f'/2$
19	59,04	-42,33	-146,25	5,7	1,9	К8	ТФ1	1:5	5.5	$-f'/3$
20	45,5	25,47	-578,17	1,3	4,0	ТФ1	К8	1:5	5.5	$-f'/3$
21	69,9	-30,55	-185,57	4,3	1,6	ТК2	Ф2	1:5	5.5	$-f'/3$
22	42,26	24,37	∞	1,2	1,6	ТФ1	К8	1:8	2	$-f'$
23	61,62	-44,4	∞	7,0	2,0	ТК2	Ф2	1:5	4	$-f'$
24	52,36	30,2	∞	1,5	2,0	ТФ1	К8	1:8	2	$-f'$
25	83,45	36,98	-209,31	2,0	3,5	ТФ2	К8	1:8	2	$-f'$
26	88,56	-63,5	-219,48	8,5	2,9	К8	ТФ1	1:8	4.5	-50,0
27	81,25	44,41	-271,85	2,5	8,0	ТФ1	К8	1:7	4.5	-50,0
28	73,28	39,08	-433,5	1,9	6,2	ТФ1	К8	1:6	4.5	-50,0
29	78,29	41,72	-469,7	2,0	4,0	ТФ1	К8	1:5	4	-30,0
30	108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:4	4	-30,0
31	60,21	-44,25	-129,3	8,0	2,9	К8	ТФ2	1:5	5	$-f'/2$
32	60,62	-44,33	-137,77	8,5	3,2	К8	ТФ1	1:6	5	$-f'/2$
33	216,63	48,87	-119,22	3,0	9,0	БФ12	КФ4	1:7	5	$-f'/2$
34	185,94	50,39	-135,93	3,0	9,0	БФ12	КФ4	1:7	5.5	$-f'/3$
35	110,82	55,08	-330,31	3,0	8,5	ТФ1	К8	1:7	5.5	$-f'/3$
36	67,12	-54,54	-237,9	3,5	2,0	БФ13	ТФ10	1:6	5.5	$-f'/3$
37	36,31	-24,16	-80,54	4,0	1,5	ТК2	Ф2	1:5	4	$-f'$
38	51,94	-20,51	-109,39	4,5	1,5	ТК2	Ф2	1:8	4	$-f'$
39	59,04	-42,33	-149,25	5,7	1,9	К8	ТФ1	1:8	4	$-f'$
40	45,5	25,47	-578,17	1,3	4,0	ТФ1	К8	1:5	4	$-f'$
41	117,76	-85,11	-358,09	10,0	4,0	К8	Ф2	1:5	4.5	-50,0
42	108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:7	4.5	-50,0
43	123,19	-64,82	-669,63	5,0	2,0	ТК2	Ф2	1:8	4.5	-50,0
44	163,27	73,99	-830,90	2,5	7,0	БФ12	БК6	1:6	4.5	-30,0
45	208,18	-130,14	-2783,6	4,0	3,0	ТК2	Ф2	1:8	4	-30,0
46	163,27	73,99	-830,90	3,0	7,0	БФ12	БК6	1:7	5	$-f'/2$
47	307,6	-165,99	-1548,0	8,0	6,0	ТК2	Ф2	1:8	4	$-f'/2$
48	289,0	-166,38	-2167,39	7,0	4,0	ТК2	Ф2	1:8	2	$-f'/2$
49	60,61	-46,98	-126,2	5,0	3,5	К14	ТФ3	1:5	5.5	$-f'/3$

50	63,83	-47,53	-179,4	3,5	2,0	БК10	ТФ3	1:6	5.5	$-f'/3$
51	69,9	-30,55	-185,57	4,3	1,6	ТК2	Ф2	1:5	5.5	$-f'/3$
52	42,26	24,37	∞	1,2	1,6	ТФ1	К8	1:8	2	$-f'$
53	61,62	-44,4	∞	7,0	2,0	ТК2	Ф2	1:6	4	$-f'$
54	52,36	30,2	∞	1,5	2,0	ТФ1	К8	1:8	2	$-f'$
55	83,45	36,98	-209,31	2,0	3,5	Ф2	К8	1:8	4	$-f'$
56	88,56	-63,5	-219,48	8,5	2,9	К8	ТФ1	1:8	4.5	-50,0
57	81,25	44,41	-271,85	2,5	8,0	ТФ1	К8	1:7	4.5	-50,0
58	73,28	39,08	-433,5	1,9	6,2	ТФ1	К8	1:6	4.5	-50,0
59	78,29	41,72	-469,7	2,0	4,0	ТФ1	К8	1:6	4.5	-30,0
60	108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:4	4	-30,0

5.6. Вопросы к защите

1. Аберрации узкого пучка лучей: астигматизм, кривизна, дисторсия, хроматизм увеличения.
2. Аберрации широкого пучка лучей: поперечные, кома.
3. Определения сагиттальной и меридиональной плоскости.
4. Относительные предметные координаты.

Все определения можно посмотреть в глоссарии электронного учебника [2].

Для защиты лабораторной работы можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№5. Исследование аберраций внеосевой точки».

Лабораторная работа №6. Исследование качества изображения оптических систем

Цель работы: углубление знаний по разделу «Структура и качество оптического изображения», приобретение навыков использования числа Штреля и ЧКХ для оценки качества изображения.

6.1. Задание для работы

1. В соответствии с индивидуальным заданием определить средний квадрат деформации волнового фронта в плоскости Гаусса и плоскости наилучшей установки для всех пучков.
2. По значениям $W_{СКВ}$ рассчитать число Штреля по приближенной формуле Марешаля и сравнить его с точным значением, приведенным в программе OPAL.

Определить разрешающую способность при контрасте 0.2 в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки для всех пучков.

6.2. Краткие теоретические сведения

Теоретические сведения, необходимые для выполнения работы приведены в главе «9. Структура и качество оптического изображения» пособия [1].

Для проверки теоретических знаний, необходимых для выполнения данной работы, можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№6. Исследование качества изображения оптических систем».

6.3. Пример выполнения работы

6.3.1. Создание оптической системы

Задание

Конструктивные параметры:

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	30.538	5.17	СТК3
2	80.66	0.07	
3	21.998	4.75	СТК3
4	29.48	1.92	ТФ1
5	14.54	15.96	
6	-14.855	1.98	Ф1
7	141.93	5.35	СТК3
8	-19.866	0.07	
9	223.5	3.83	СТК12
10	-45.22		

Предмет дальнего типа, $\omega = 4^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 5 поверхности на расстоянии 8.06 мм, высота по $Y=5.0$ мм. Длина волны λ_e .

Прежде всего, необходимо создать оптическую систему с заданными параметрами в программе для расчета оптических систем (например, OPAL-PC). Подробное описание работы с OPAL-PC приведено в приложении 2 «Описание работы с программой OPAL-PC». Создать новую оптическую систему можно при помощи пункта «Файл / Новая оптическая система».

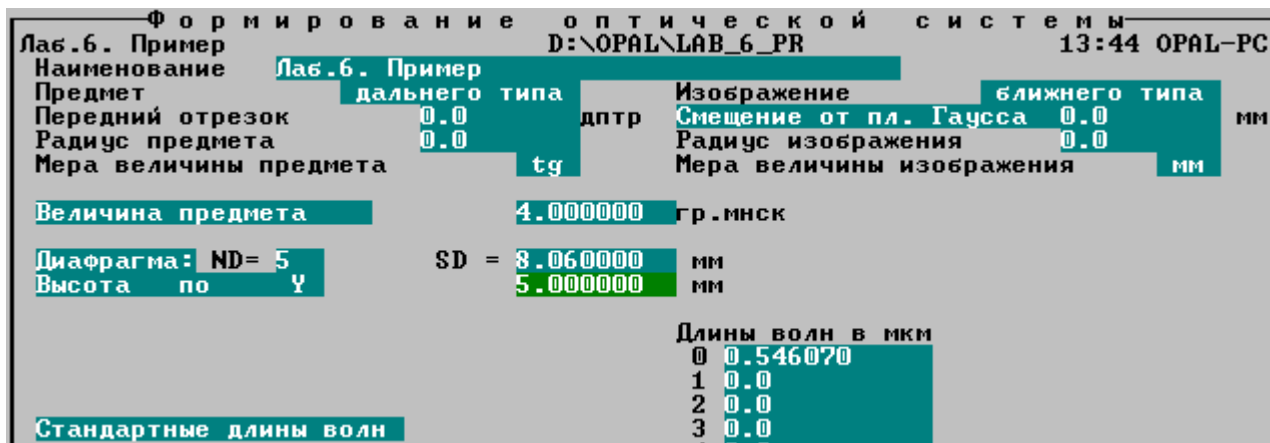


Рис.6.1. Параметры предмета, изображения, диафрагмы.

Внеосевые пучки можно задать при помощи пункта «Система / Параметры Внеосевых пучков». Первый пучок обычно задают выходящим из крайней точки предмета (относительная координата на предмете $\sigma = 1.0$), а второй пучок – выходящим из точки предмета с относительной координатой $\sigma = 0.707$.

6.3.2. Определение $W_{СКВ}$ и плоскости наилучшей установки

В пункте «Анализ волнового фронта / Плоскость наилучшей установки» приводятся положения плоскости наилучшей установки по различным критериям. Для дифракционно-ограниченных систем более точным будет значение положения плоскости наилучшей установки, вычисленное по волновому критерию. В этой же таблице приводятся значения среднеквадратического отклонения волнового фронта $W_{СКВ}$ в заданной и смещенной плоскости установки.

1 пучок пл. установки	Плоскость наилучшей установки			
	смещение	средне-квадратичная (СК)	$\Delta Y'$	$\Delta X'$
	$\Delta S'$	W		
заданная	.0000	.4148	.0071	.0062
волновой критерий	-.0886	.0738	.0018	.0012
геометр. критерий	-.0985	.0867	.0015	.0012

Рис.6.2. Определение $W_{СКВ}$.

Меняя параметр «Пучок» нужно по очереди определить плоскость наилучшей установки и $W_{СКВ}$ для каждого пучка и записать полученные значения в таблицу (пример оформления таблицы приводится в пункте «6.4.1.Пример оформления таблицы положений плоскости наилучшей установки»).

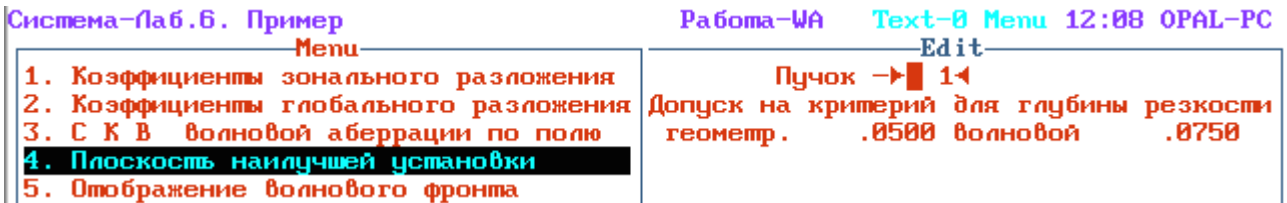


Рис.6.3. Определение $W_{СКВ}$ – изменение номера пучка.

6.3.3. Определение числа Штреля

Число Штреля можно рассчитать по приближенной формуле Марешаля:

$$St \approx 1 - 4\pi^2 W_{СКВ}^2.$$

Для первого пучка в плоскости Гаусса:

$$St \approx 1 - 4\pi^2 W_{СКВ}^2 = 1 - 4\pi^2 0.4148^2 = -5.79.$$

Поскольку формула Марешаля справедлива только для случая малых аберраций, при большом среднеквадратическом отклонении волнового фронта вычисленное по ней значение числа Штреля будет неверным.

Для первого пучка в плоскости наилучшего изображения:

$$St \approx 1 - 4\pi^2 W_{СКВ}^2 = 1 - 4\pi^2 0.0738^2 = 0.78.$$

Для остальных пучков число Штреля вычисляется аналогично.

Точное значение числа Штреля можно посмотреть в пункте «Анализ функции рассеяния точки / Функция рассеяния точки».

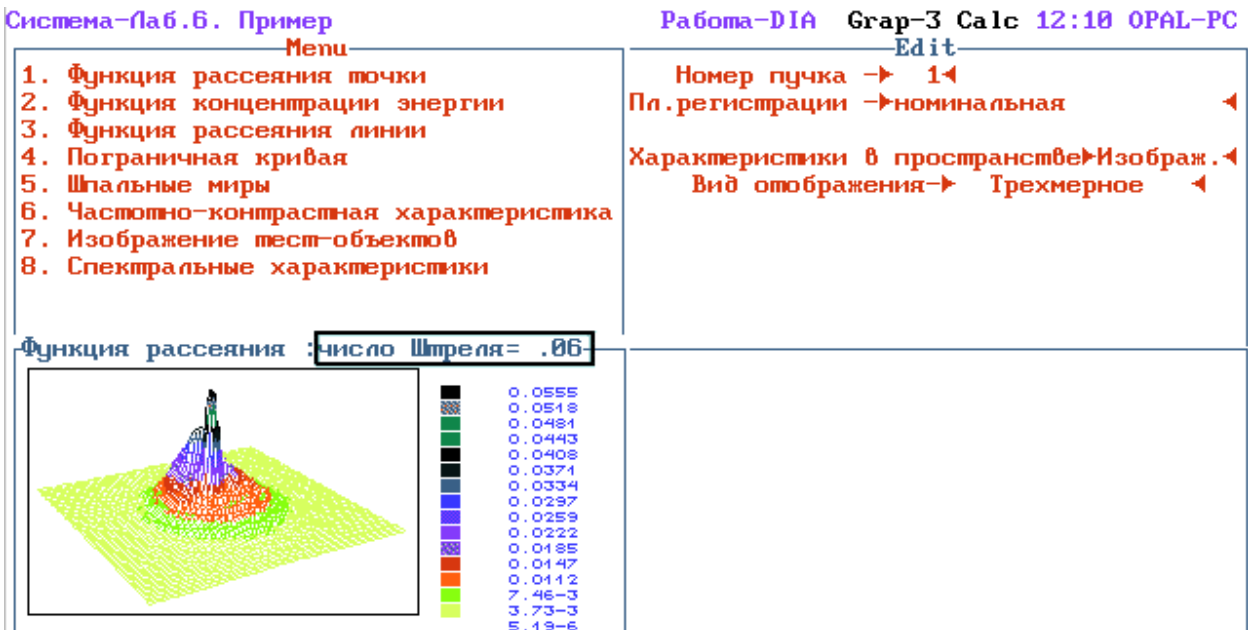


Рис.6.4. Функция рассеяния точки.

Для определения числа Штреля в смещенной плоскости изображения необходимо в настройках пункта «Функция рассеяния точки» задать требуемое смещение.

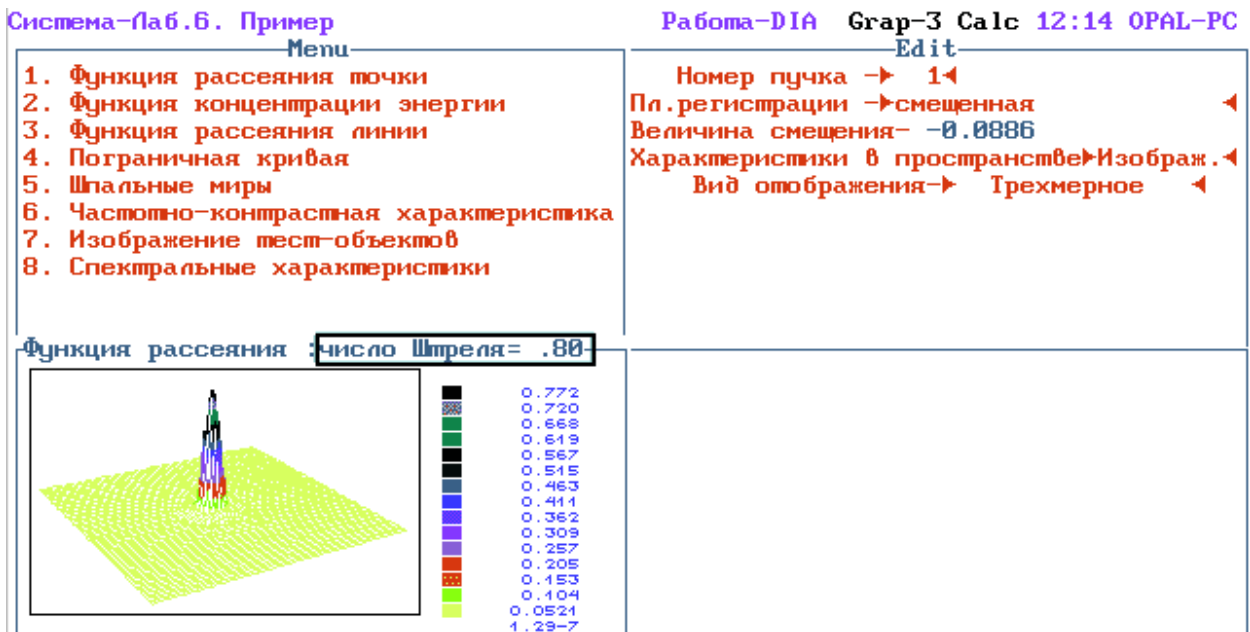


Рис.6.5. Функция рассеяния точки в смещенной плоскости изображения.

Для остальных пучков число Штреля определяется аналогично. Полученные значения нужно записать в таблицу («6.4.1.Пример оформления таблицы положений плоскости наилучшей установки») и сравнить с вычисленными.

6.3.4. Определение разрешающей способности

Разрешающую способность можно определить по частотно-контрастной характеристике (пункт «Анализ функции рассеяния точки / Частотно-контрастная характеристика»). Частотно-контрастную характеристику можно посмотреть в графическом и текстовом виде (переключение режимов по клавише «F6», разместить на весь экран по клавише «F5»).

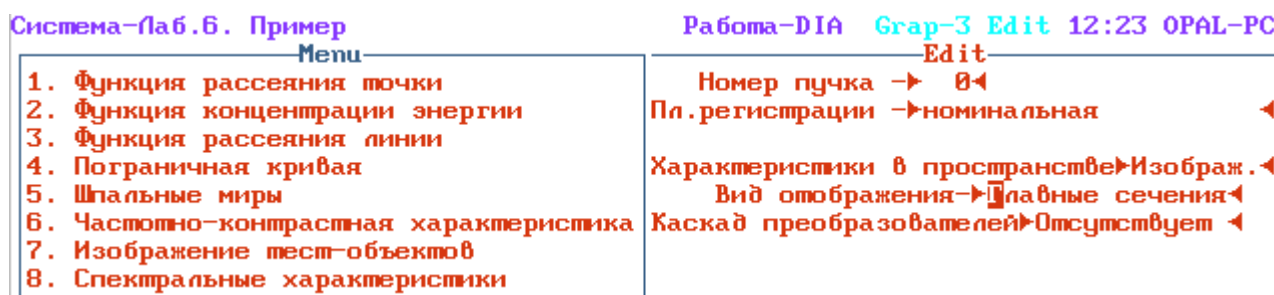
Система-Лаб.6. Пример Работа-DIA Text

Частотно-контрастная характеристика-

простр. частота лин/мм	γ = .0000	
	мер. L0 =	саг. .5461
.00	1.00	1.00
13.43	.91	.90
26.85	.77	.76
40.28	.62	.61
53.71	.49	.47
67.14	.38	.37
80.56	.30	.29
93.99	.24	.23
107.42	.19	.18
120.85	.15	.15
134.27	.12	.12
147.70	.10	.09
161.13	.07	.07
174.56	.05	.05
187.98	.04	.04
201.41	.02	.02

Рис.6.6. Частотно-контрастная характеристика в текстовом режиме.

Для просмотра частотно-контрастной характеристики в графическом режиме необходимо изменить настройки пункта «**Частотно-контрастная характеристика**» как показано на рисунке (нарисовать сетку по клавише «Space»).



Система-Лаб.6. Пример Работа-DIA Grap-0 20:25 OPAL-PC

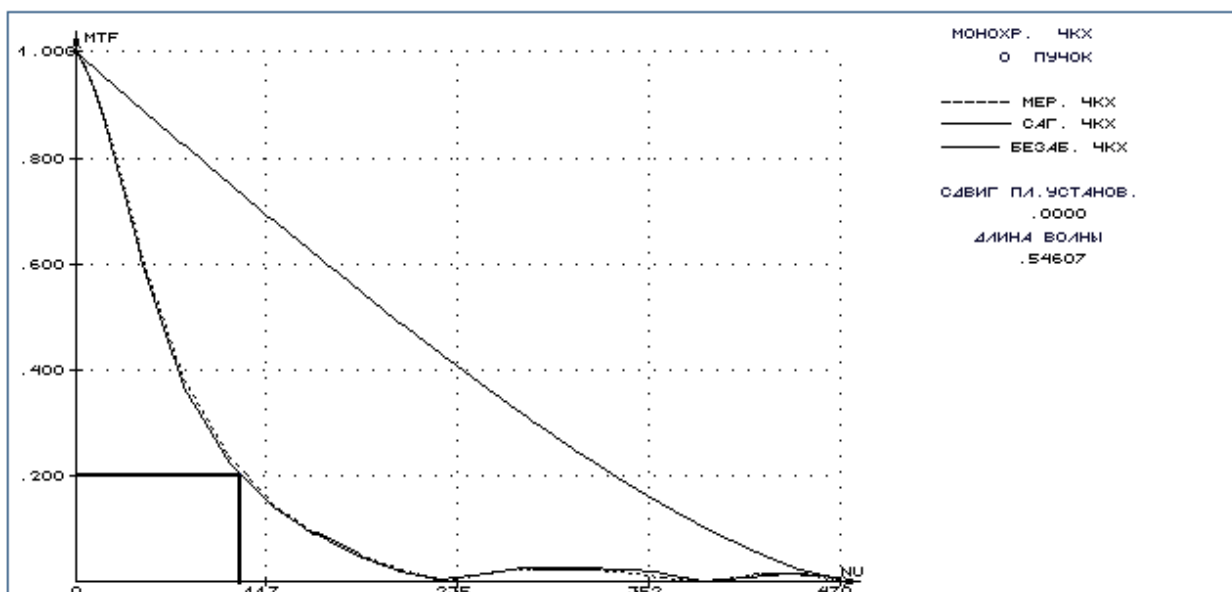


Рис.6.7. Частотно-контрастная характеристика в графическом режиме.

Разрешающая способность определяется по графику для контраста 0.2 в меридиональном сечении. Для более точного определения разрешающей способности можно воспользоваться численными значениями частотно-контрастной характеристики, или определять ее по графикам, нарисованным самостоятельно. Пример оформления графиков приведен в параграфе «6.4.2.Пример оформления графиков частотно-контрастной характеристики» (если в таблицу отчета не помещаются все значения ЧКХ, можно записать значения через один).

Для определения разрешающей способности в смещенной плоскости изображения необходимо в настройках пункта «**Частотно-контрастная характеристика**» задать требуемое смещение.

Записать в таблицу найденную разрешающую способность в номинальной и смещенной плоскости изображения для всех пучков.

Численные значения ЧКХ можно сохранить в текстовом файле (клавиша «F9»). В появившемся окне необходимо указать полный путь к папке и имя

файла. Для добавления в этот же файл новых данных пункт «new» нужно заменить на «add».

```

—Запись таблиц —
Directory - d:\opal\
File name - lab_6_pr .prn ▶new␣
Information- Частотно-контрастная характеристика

—Запись таблиц —
Directory - d:\opal\
File name - lab_6_pr .prn ▶add␣
Information- Частотно-контрастная характеристика

```

Рис.6.8. Запись значений ЧКХ в файл.

6.4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

1. Конструктивные параметры и оптическая схема объектива
 2. Расчеты по формуле Марешаля
 3. Таблица положений плоскости наилучшей установки для различных пучков и соответствующих им величин числа Штреля и разрешающей способности
 4. Численные значения и графики ЧКХ для всех пучков
- Пример выполнения отчета приводится в приложении 1.

6.4.1. Пример оформления таблицы положений плоскости наилучшей установки

	смещение dS', мм	W _{СКВ}	число Штреля (вычисленное)	число Штреля (точное)	разрешающая способность, лин/мм
первый пучок	0	0.4148	-5.79	0.06	50
	-0.0886	0.0738	0.78	0.80	310
второй пучок	0	0.3211	-3.07	0.04	60
	-0.0684	0.0574	0.87	0.86	315
осевой пучок	0	0.2277	-1.05	0.10	110
	-0.0481	0.0473	0.91	0.90	325

6.4.2. Пример оформления графиков ЧКХ

На одном графике привести частотно-контрастную характеристику в плоскости Гаусса и плоскости наилучшего изображения. Показать на графике разрешающую способность.

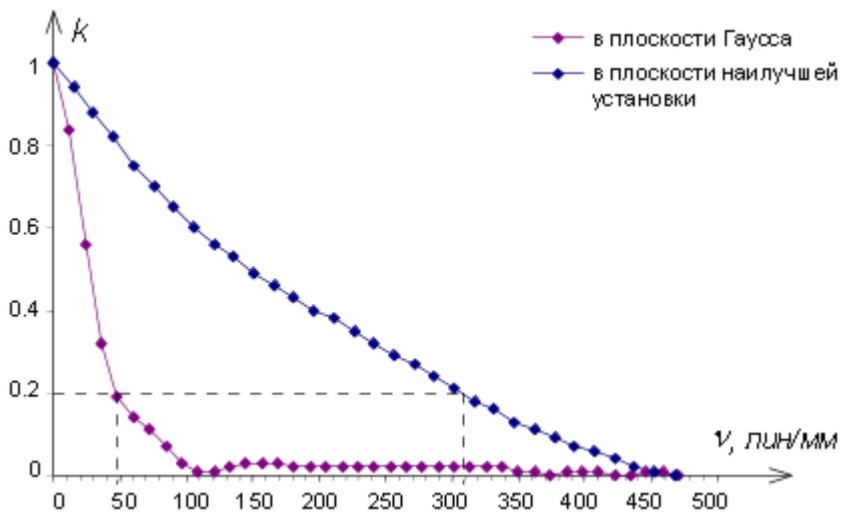


Рис.6.9. ЧКХ для 1 пучка.

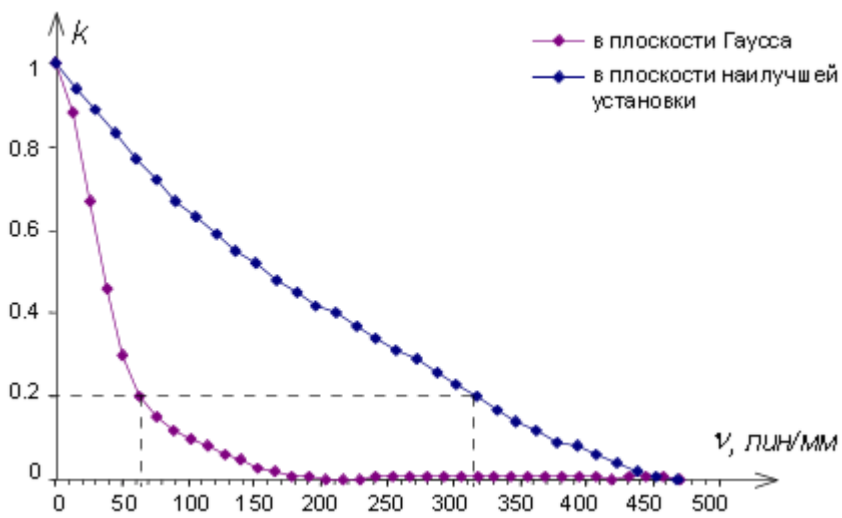


Рис.6.10. ЧКХ для 2 пучка.

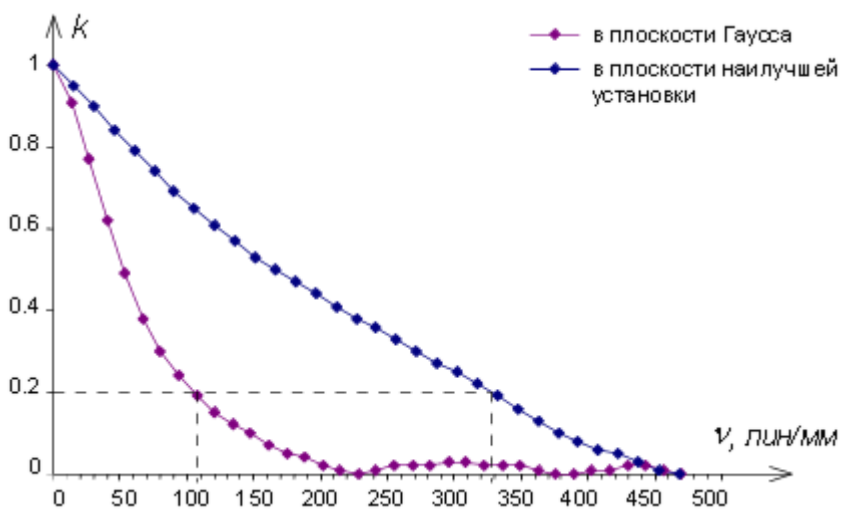


Рис.6.11. ЧКХ для осевого пучка.

6.5. Индивидуальные варианты задания

Вариант 1

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	32.5200	5.6000	ТК16
2	0.0	5.1000	ВОЗДУХ
3	-75.0100	3.2000	ЛФ7
4	28.9000	7.2000	ВОЗДУХ
5	0.0	1.8000	БФ1
6	28.6100	8.3000	ТК16
7	-47.7800		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=5^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 5.3 мм, передняя апертура $A=5.7$ мм. Длина волны "D".

Вариант 2

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	27.1600	7.2000	ТК20
2	0.0	6.4000	ВОЗДУХ
3	-57.5400	1.6000	ТФ1
4	25.7000	7.8500	ВОЗДУХ
5	131.8300	1.2000	БФ6
6	33.8100	7.2000	ТК21
7	-44.6700		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=5^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 3.9 мм, передняя апертура $A=5.3$ мм. Длина волны "D".

Вариант 3

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	17.1000	2.7000	ТК16
2	0.0	4.1800	ВОЗДУХ
3	-33.5700	1.0500	ЛФ5
4	14.5600	5.0500	ВОЗДУХ
5	346.7000	1.2000	ОФ1
6	15.0000	4.7000	ТК16
7	-23.5500		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=3.3^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 2.5 мм, передняя апертура $A=4.1$ мм. Длина волны "D".

Вариант 4

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	30.4800	4.5000	ТК16
2	0.0	4.9000	ВОЗДУХ
3	-68.2300	1.9000	ЛФ5
4	28.0500	8.4000	ВОЗДУХ
5	-214.8000	1.6000	ОФ1
6	28.5800	6.0000	ТК20
7	-44.0600		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=5^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 4.2 мм, передняя апертура $A=5.65$ мм. Длина волны "D".

Вариант 5

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	19.0300	5.4000	ТК20
2	-1296.0000	3.2000	ВОЗДУХ
3	-37.2250	1.4300	Ф2
4	17.2750	3.9600	ВОЗДУХ
5	194.6600	0.9000	ЛФ7
6	16.6200	5.8000	БФ16
7	-27.4450		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=4.7^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 2.66 мм, передняя апертура $A=4.5$ мм. Длина волны "D".

Вариант 6

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	82.4100	12.0000	ТК16
2	0.0000	12.5000	ВОЗДУХ
3	-193.2000	6.0000	ЛФ5
4	74.4700	19.7000	ВОЗДУХ
5	-608.1000	4.2000	ОФ1
6	75.8600	15.9000	ТК20
7	-121.0600		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=5.3^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 11.7 мм, передняя апертура $A=12.6$ мм. Длина волны "D".

Вариант 7

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	17.1000	2.7000	ТК14
2	0.0	4.1600	ВОЗДУХ
3	-33.5700	1.0500	ЛФ5
4	14.5600	5.0500	ВОЗДУХ
5	346.7000	1.2000	ОФ1
6	15.0000	4.7000	ТК14
7	-23.6000		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=5^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 2.3 мм, передняя апертура $A=4$ мм. Длина волны "D".

Вариант 8

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	57.6800	8.4000	ТК16
2	0.0	9.3000	ВОЗДУХ
3	-129.4200	4.0000	ЛФ5
4	52.9700	12.2000	ВОЗДУХ
5	-407.4000	3.0000	ОФ1
6	54.0800	11.2000	ТК20
7	-83.5600		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=4^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 8.1 мм, передняя апертура $A=10$ мм. Длина волны "D".

Вариант 9

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	38.4750	5.6000	ТК16
2	0.0	6.3500	ВОЗДУХ
3	-86.0680	2.5000	ЛФ5
4	35.2900	8.1200	ВОЗДУХ
5	-271.4800	2.0000	ОФ1
6	36.1490	7.5000	ТК20
7	-55.6500		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=5^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 5.23 мм, передняя апертура $A=7$ мм. Длина волны "D".

Вариант 10

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	23.5000	3.7300	ТК14
2	0.0	4.0500	ВОЗДУХ
3	-52.2600	2.7900	ЛФ5
4	21.0900	4.6400	ВОЗДУХ
5	0.0	1.9000	ОФ1
6	20.8400	5.1700	ТК20
7	-35.5600		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=5.2^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 3.9 мм, передняя апертура $A=5.1$ мм. Длина волны "D".

Вариант 11

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	19.0990	7.5000	СТК9
2	57.5400	1.5000	ВОЗДУХ
3	-80.1700	1.6000	Ф4
4	16.1060	3.8000	ВОЗДУХ
5	84.1400	1.5000	ЛФ9
6	19.0990	7.0000	СТК9
7	-40.4600		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=3^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 2 мм, передняя апертура $A=4.4$ мм. Длина волны "D".

Вариант 12

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	10.3280	3.2000	СТК9
2	35.3200	1.1000	ВОЗДУХ
3	-45.3900	1.0000	Ф8
4	9.1400	2.0000	ВОЗДУХ
5	48.8700	0.8000	ЛФ9
6	12.3030	3.2000	СТК9
7	-22.9100		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=4^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 1.4 мм, передняя апертура $A=2.6$ мм. Длина волны "D".

Вариант 13

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	17.5470	5.1000	ТК21
2	-680.6000	2.4400	ВОЗДУХ
3	-33.6040	1.2700	Ф9
4	15.3400	3.6800	ВОЗДУХ
5	204.1300	1.1100	БФ8
6	14.7290	4.6200	ТК21
7	-23.6500		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=3^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 2.75 мм, передняя апертура $A=3.52$ мм. Длина волны "D".

Вариант 14

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	17.1400	3.5500	СТК9
2	118.8500	1.7000	ВОЗДУХ
3	-60.5300	3.9500	Ф8
4	14.0600	3.5500	ВОЗДУХ
5	91.8300	1.4000	ЛФ9
6	17.5390	4.5000	СТК9
7	-33.3400		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=3.5^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 2 мм, передняя апертура $A=3.9$ мм. Длина волны "D".

Вариант 15

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	3.5650	1.0700	ТК20
2	0.0	0.5900	ВОЗДУХ
3	-7.2440	0.2500	Ф4
4	3.2810	0.7500	ВОЗДУХ
5	30.9000	0.2500	ЛФ5
6	3.2510	1.0000	БФ16
7	-5.2720		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=5.1^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 0.65 мм, передняя апертура $A=1.1$ мм. Длина волны "D".

Вариант 16

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	13.1400	3.8800	СТК9
2	43.7500	1.6600	ВОЗДУХ
3	-57.9400	1.2100	Ф8
4	11.6440	2.0100	ВОЗДУХ
5	62.2300	1.1500	ЛФ9
6	15.7400	4.1200	СТК9
7	-29.9200		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=4.5^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 1 мм, передняя апертура $A=3.3$ мм. Длина волны "D".

Вариант 17

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	8.3560	1.7000	СТК9
2	86.5000	0.7000	ВОЗДУХ
3	-19.4540	0.9000	ТФ1
4	8.7100	1.2000	ВОЗДУХ
5	1896.7000	0.8000	ТФ1
6	41.4000	2.7000	СТК9
7	-13.5830		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=1.3^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 1 мм, передняя апертура $A=2.3$ мм. Длина волны "D".

Вариант 18

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	9.8630	3.0000	СТК16
2	25.1800	0.9000	ВОЗДУХ
3	-38.9000	1.1300	ТФ2
4	9.0780	1.0100	ВОЗДУХ
5	45.5000	0.6300	БФ24
6	9.0360	3.2300	СТК16
7	-20.3200		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=7^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 7 поверхности на расстоянии 0.75 мм, передняя апертура $A=2.5$ мм. Длина волны "D".

Вариант 19

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	14.0280	4.2200	СТК9
2	57.3300	1.3500	ВОЗДУХ
3	-54.5800	1.3200	Ф8
4	12.5030	2.7000	ВОЗДУХ
5	87.5700	1.0600	ЛФ9
6	16.5960	4.2200	СТК9
7	-29.1100		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=3.5^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 7 поверхности на расстоянии 1 мм, передняя апертура $A=3.2$ мм. Длина волны "D".

Вариант 20

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	15.6830	4.5000	СТК9
2	125.2500	0.1000	ВОЗДУХ
3	8.7020	4.5000	БФ26
4	-14.2400	1.5000	ТФ5
5	7.2310	3.0000	ВОЗДУХ
6	7.5750	1.5000	ТК16
7	5.1840	3.5000	СТК9
8	-70.3700		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=-1^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 5-й поверхности на расстоянии 1 мм, передняя апертура $A=3.34$ мм. Длина волны "e".

Вариант 21

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	88.8100	8.6000	ТК20
2	441.8600	2.2800	ВОЗДУХ
3	55.9100	10.0000	ТК20
4	77.6600	10.8000	К1
5	-959.7000	14.5000	ТФ2
6	37.0200	39.8000	ВОЗДУХ
7	186.8000	3.8000	ТФ7
8	-2367.8000		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=3^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 6 поверхности на расстоянии 37.7 мм, передняя апертура $A=13.79$ мм. Длина волны "D".

Вариант 22

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	стекло
1	6.9000	3.5000	ТК16
2	13.6700	0.0500	ВОЗДУХ
3	5.7600	0.6000	ТФ5
4	4.0160	4.2600	ВОЗДУХ
5	-4.3370	0.5000	ТФ5
6	-5.7000	0.0500	ВОЗДУХ
7	-16.8710	3.5000	ТК16
8	-6.9500		ВОЗДУХ

Предмет дальнего типа, $\omega=1.2^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4 поверхности на расстоянии 2.13 мм, передняя апертура $A=3.5$ мм. Длина волны "D".

6.6. Вопросы к защите

1. Функция рассеяния точки. Диск Эри.
2. Гармоническая периодическая решетка, пространственная частота.
3. Частотно контрастная характеристика. Разрешающая способность по Фуко.
4. Число Штреля, формула Марешаля.
5. Определения дисперсии и СКВ волновой аберрации.

Все определения можно посмотреть в глоссарии электронного учебника [2].

Для защиты лабораторной работы можно пройти обучающий тест по сценарию «Л.р.№6. Исследование качества изображения оптических систем».

Приложение 1. Примеры отчетов к лабораторным работам

Лабораторная работа 2. Определение параксиальных параметров склеенного объектива.

Данные к лабораторной работе

r1	r2	r3	d1	d2	Стекло	Стекло	Данные
117.76	-85.11	-358.09	10	4	К8	Ф2	$\beta=3$

Параксиальные характеристики:

	f	f'	S_F	S'_F	S_H	S'_H
вся система	-203.930	203.930	-202.337	196.390	1.593	-7.540
1-я линза	-96.951	96.951	-93.063	94.141	3.889	-2.810
2-я линза	180.933	-180.933	180.159	-184.189	-0.774	-3.256

Вычисления:

Объектив:

$$\beta = -\frac{f}{z} \Rightarrow z = -\frac{f}{\beta} = \frac{203.930}{3} = 67.977 \text{ мм}, \quad \beta = -\frac{z'}{f'} \Rightarrow$$

$$z' = -f' \cdot \beta = -203.930 \cdot 3 = -611.789 \text{ мм}.$$

$$S = z + SF = 67.977 - 202.337 = -134.36 \text{ мм}, \quad S' = z' + SF' = -611.789 + 196.390 = -415.399 \text{ мм}.$$

Первая линза:

$$S_1 = S = -134.36 \text{ мм}, \quad z_1 = S_1 - SF_1 = -134.36 + 93.063 = -41.297 \text{ мм}.$$

$$\beta_1 = -\frac{f_1}{z_1} = -\frac{-96.951}{-41.297} = -2.348^{\times}, \quad z'_1 = -f'_1 \cdot \beta_1 = -96.951 \cdot (-2.348) = 227.605 \text{ мм}.$$

$$S'_1 = z'_1 + SF'_1 = 227.605 + 94.141 = 321.746 \text{ мм}.$$

Вторая линза:

$$S_2 = S'_1 = 321.746 \text{ мм}, \quad z_2 = S_2 - SF_2 = 321.746 - 180.159 = 141.587 \text{ мм}.$$

$$\beta_2 = -\frac{f_2}{z_2} = -\frac{180.933}{141.587} = -1.278^{\times}, \quad z'_2 = -f'_2 \cdot \beta_2 = 180.933 \cdot (-1.278) = -231.211 \text{ мм}.$$

$$S'_2 = z'_2 + SF'_2 = -231.211 - 184.189 = -415.400 \text{ мм}.$$

Результаты вычислений:

	результаты вычислений					результаты проверки на OPAL	
	S	z	z'	S'	β	S'	β
вся система	-134.360	67.977	-611.789	-415.399	3.000	-415.400	3.000
1-я линза	-134.360	-41.297	227.605	321.746	-2.348		
2-я линза	321.746	141.587	-231.211	-415.400	-1.278		

Проверка:

$$\text{Задний отрезок: } S'_2 = -415.400 \text{ мм}, \quad S' = -415.399 \text{ мм}.$$

$$\text{Увеличение: } \beta = 3.000^{\times}, \quad \beta_1 \cdot \beta_2 = -2.348 \cdot -1.278 = 3.000^{\times}.$$

Рис.1. Кардинальные точки и отрезки объектива. Масштаб 1:2

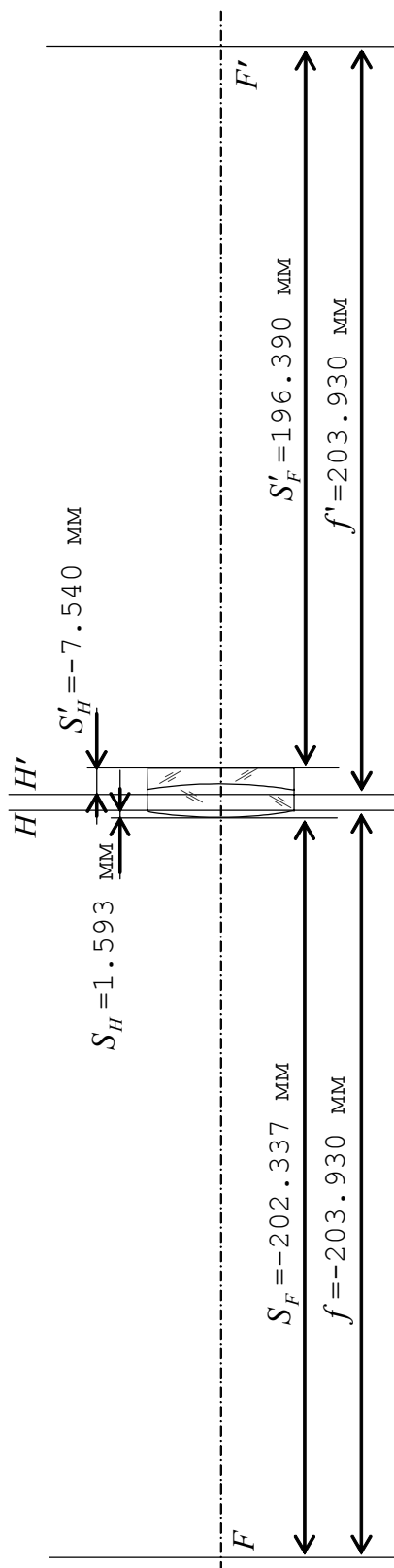


Рис.2. Построение изображения в объективе. Масштаб 1:4

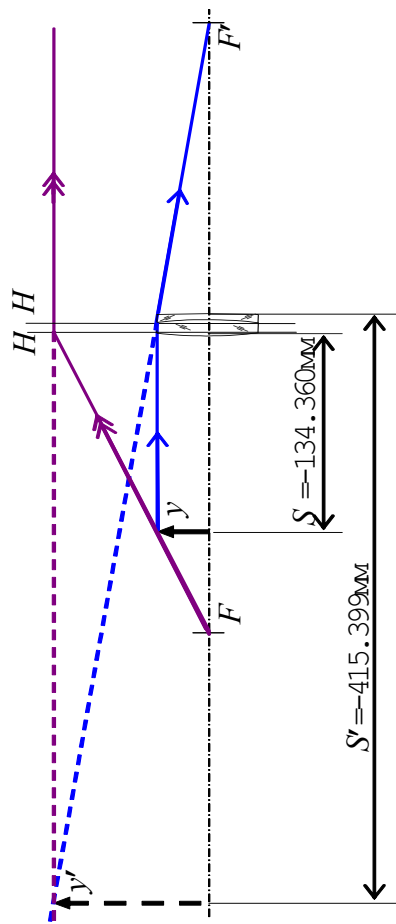


Рис.3. Кардинальные точки и отрезки 1-ой линзы. Масштаб 1:1.

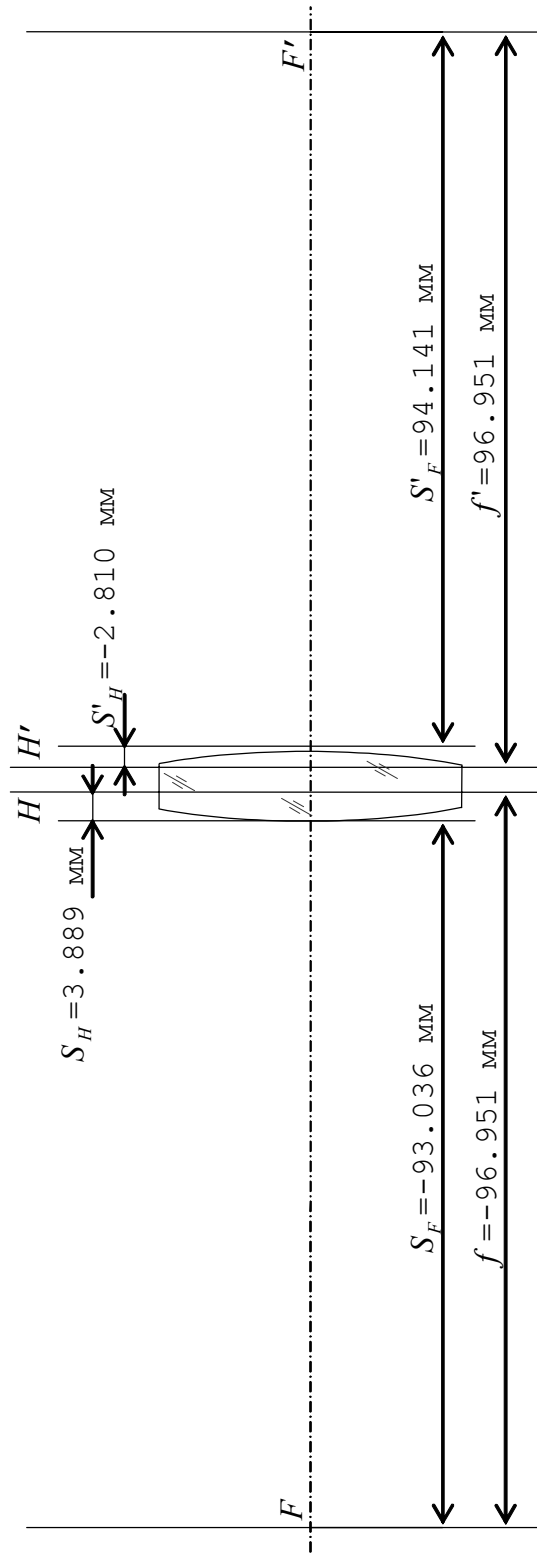


Рис.4. Построение изображения в 1-ой линзе. Масштаб 1:2.

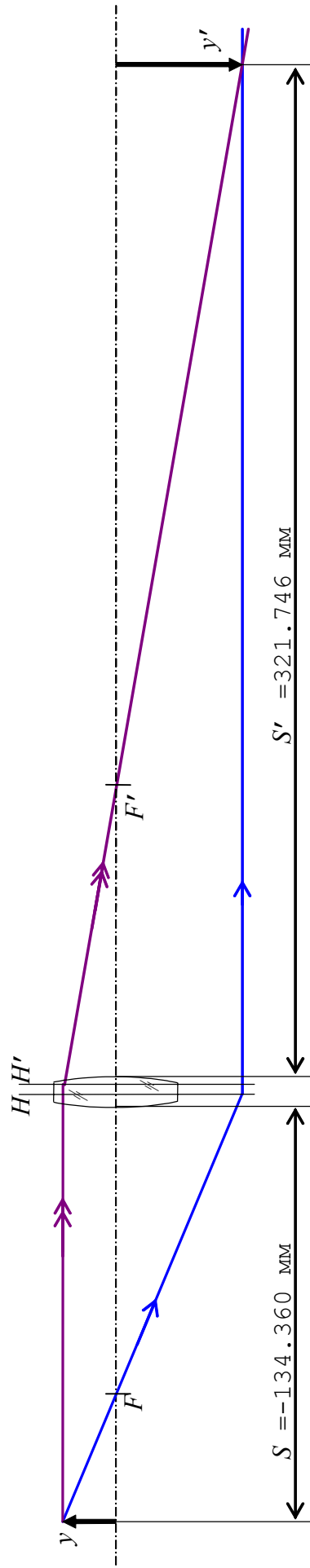


Рис.5. Кардинальные точки и отрезки 2-ой линзы. Масштаб 1:1.

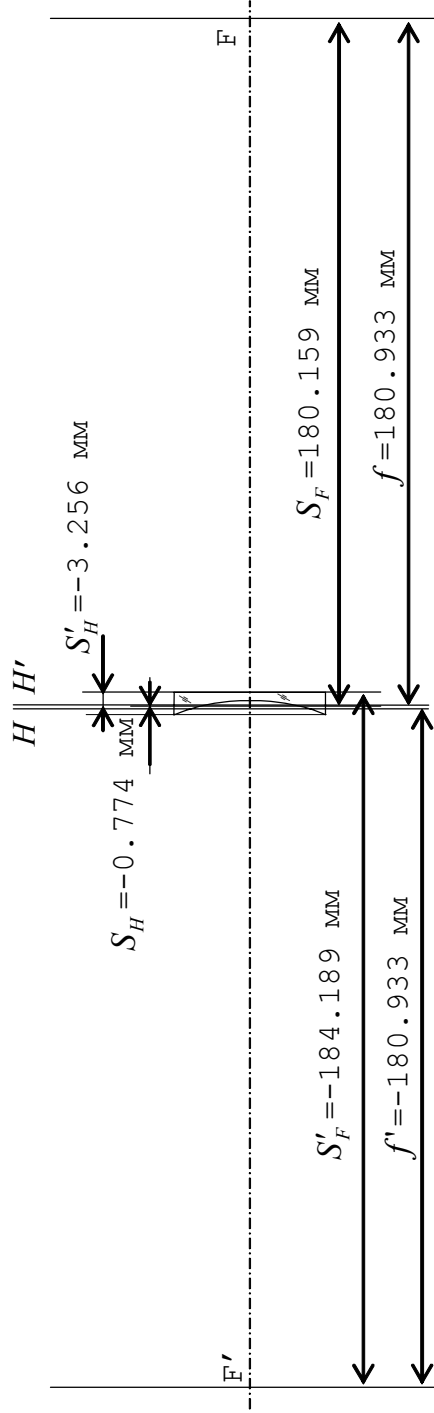
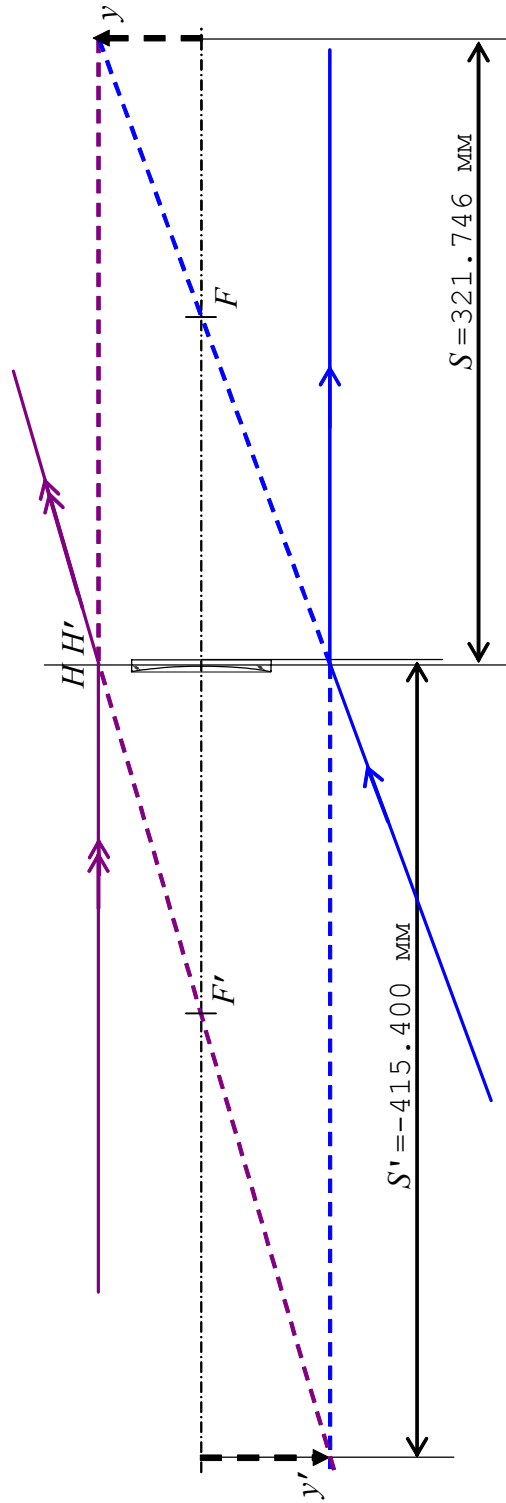


Рис.6. Построение изображения во 2-ой линзе. Масштаб 1:4.



Лабораторная работа 3. Ограничение пучков лучей в оптических системах

Данные к лабораторной работе:

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	Стекло
1	37,11	7,5	ТК23
2	0	9,2	
3	-60,81	2,8	Ф4
4	37,67	9,6	
5	123,31	6,0	ТК20
6	-47,42		

Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 2.9 мм от 4-ой поверхности. Относительное отверстие объектива 1:3.5. Предмет находится в бесконечности, угловое поле $2\omega = 24^\circ$.

Параксиальные характеристики:

	f	f'	S_F	S'_F	S_H	S'_H
вся система	-100.2665	100.2665	-81.3273	81.6304	18.9391	-18.6360
до диафрагмы	205.6607	-205.6607	289.7162	-157.2644	84.0555	48.3962
после диафрагмы	-55.5754	55.5754	-52.8716	54.5356	2.7038	-1.0398

Вычисления

$$D = f' / 2.8 = \frac{100.267}{2.8} = 35.8 \text{ мм}$$

первая часть системы:

$$S'_{1\text{Ад}} = 2.9 \text{ мм}, z'_1 = S'_{1\text{Ад}} - SF'_1 = 2.9 + 157.264 = 160.164 \text{ мм}$$

$$z_1 = \frac{f_1 \cdot f'_1}{z'_1} = \frac{-205.661 \cdot 205.661}{160.164} = -264.081 \text{ мм}$$

$$S_p = z_1 + SF_1 = -264.081 + 289.716 = 25.636 \text{ мм}$$

$$\beta_1 = -\frac{z'_1}{f'_1} = -\frac{-160.164}{205.661} = -0.779^\times, D_{\text{Ад}} = \beta_1 \cdot D = -0.779 \cdot 35.8 = 27.88 \text{ мм}$$

вторая часть системы:

$$S_{2\text{Ад}} = S'_{2\text{Ад}} - d_4 = 2.9 - 9.6 = -6.7 \text{ мм}, z_2 = S_{2\text{Ад}} - SF_2 = -6.7 + 52.871 = 46.172 \text{ мм}$$

$$z'_2 = \frac{f_2 \cdot f'_2}{z_2} = \frac{-55.575 \cdot 55.575}{46.172} = -66.892 \text{ мм}$$

$$S'_p = z'_2 + SF'_2 = -66.892 + 54.536 = -12.359 \text{ мм}$$

$$\beta_2 = -\frac{z'_2}{f'_2} = -\frac{-66.892}{55.575} = 1.204^\times, D' = \beta_2 \cdot D_{\text{Ад}} = 1.204 \cdot 27.88 = 33.56 \text{ мм}$$

Результаты вычислений:

диаметр входного зрачка $D = 35.8 \text{ мм}$,

диаметр выходного зрачка $D' = 33.56 \text{ мм}$,

положение входного зрачка $S_p = 25.636 \text{ мм}$,

положение выходного зрачка $S'_p = -12.359 \text{ мм}$,
 диаметр апертурной диафрагмы $D_{АД} = 27.88 \text{ мм}$,
 положение апертурной диафрагмы $S'_{1АД} = 2.9 \text{ мм}$,
 задняя апертура $A' = 0.1757 \text{ мм}$,

Результаты проверки на OPAL:

$S_p = 25.636 \text{ мм}$, $S'_p = -12.359 \text{ мм}$, $A' = 0.1807 \text{ мм}$.

Рис. 1. Чертеж объектива с указанием положения и диаметров входного и выходного зрачков, апертурной диафрагмы. Масштаб 2:1

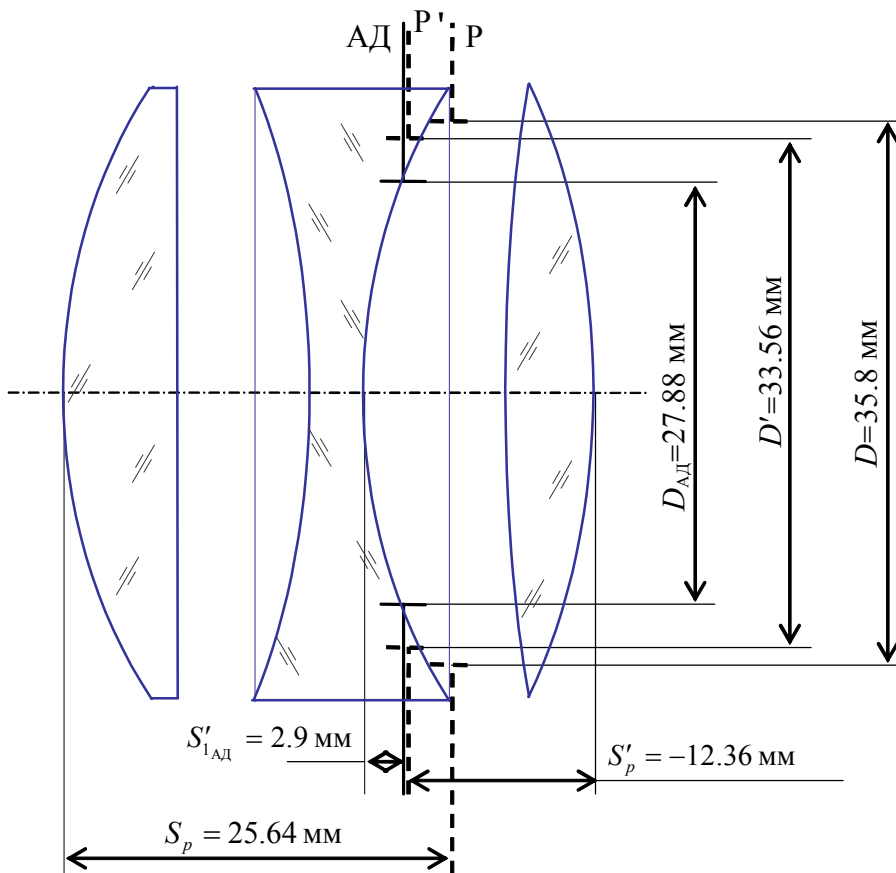


Рис.2. Чертеж, иллюстрирующий перенос апертурной диафрагмы в пространство предметов. Масштаб 1:2

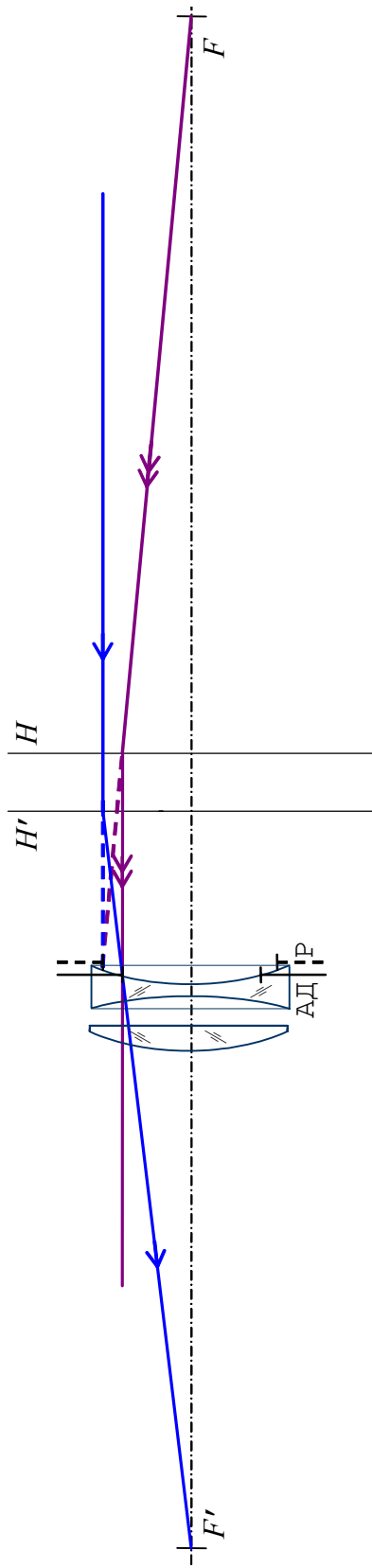


Рис.3. Чертеж, иллюстрирующий перенос апертурной диафрагмы в пространство изображений. Масштаб 2:1

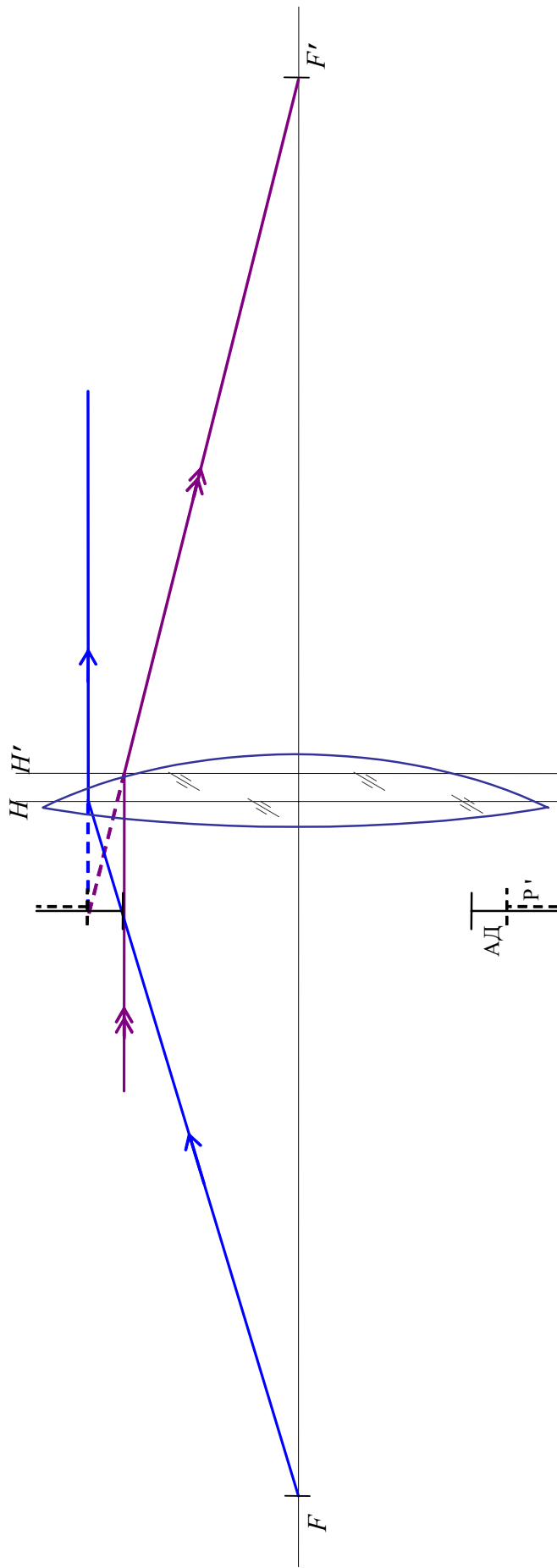
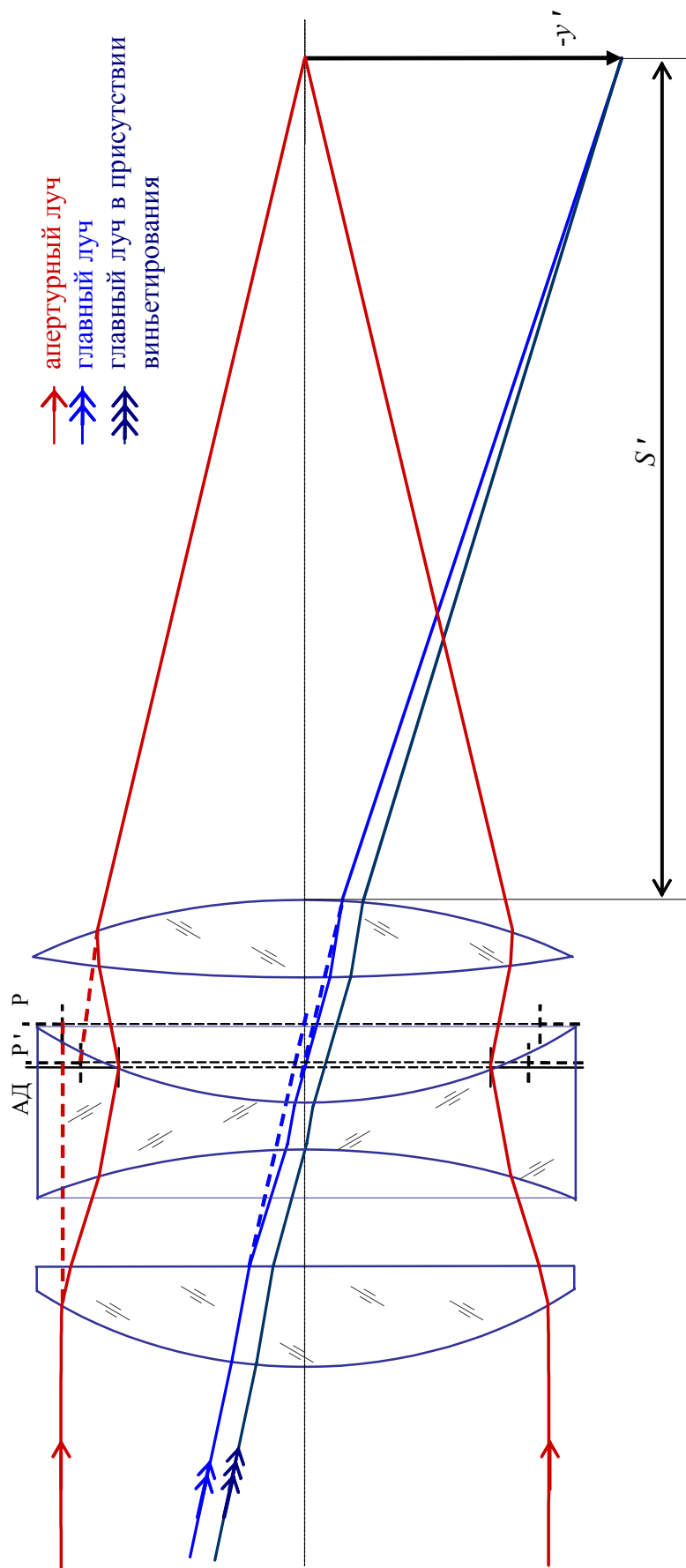


Рис.4. Ход апертурного луча и ход главного луча без виньетирования и в присутствии виньетирования.
Масштаб 2:1



Лабораторная работа 4. Исследование aberrаций осевой точки

Данные к лабораторной работе:

r_1	r_2	r_3	d_1	d_2	Марка стекла	Марка стекла	Относительное отверстие
110,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:4

Параксиальные характеристики:

f	f'	S_F	S'_F	S_H	S'_H
-204.4167	204.4167	-203.0569	197.9641	1.3591	-6.4526

Оптическая схема объектива

Масштаб 1:1

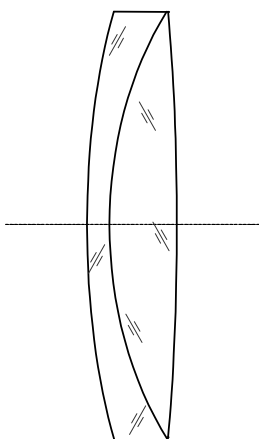


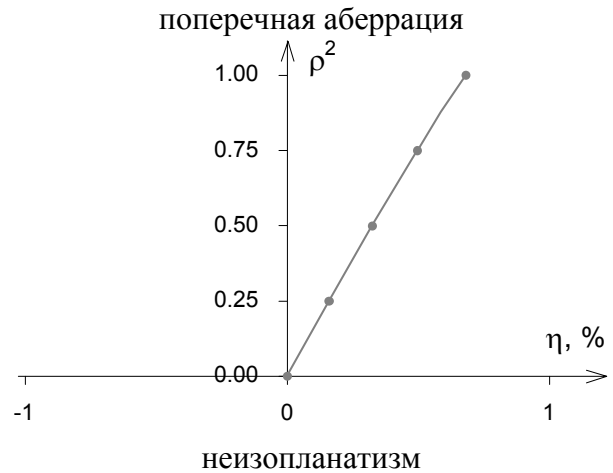
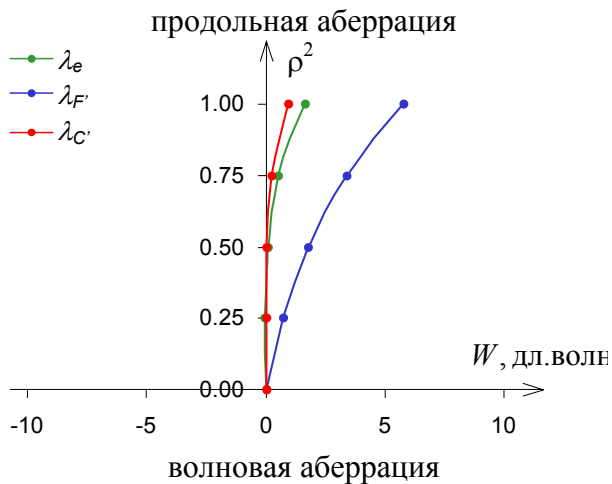
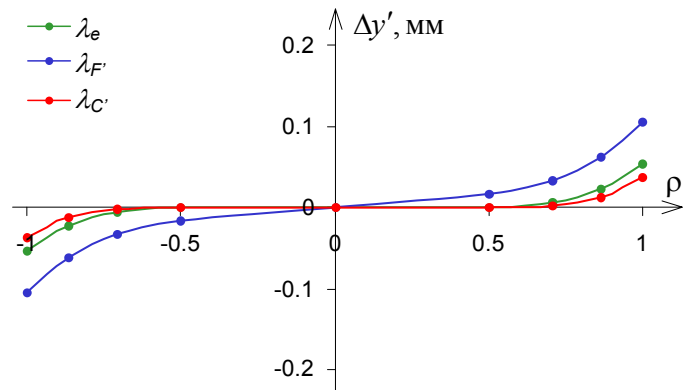
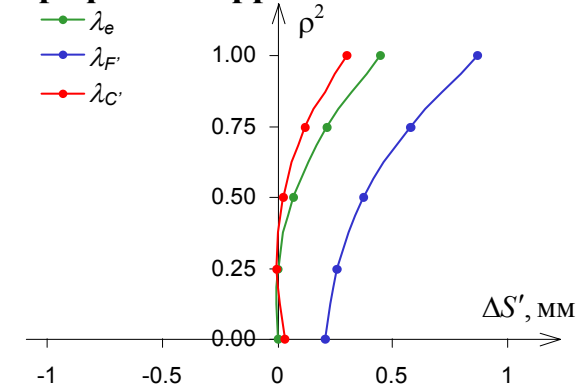
Таблица диаметров пятна рассеяния в различных положениях плоскости изображения

смещение плоскости изображения от плоскости Гаусса, мм	диаметр пятна рассеяния, мм		
	по поперечным aberrациям	по точечным диаграммам	по точечным диаграммам, содержащий 80% энергии
0	0.1090	0.1169	0.0519
0.3	0.0399	0.0425	0.0340

Аберрации осевого пучка в плоскости Гаусса

ρ	Продольные aberrации (мм)			хроматизм $S'_{F'} - S'_{C'}$	Поперечные aberrации (мм)		
	λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$		λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$
1.000	0.44639	0.87061	0.30286	0.56775	0.054506	0.106065	0.037013
0.866	0.21379	0.57617	0.12062	0.45555	0.022632	0.060879	0.012777
0.707	0.06919	0.37617	0.02199	0.35418	0.005984	0.032401	0.001902
0.500	0.00115	0.25561	-0.00392	0.25953	0.000070	0.015614	-0.000240
0.000	0.00000	0.20707	0.03372	0.17335	0.000000	0.000000	0.000000
ρ	Волновые aberrации (дл. волн)			неизопл. η	P_y		
	λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$				
1.000	1.6195	5.7919	0.9508	0.6805	25.5520		
.866	0.5382	3.3985	0.2645	0.4999	22.1287		
.707	0.0834	1.8191	0.0455	0.3266	18.0680		
.500	-0.0158	0.7704	0.0340	0.1601	12.7760		
.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

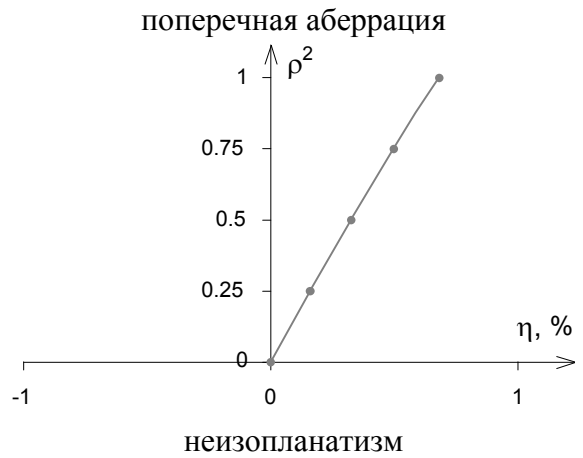
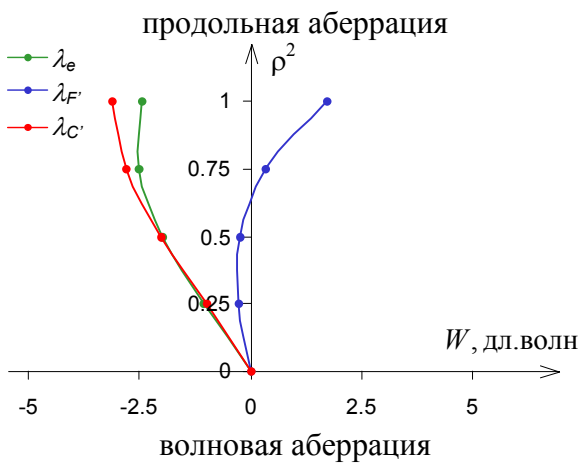
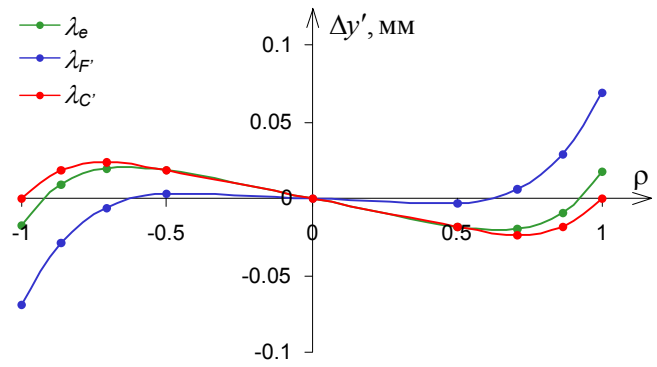
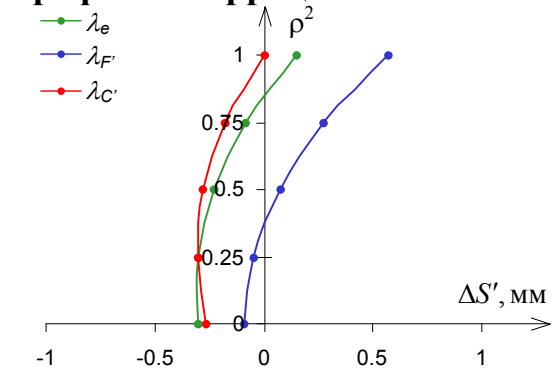
Графики aberrаций



Аберрации осевого пучка в плоскости наилучшей установки

ρ	Продольные aberrации (мм)			хроматизм $S'_{F'} - S'_{C'}$	Поперечные aberrации (мм)		
	λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$		λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$
1.000	0.14639	0.57061	0.00286	0.56775	0.017875	0.069517	0.000349
0.866	-0.08621	0.27617	-0.17938	0.45555	-0.009127	0.029180	-0.019001
0.707	-0.23081	0.07522	-0.27801	0.35323	-0.019962	0.006495	-0.024052
0.500	-0.29885	-0.04439	-0.30392	0.25953	-0.018279	-0.002712	-0.018590
0.000	-0.30000	-0.09293	-0.26628	0.173350	0.000000	0.000000	0.000000
ρ	Волновые aberrации (дл. волн)			неизопл. η	P_y		
	λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$				
1.000	-2.4425	1.7315	-3.1125	0.6798	25.5520		
.866	-2.5165	0.3446	-2.7909	0.4993	22.1287		
.707	-1.9583	-0.2223	-1.9965	0.3262	18.0680		
.500	-1.0392	-0.2529	-0.9893	0.1600	12.7760		
.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

Графики aberrаций



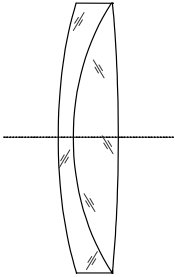
Лабораторная работа 5. Исследование aberrаций внеосевой точки

Данные к лабораторной работе

r_1	r_2	r_3	d_1	d_2	Марка стекла	Марка стекла	Относительное отверстие	2ω , град.	S_P
108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	1:4	4	-30,0

Оптическая схема объектива

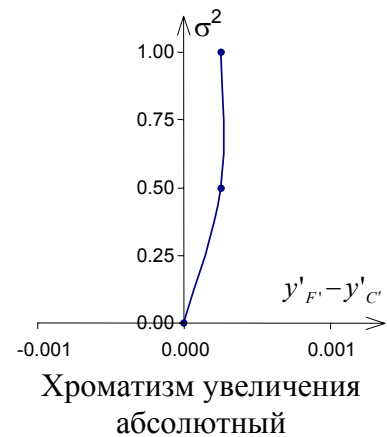
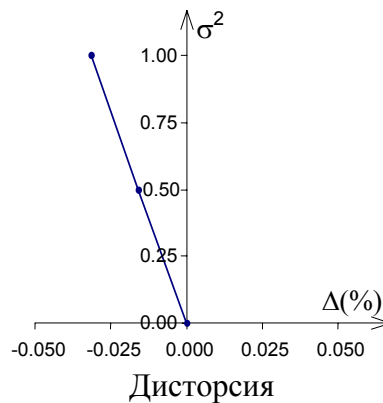
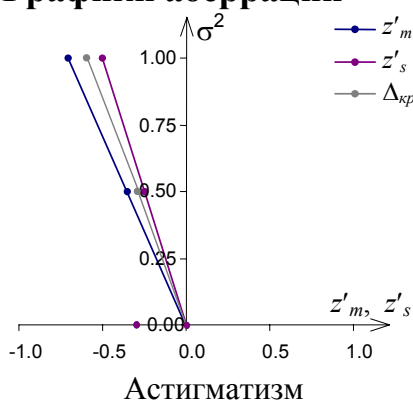
Масштаб 1:1



Аберрации узкого пучка лучей

Величина предмета		Величина изображения	Астигматические отрезки		астигматизм	кривизна	Дисторсия		Хроматизм увеличения
σ относ.	ω (гр. минсек)	y' (мм)	z'_m (мм)	z'_s (мм)	$z'_m - z'_s$ (мм)	$\frac{z'_m + z'_s}{2}$ (мм)	$\Delta y'_0$ (мм)	$\Delta\%$	$y'_{F'} - y'_{C'}$ (мм)
1.000	$2^\circ 00' 00''$	-6.9903	-0.6422	-0.4728	-0.1694	-0.5575	0.00220	-0.0315	0.0001
0.707	$1^\circ 24' 51''$	-4.9429	-0.4712	-0.3865	-0.0847	-0.4289	0.00077	-0.0157	0.0001
0.000	$0^\circ 00' 00''$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.0000	0.0000

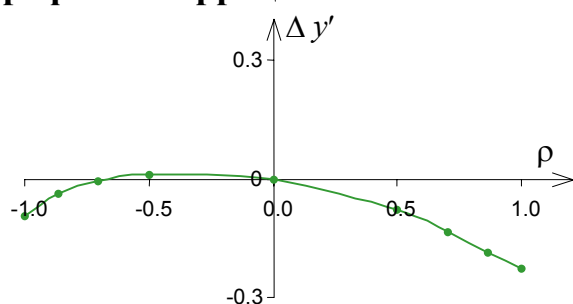
Графики aberrаций



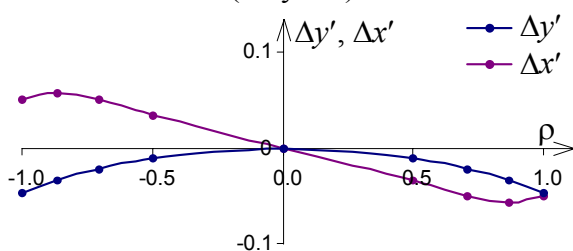
Аберрации широкого пучка лучей

вых. зр. к-ты ρ'	Меридиональное сечение		Сагиттальное сечение			
	Поперечные аберрации $\Delta y'$ (мм)		1 пучок, $\omega = 2^\circ$		2 пучок, $\omega = 1^\circ 24' 51''$	
	1 пучок, $\omega = 2^\circ$	2 пучок, $\omega = 1^\circ 24' 51''$	Поперечные абerrации $\Delta x'$ (мм)	Поперечные абerrации $\Delta y'$ (мм)	Поперечные абerrации $\Delta x'$ (мм)	Поперечные абerrации $\Delta y'$ (мм)
1.000	-0.22828	-0.16190	-0.05044	-0.04767	-0.03999	-0.03368
0.866	-0.18587	-0.13553	-0.05739	-0.03439	-0.04823	-0.02429
0.707	-0.13508	-0.09988	-0.05103	-0.02208	-0.04347	-0.01560
0.500	-0.07793	-0.05769	-0.03471	-0.01064	-0.02933	-0.00752
0.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.500	0.01205	0.01124	Кома			
-0.707	-0.00541	0.00086	Первый пучок: $k = -0.06695$ мм			
-0.866	-0.03956	-0.02332	Второй пучок: $k = -0.04825$ мм			
-1.000	-0.09439	-0.06540				

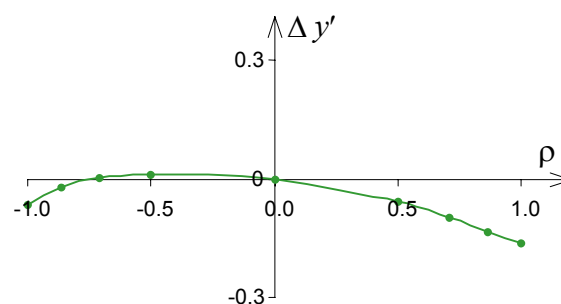
Графики аберраций



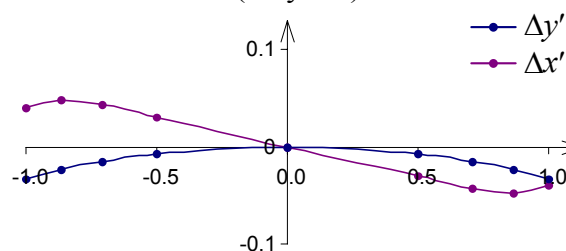
Поперечные аберрации в меридиональном сечении (1 пучок)



Поперечные аберрации в сагиттальном сечении (1 пучок)

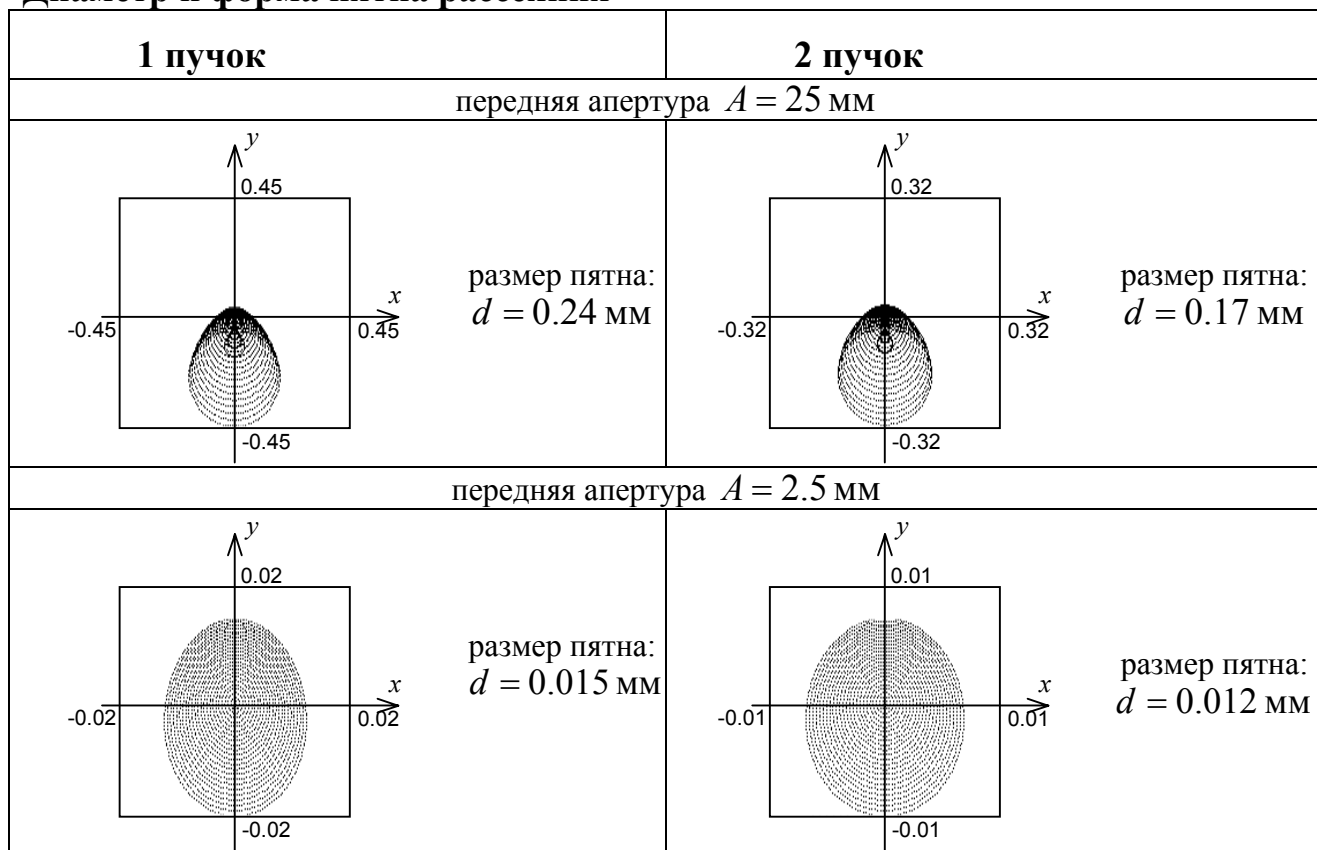


Поперечные аберрации в меридиональном сечении (2 пучок)



Поперечные аберрации в сагиттальном сечении (2 пучок)

Диаметр и форма пятна рассеяния



Положение плоскости наилучшей установки

номер пучка	положение плоскости наилучшей установки (по точечным диаграммам)	кривизна, (мм)
1 пучок	-0.5	-0.5575
2 пучок	-0.4	-0.4289
осевой пучок	-0.3	-0.3000

Лабораторная работа 6. Исследование качества изображения оптических систем

Данные к лабораторной работе

Конструктивные параметры:

№ пов-ти	радиусы кривизны	осевые расстояния	Стекло
1	30.538	5.17	СТК3
2	80.66	0.07	
3	21.998	4.75	СТК3
4	29.48	1.92	ТФ1
5	14.54	15.96	
6	-14.855	1.98	Ф1
7	141.93	5.35	СТК3
8	-19.866	0.07	
9	223.5	3.83	СТК12
10	-45.22		

Предмет дальнего типа, $\omega = 4^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 5 поверхности на расстоянии 8.06 мм, высота по Y 5.0 мм. Длина волны λ_e .

Оптическая схема объектива

Масштаб 1:2

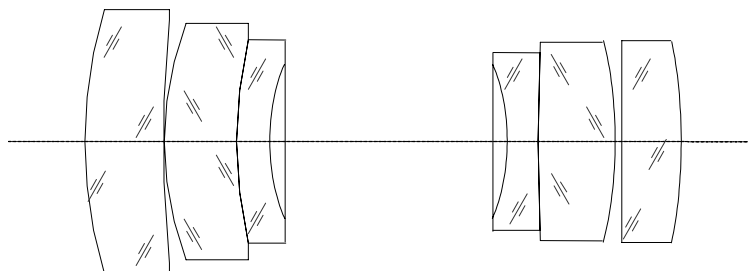
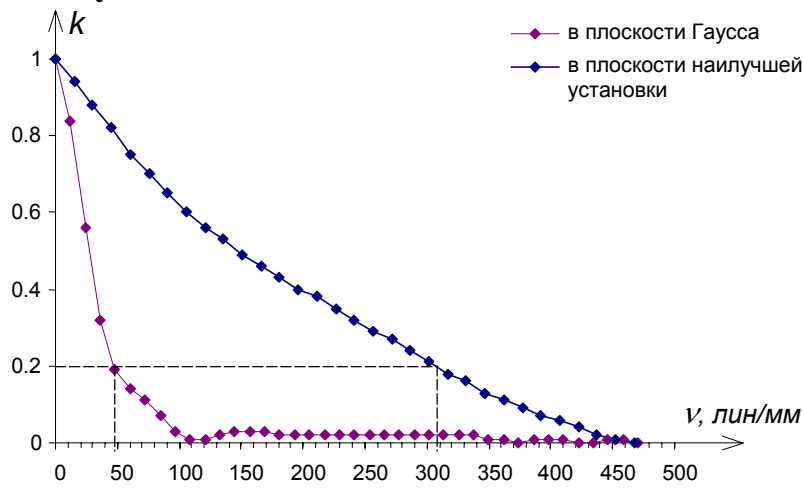


Таблица положений плоскости наилучшей установки

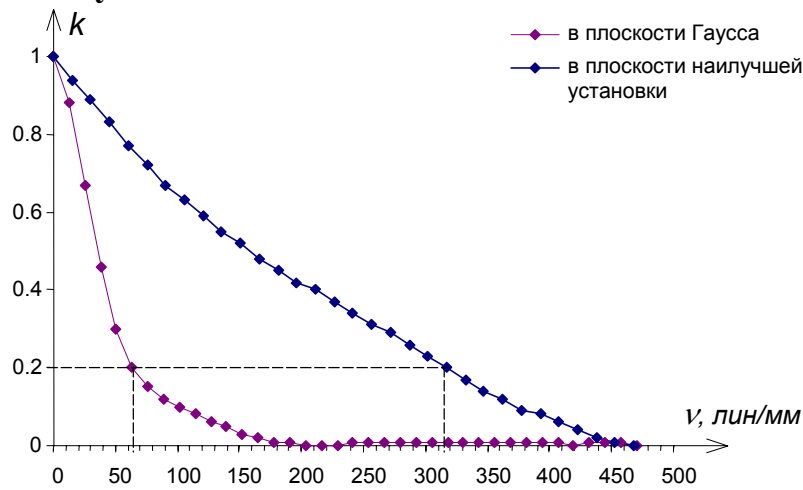
	смещение dS' , мм	$W_{СКВ}$	число Штреля (вычисленное)	число Штреля (точное)	разрешающая способность, лин/мм
первый пучок	0	0.4148	-5.79	0.06	50
	-0.0886	0.0738	0.78	0.80	310
второй пучок	0	0.3211	-3.07	0.04	60
	-0.0684	0.0574	0.87	0.86	315
осевой пучок	0	0.2277	-1.05	0.10	110
	-0.0481	0.0473	0.91	0.90	325

Графики ЧКХ

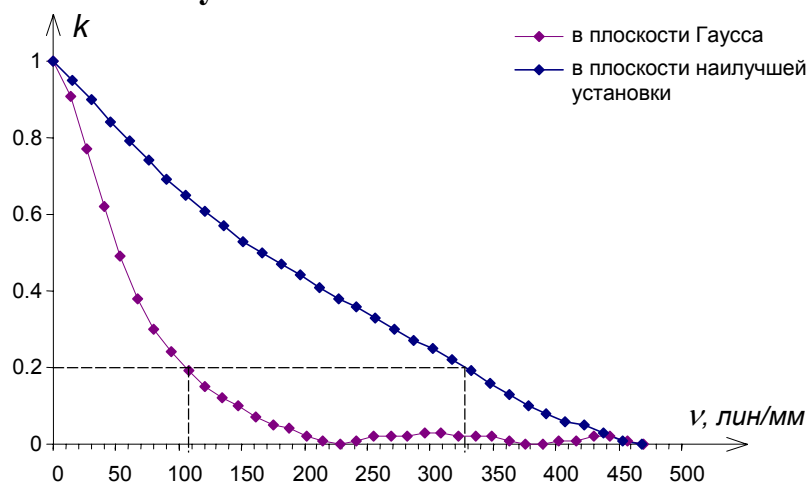
1 пучок



2 пучок



Осевой пучок



Приложение 2. Описание работы с программой OPAL-PC

П2.1. Запуск программы

При запуске программы OPAL необходимо ввести имя подкаталога, в котором будут храниться файлы с оптическими системами. В большинстве компьютерных классов в качестве имени подкаталога предлагается использовать номер группы.

```
C:\program\Opal>set opal_work=z:\
C:\program\Opal>set opal_temp=C:\temp\
C:\program\Opal>set opal_save=z:\
C:\program\Opal>c:\program\opal\keyrus80.com
```

<pre><<<< KeyRus >>>> Support national languages for IBM PC or compatible computers Version 8.0 beta7 from November 2 1992 (c) Copyright 1989-1992 by Gurtjak D. (Ukraine, Donetsk)</pre>
ULISS Presentation

```
USAGE: KEYRUS [/key1 /key2 ...] - run KeyRus
        KEYRUS [/key1 /key2 ...] /SAVE - for save par
C:\program\Opal>opal.com
Ведите подкаталог:
```

Рис.П2.1. Запуск программы OPAL.

П2.2. Блок «Формирование»

При запуске OPAL-а первым загружается блок «Формирование» вместе с информацией о последней оптической системе, с которой производилась работа. Блок «Формирование» предназначен для описания параметров оптической системы.

Строка заголовка окна «Формирование» содержит название оптической системы, полный путь и имя файла, в котором она хранится, и текущее время. Строка подсказки внизу экрана содержит информацию об используемых функциональных клавишах.

Доступ к различным таблицам блока «Формирование» осуществляется с помощью меню (вызов меню по клавише «F2» или «Esc»). Некоторые пункты меню могут быть недоступными в зависимости от конфигурации OPAL-а, типа оптической системы и таблицы данных, редактируемой в данный момент.

Таблицы содержат снабженные комментарием редактируемые поля, числовые и текстовые. Содержимое некоторых текстовых полей при последовательном нажатии на клавишу «Space» или «Enter» принимает одно из допустимых для этого поля значений.

При редактировании полей можно пользоваться клавишами:

- «Alt»+«F7» – копирует содержимое текущего поля в буфер;
- «Alt»+«C» – помещает содержимое буфера в текущее поле;
- «F10» – отменяет внесенные изменения.

Работа в OPAL-е осуществляется только при помощи клавиатуры, мышь не работает!

П2.2.1. Меню «Файл»

Чтение оптической системы

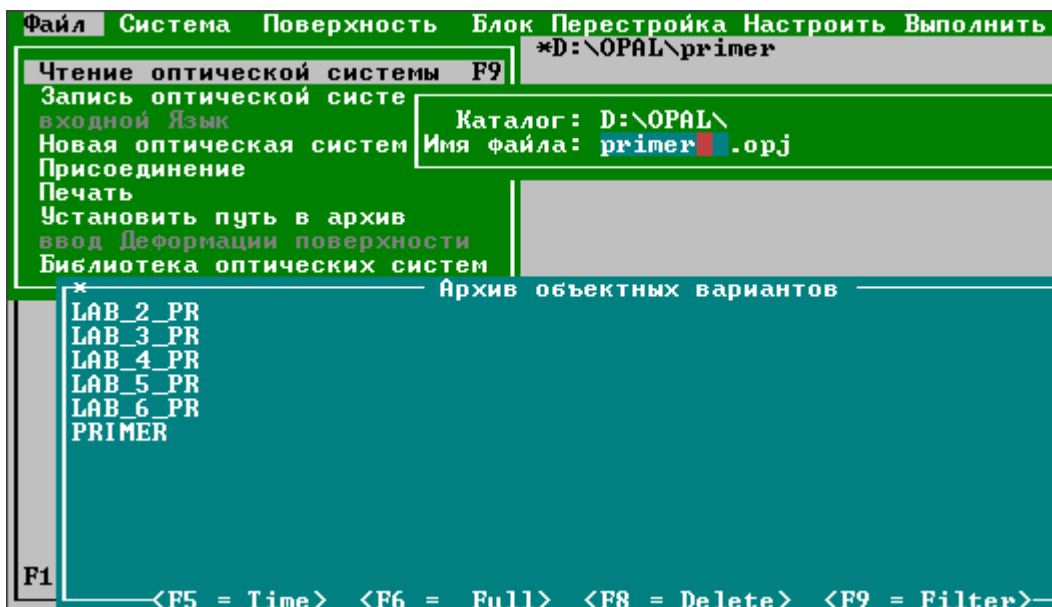


Рис.П2.2. Чтение оптической системы.

При выборе этого пункта на экране отображается текущее имя оптической системы и текущий путь к архиву оптических систем. Во втором окне отображаются имена оптических систем (файлов с расширением «.orj»), содержащихся в этом архиве.

Действия по нажатию функциональных клавиш отображаются в строке подсказки в нижней части экрана.

Запись оптической системы

Запись оптической системы в файл.

Новая оптическая система

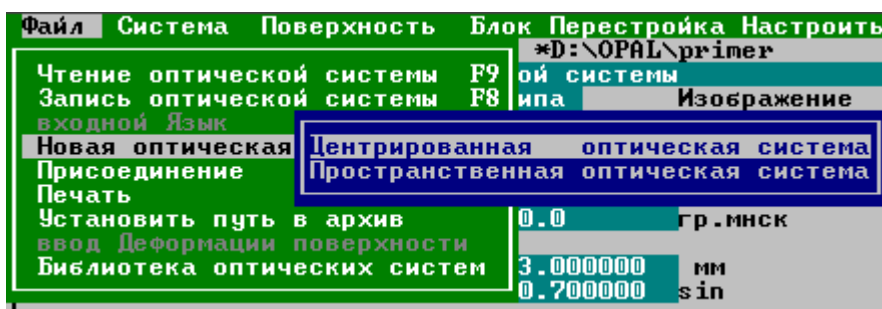


Рис.П2.3. Новая оптическая система.

Создание новой оптической системы. При создании новой оптической системы необходимо указать ее класс: центрированная или пространственная. На лабораторных работах по «Основам оптики» оптические системы всегда центрированные.

Присоединение

Добавление к текущей оптической системе другую оптическую систему, читаемую из файла. Все поверхности присоединяемой оптической системы добавляются в конец текущей. Расстояние между системами можно откорректировать вручную. Характеристики предмета, изображения, диафрагмы и спектральный диапазон остаются такими же, как в текущей оптической системе.

Печать

Печать характеристик оптической системы или сохранение их в файле в текстовом формате. Вывод оптической системы может осуществляться на принтер или в файл. Если принтер выключен или отсутствует, предлагается сохранить описание оптической системы в файле.

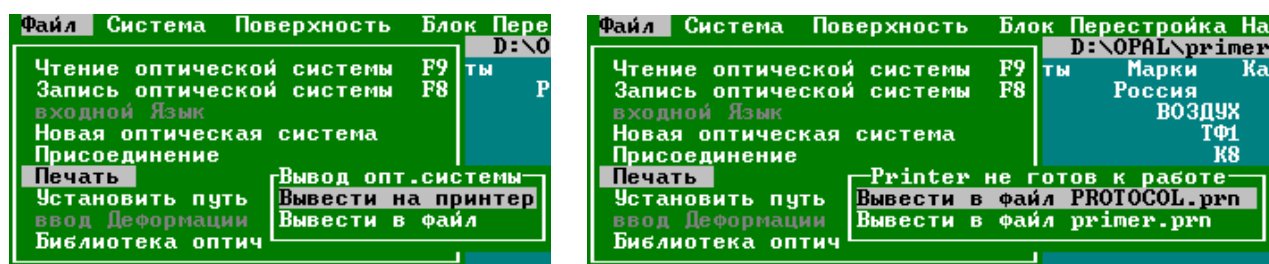


Рис.П2.4. Печать файла.

При печати в файл имя файла может быть либо «protocol.prn», либо «имя системы.prn». Другие варианты имени выходного файла не предусмотрены. Файл «имя системы.prn» сохраняется в текущем архиве оптических систем, а файл «protocol.prn» – в каталоге, определенном в переменной окружения OPAL_TEMP (обычно C:\TEMP).

Файл «protocol.prn» автоматически пополняется результатами блоков анализа, но при следующем входе в блок «Формирование» полностью очищается.

Установить путь в архив

Изменение пути к подкаталогу, в котором хранятся файлы с оптическими системами пользователя. Необходимо указать полный путь к новому подкаталогу, включая имя жесткого диска. Вновь установленный путь будет использоваться до выхода из OPAL-а или до следующего изменения.

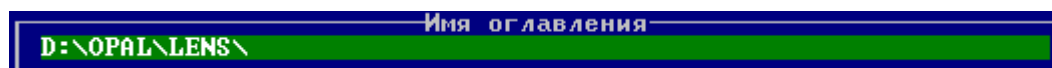


Рис.6.12. Путь в архив.

Библиотека оптических систем

Чтение оптической системы из библиотеки оптических систем. Файлы в библиотеке оптических систем разделены по категориям (например, LENS – объективы фотоаппаратов, MICROLEN – микрообъективы, и т.д.) и снабжены комментарием с краткими характеристиками системы.

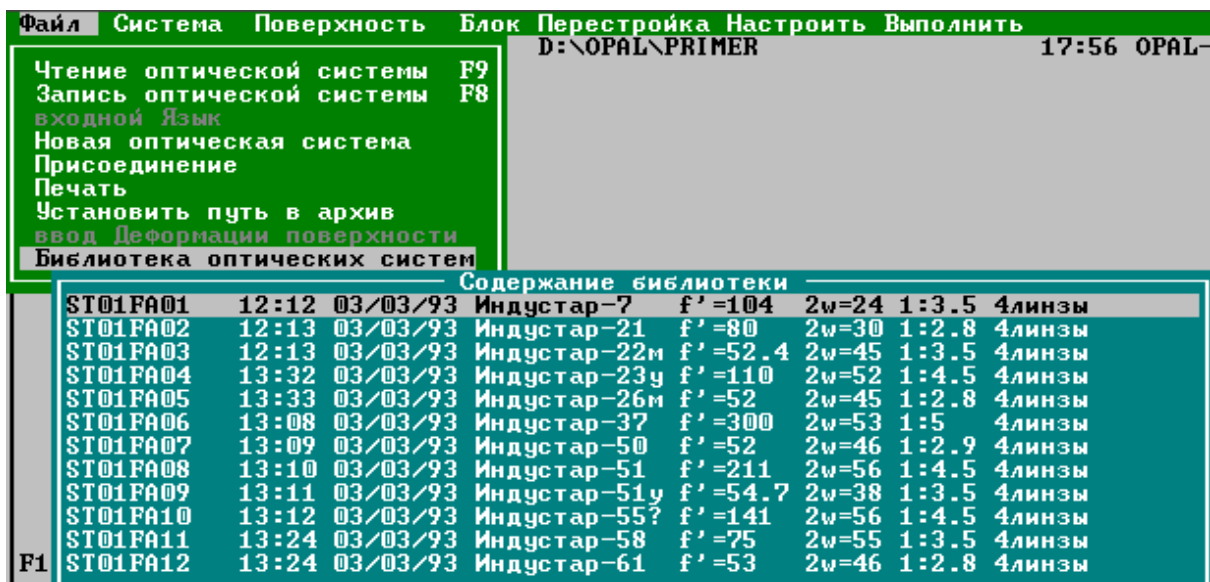


Рис.П2.5. Библиотека оптических систем.

П2.2.2. Меню «Система»

В этом пункте меню объединяются действия, относящиеся ко всей оптической системе в целом.

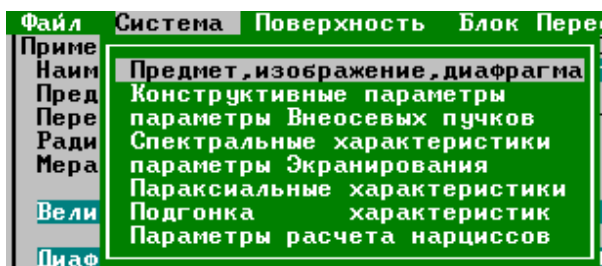


Рис.П2.6. Меню «Система».

Предмет, изображение, диафрагма

В этом пункте осуществляется задание параметров предмета, изображения, апертурной диафрагмы и спектральных характеристик. Переход между полями осуществляется с помощью клавиши «Tab» или клавиш управления курсором.

Наименование

Текстовое поле, содержащее название и краткое оптической системы.

Параметры предмета

При описании предмета необходимо определить следующие его характеристики:

- **тип предмета** – ближний/дальний. Изменение типа предмета возможно нажатием клавиши «Space» или «Enter»;
- **передний отрезок** – в зависимости от типа предмета имеет разный смысл и единицы измерения;
- **радиус предмета** – в большинстве случаев предмет считается плоским, и его радиус не задается;
- **мера величины предмета** – обычно оставляется по умолчанию.

Ф о р м и р о в а н и е о п т и ч е с к о й с и с т е м ы			
Пример оптической системы	D:\OPAL\primer		17:16 OPAL-PC
Наименование	Пример оптической системы		
Предмет	дальнего типа	Изображение	ближнего типа
Передний отрезок	0.0 дптр	Смещение от пл. Гаусса	0.0 мм
Радиус предмета	0.0	Радиус изображения	0.0
Мера величины предмета	tg	Мера величины изображения	мм
Величина предмета	0.0	гр.мнск	

Рис.П2.7. Параметры предмета, изображения, диафрагмы.

Для предмета дальнего типа при вычислении дисторсии может быть использован разный способ описания его размера: синусом, тангенсом, либо просто углом поля зрения. Величина предмета при этом не изменяется. Ни на какие характеристики оптической системы помимо дисторсии мера величины предмета влияния не оказывает.

Параметры изображения

- **тип изображения** – ближний/дальний. Изменение типа возможно нажатием клавиши «Space» или «Enter»;
- **положение изображения** – для изображения существует два способа определения его положения: «От поверхности (зрачка)» или «Смещение от плоскости Гаусса» (изменение по клавише «Space» или «Enter»). В первом случае положение изображения задается непосредственно задним отрезком, а во втором случае положение изображения определяется относительно плоскости Гаусса (плоскости изображения для основной длины волны в параксиальном приближении);
- **радиус изображения** – в большинстве случаев изображение считается плоским, и его радиус не задается;
- **мера величины изображения** – обычно оставляется по умолчанию.

Задание величины предмета или изображения

Можно задавать либо величину предмета, либо величину изображения. Выбор производится переключением значения текстового поля «Величина предмета» / «Величина изображения». В зависимости от типа предмета или изображения его величина имеет разный смысл и единицы измерения.

Угловые размеры задаются в градусах, минутах и секундах согласно следующему правилу: целая часть действительного числа трактуется всегда как градусы, первые две десятичные цифры после запятой – как минуты, следующие две цифры – как секунды, остальные цифры – как десятичные доли секунды. Например: 80.36402 – 80 градусов, 36 минут и 40.2 секунд; 35.3 – 35 градусов, 30 минут.

Апертурная диафрагма и входной зрачок

Положение апертурной диафрагмы описывается двумя величинами:

- «ND» – номер поверхности, после которой располагается диафрагма. Если диафрагма расположена перед оптической системой, ND=0.
- «SD» – расстояние от поверхности с номером ND до апертурной диафрагмы с учетом правила знаков. Для ND=0 расстояние измеряется от

первой поверхности.

Диафрагма: ND= 1	SD = 3.0	мм
Передняя Апертура	25.000000	мм

SD должно иметь тот же знак, что и показатель преломления среды, в которой она находится (кроме случая ND=0). Кроме того, оно должно быть меньше, чем расстояние между поверхностями с номерами ND и ND+1.

Диафрагма не должна находиться близко к поверхности предмета, изображения или промежуточного изображения – это может вызвать сбой при расчете реальных лучей.

Вместо положения апертурной диафрагмы можно задать положение **входного зрачка** путем переключения значения поля «Диафрагма». При этом в поле ND появляется признак 999, а SD трактуется как положение входного зрачка. Использовать входной зрачок принято в системах с телецентрическим ходом лучей.

Апертуры

Задание апертур возможно несколькими способами:

- значением передней апертуры
- значением задней апертуры
- высотой на диафрагме

Диафрагма: ND= 1	SD = 3.0	мм
Передняя Апертура	25.000000	мм
Диафрагма: ND= 1	SD = 3.0	мм
Задняя Апертура	0.7000000	sin
Диафрагма: ND= 1	SD = 3.0	мм
Высота по Y	20.000000	мм

Переключение между способами производится в текстовом поле «Передняя апертура/ Задняя апертура/ Высота по Y». Значение апертуры задается в соседнем поле.

Основные спектральные характеристики оптической системы

Рабочие длины волн оптической системы задаются в поле «Длины волн». Значения длин волн можно либо задавать самостоятельно, либо выбирать из списка стандартных длин волн. В пункте «Стандартные длины волн» перечислены стандартные длины волн и соответствующие им обозначения. В колонке «Номер» расположено перемещаемое поле, с помощью которого производится выбор: оно устанавливается напротив выбранной длины волны, затем в него вводится номер, под которым эта длина волны будет занесена в окно «Длины волн», и нажимается клавиша «Enter». Длины волн нумеруются, начиная с нулевой.

Выбор стандартных длин волн			мм
Номер	Длина волны в мкм	Обозначение	sin
	0.36501	i	
	0.40466	h	
	0.43405	G'	
	0.43583	g	
	0.48000	F'	
	0.48613	F	
	0.48800		
0	0.54607	e	
	0.58756	d	
	0.58930	D	

Длины волн в мкм	
0	0.546070
1	0.480000
2	0.643800
3	0.0
4	0.0

ENTER – Выбор, ESC – Выход

Рис.П2.8. Стандартные длины волн.

Конструктивные параметры

В этом пункте задаются основные конструктивные параметры оптической системы (радиусы, осевые расстояния, световые высоты, оптические среды). Конструктивные параметры записываются в виде таблицы, в которой по строкам располагаются поверхности, а по столбцам – ее различные параметры.

Формирование оптической системы						
Пример оптической системы			D:\OPAL\primer		19:39 OPAL-PC	
N	Радиусы	Осевые расст.	Высоты	Марки	Кат	Показатели преломления
0				Россия		L0=0.5461 L1=0.4800
1	108.34000	3.00000		ВОЗДУХ		1.00000000 1.00000000
2	55.28000	9.00000		ТФ1		1.6521904 1.6623421
3	-364.42000			К8		1.5182959 1.5224062
4				ВОЗДУХ		1.00000000 1.00000000
5						
6						
7						

Рис.П2.9. Конструктивные параметры.

- **Радиусы** – радиус поверхности. Радиус плоской поверхности считается равным нулю. Этот столбец определяет число поверхностей в системе. Первое пустое поле считается признаком окончания описания поверхностей и если за ним есть заполненные поля, они будут игнорироваться.
- **Осевые расстояния** – расстояния между поверхностями. Если предыдущая поверхность является отражающей, величина осевого расстояния меняет знак на противоположный.
- **Высоты** – размеры зон пропускания на поверхностях. Заполнение этой колонки не является обязательным.
- **Марки стекол** – марка стекла из каталога стекол. Регистр, на котором вводится значение марки, безразличен. Если поле в этой колонке заполнено пробелами или в него занесена цифра «1» или «-1», среда воспринимается как воздух. Если поверхность отражающая, при нечетном по порядку хода луча отражении перед названием или номером марки материала появляется знак «-».

Формирование оптической системы						
Пример оптической системы			D:\OPAL\		12:31 OPAL-PC	
N	Радиусы	Осевые расст.	Высоты	Марки	Кат	Показатели преломления
0				Россия		L0=0.5461 L1= L
1	-800.00000	-75.00000		ВОЗДУХ		1.00000000
2	600.00000			-ВОЗДУХ		-1.00000000
3				ВОЗДУХ		1.00000000

Рис.6.13. Показатели преломления для отражающей поверхности.

- **показатели преломления** – если задана марка стекла, то показатели преломления для всех длин волн вычисляются автоматически, если марка стекла не задана, то показатели преломления могут быть заданы самостоятельно для всех длин волн, заданных в таблице присоединительных характеристик.

При переходе из таблицы описания конструктивных параметров в меню автоматически пересчитываются показатели преломления для всех сред, марки которых изменялись после входа в эту таблицу. Если изменен один или несколько показателей среды, то она считается описанной показателями преломления. При этом марка стекла игнорируется, но не убирается автоматически.

- **Каталог** – в столбце «Кат» для среды может быть задан каталог оптических материалов. Пустое поле в этой колонке указывает на то, что оптический материал принадлежит каталогу по умолчанию.

Вспомогательные сочетания клавиш для работы с таблицей:

«Alt»+«F7» – копирует содержимое текущего поля в буфер;

«Alt»+«C» – помещает содержимое буфера в текущее поле;

«Alt»+«K» – удаляет содержимое поля и “подтягивает” все ниже расположенные поля текущей колонки;

«Alt»+«I» – вставляет перед текущим полем пустое поле, сдвигая все расположенные ниже поля на одну строку вниз.

Параметры внеосевых пучков

В этом пункте можно задать координаты на предмете и виньетирование внеосевых пучков. Координаты точки, из которой исходит внеосевой пучок можно задать абсолютные или относительные. Обычно задают внеосевые пучки с относительными координатами $\sigma = 1.0$ и $\sigma = 0.707$.

ТОЧКИ НА ПРЕДМЕТЕ		ВИНЬЕТИРОВАНИЕ		ОТРЕЗКИ		РАССТОЯНИЕ
относ.	гр. инсек	верх	низ	передние	задние	до диафрагмы
1.0000	2.000000	0.200	0.100	0.0	0.0	3.0000
0.7070	1.245143	0.200	0.100	0.0	0.0	3.0000
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0000
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0000
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0000

Рис.П2.10. Параметры внеосевых пучков.

Кроме того, в этой таблице для каждого из внеосевых пучков могут быть заданы:

- относительное виньетирование пучка на апертурной диафрагме;
- значения переднего и заднего отрезков (смещение от заданного значения в таблице «Предмет, изображение, диафрагма»);
- расстояние до диафрагмы (смещение от заданного).

Параксиальные характеристики

Вычисление параксиальных характеристик системы. Кроме кардинальных отрезков оптической системы (F, F', sF, sF', sH, sH') в этом пункте вычисляются длина оптической системы (L), передний и задний отрезки (s, s'), положение плоскости Гаусса ($s'G$), обобщенное увеличение (V) и положение зрачков (sP, sP').

Длина оптической системы для изображения ближнего типа включает в себя рабочий задний отрезок s' . Кардинальные отрезки и длина определяются для основной длины волны, для остальные величины определяются также для дополнительных длин волн.

Файл Система Поверхность Блок Перестройка Настроить Выполнить		PAL\PRIMER		19:24 OPAL-PC		
Приме	N Pa	Предмет, изображение, диафрагма	Марки	Кат	Показатели преломления	
0		Конструктивные параметры	Л0=0.5461		L1=0.4800	
1	10	параметры Внеосевых пучков	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	
2	55	Спектральные характеристики	ТФ1	1.6521904	1.6623421	
3	-3	параметры Экранирования	К8	1.5182959	1.5224062	
		Параксиальные характеристики	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	
Параксиальные характеристики						
	F	F'	sF	sF'	sH	sH'
	-199.9857	199.9857	-198.6554	193.5034	1.3303	-6.4823
						L
						205.50
	s	s'	s'G	U	sP	sP'
	(дптр)	(мм)	(мм)		(мм)	(дптр)
0	.000000	193.50341	193.50341	-199.98572	1.83584	-5.01300
1	.000000	193.50341	193.63366	-.000002	1.82482	-5.01340
2	.000000	193.50341	193.59727	.000003	1.84598	-5.01261

Рис.П2.11. Параксиальные характеристики.

Чтобы вычислить параксиальные характеристики части оптической системы ее надо выделить при помощи клавиши «F7» (для отмены отметки повторно нажать «F7»). Выделенная часть оптической системы должна быть непрерывной.

Остальные пункты меню

Остальные пункты меню в рамках дисциплины «Основы оптики» обычно не используются:

- «Спектральные характеристики» – описание спектрального интервала, относительные спектральные эффективности для отдельных длин волн (с возможностью задания дополнительных длин волн);
- «Параметры экранирования» – определение экранирующей поверхности и величины относительного экранирования;
- «Габариты поверхностей» – описание областей пропускания на отдельных поверхностях для систем, не имеющих осевой симметрии;
- «Подгонки характеристик» – подгонка параксиальной характеристики под заданное значение путем изменения одного из конструктивных параметров системы;
- «Параметры расчета нарциссов» – задание параметров предмета, оптической системы и приемника, необходимых для расчета нарцисс-эффекта.

П2.2.3. Меню «Поверхность»

«Поверхность» – объединяет действия, предназначенные для описания формы несферических поверхностей и взаимного расположения поверхностей, не находящихся на общей оси. В рамках дисциплины «Основы оптики» эти пункты не используются.

П2.2.4. Меню «Блок»

«Блок» – объединяет действия, связанные с описанием частей оптической системы, положение которых может изменяться в процессе формирования или расчета характеристик оптической системы. В рамках дисциплины «Основы оптики» эти пункты не используются.

П2.2.5. Меню «Перестройка»

«Перестройка» – предназначено для преобразований всей оптической системы или ее части. Доступно только тогда, когда на экране отображена таблица конструктивных параметров.

- «Обернуть» – оборачивание всей оптической системы или ее отмеченной части;
- «Масштабировать» – масштабирование оптической системы или ее отмеченной части;
- «Радиусы по станд. ряду» – приведение рассчитанных радиусов оптической системы к стандартному ряду;
- «Вставить поверхность» – вставка поверхности;
- «Копировать отмеченное» – копирование отмеченных поверхностей в выбранное место;
- «Переместить отмеченное» – перемещение отмеченных поверхностей в выбранное место;
- «Удалить отмеченное» – удаление отмеченных поверхностей.

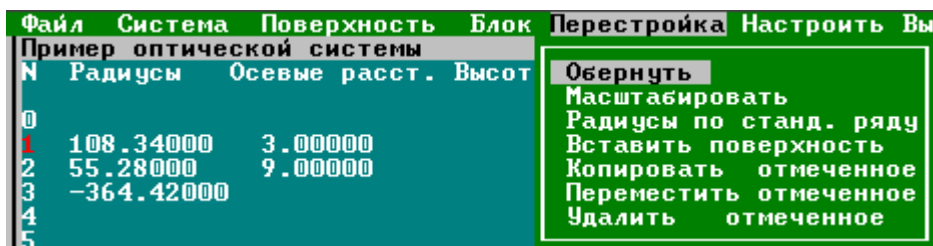


Рис.П2.12. Меню «Перестройка».

Для работы с частью оптической системы ее надо выделить при помощи клавиши «F7» (для отмены отметки повторно нажать «F7»). Выделенная часть оптической системы должна быть непрерывной.

При вставке и перемещении поверхностей они вставляются перед поверхностью, на которой в данный момент находится курсор. Если в системе нет отмеченных поверхностей, то появляется запрос на выполнение действия (оборачивания, масштабирования, пересчета радиусов) над всей системой. При оборачивании и масштабировании оптической системы соответственно меняются параметры предмета, изображения и диафрагмы.

П2.2.6. Меню «Настроить»

Этот пункт меню объединяет действия, перехода от одного способа отображения данных к другому. В рамках дисциплины «Основы оптики» эти пункты не используются.

П2.2.7. Меню «Выполнить»

«Выполнить» – объединяет команды, предназначенные для вызова служебных программ проектирования оптических систем:

- «Анализ аберраций» – переход к пункту «Анализ габаритов и аберраций»;

- «Анализ изображения» – переход к пункту «Анализ волнового фронта»;
- «Оптимизация» – переход к пункту «Оптимизация»;
- «Технология» – переход к пункту «Технология»;
- «Каталог стекла» – переход к работе с каталогами оптических материалов;
- «Калькулятор» – вызов встроенного калькулятора;
- «Выход» – завершение сеанса работы с OPAL-ом.

П2.3. Общие принципы функционирования блоков анализа

Для вызова блока анализа оптических систем необходимо в меню работ выбрать пункт «Анализ», и в открывшемся подменю выбрать требуемую работу анализа.

Во всех блоках анализа экран делится на несколько областей (окон), которые имеют фиксированный размер и расположение. Каждое окно имеет заголовок, расположенный в его верхней строке, активное окно выделяется цветом заголовка.

Значения функциональных клавиш

В нижней строке экрана (строке подсказки) отображаются функции основных горячих клавиш:

- **F1 Help** – вызывает встроенную систему помощи;
- **F2 Menu** – вызывает переход в меню выполняемого блока;
- **F3 Com** – вызывает переход в режим командной строки;
- **F4 Prtkol** – отображает оглавление файла протокола;
- **F5 Full** – разворачивает окно отображения на полный экран;
- **F6 Text/Graph** – переключает режим отображения из текстового в графический и обратно (**неактивный** в данный момент режим отображается в строке подсказки);
- **F7 Print** – выводит копию результата из активного окна или файла протокола на внешний носитель;
- **F8 Load** – загружает текстовый файл для отображения в текущем окне;
- **F9 Save** – запоминает в архиве оптических систем результат, отображенный в активном окне, в форме, доступной для просмотра;
- **F10 Quit** – выполняет выход в основное меню OPALa.

Окна ввода/вывода

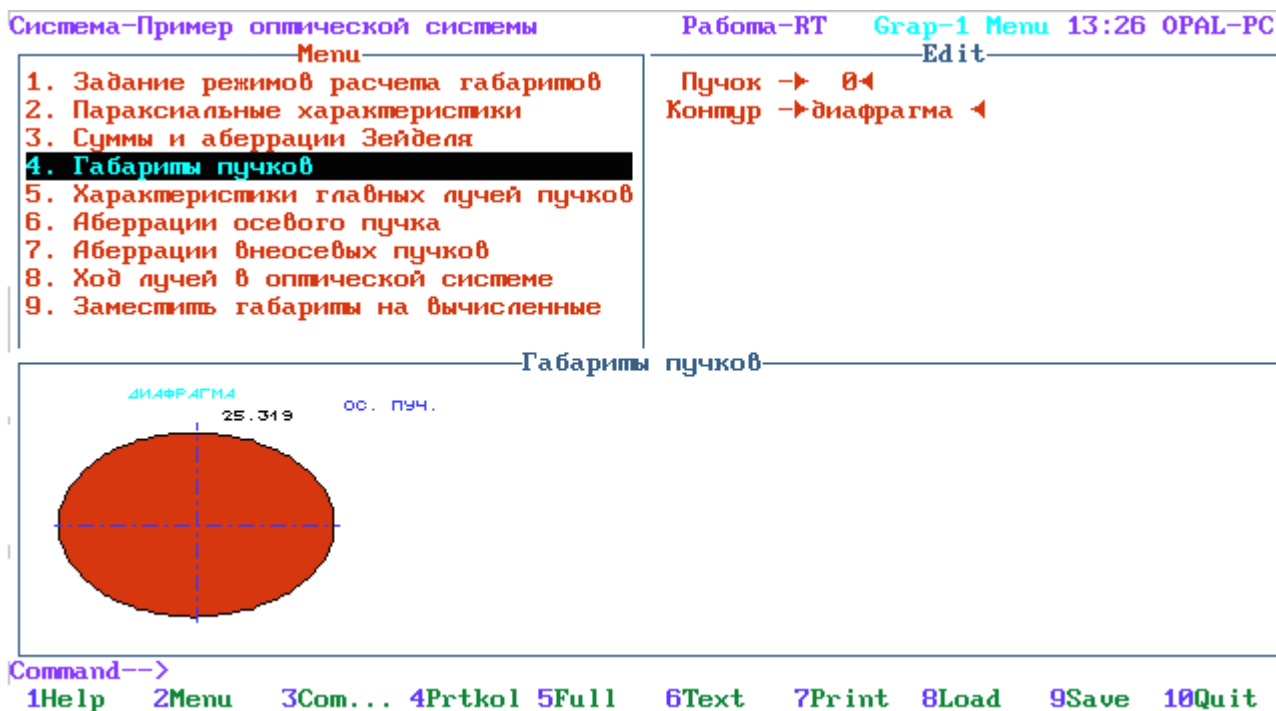


Рис.П2.13. Анализ в графическом режиме.

Окно «Menu» содержит меню работ анализа, для выбора пункта меню могут быть использованы либо клавиши управления курсором, либо цифровые клавиши с номером соответствующего пункта. После выполнения пункта меню курсор либо возвращается в окно меню, либо остается в активном окне вывода. В последнем случае для возврата в меню надо нажать «Esc» или «F2». Окно «Edit» содержит настройки выбранного пункта меню. Переключение между окном меню и окном редактирования происходит по клавишам «Tab» либо «Esc». При нажатии «Esc» сделанные в окне редактирования изменения отменяются.

Вывод результатов анализа может производиться в нижнее окно или на полный экран. Подсказка по пользованию оконной системой вызывается комбинацией клавиш «Alt»+«F1».

Выходные данные могут быть представлены в текстовой или графической форме. Переключение между этими режимами выполняется клавишей «F6». Для некоторых пунктов меню может существовать только один из режимов вывода. Если выводимые данные содержат больше строк или колонок, чем умещается в окне вывода, можно просматривать текст с помощью клавиш управления курсором.

Текстовый и графический режимы отображения

В графическом режиме в ряде случаев возможно изменение некоторых параметров отображения прямо в окне вывода. Набор доступных в интерактивном режиме действий зависит от выполняемой задачи. Как правило, полный набор функций, свойственных конкретной задаче, обеспечивается только в полноэкранном режиме.

Для большинства графических объектов актуальны два правила:

- при изменении размеров или положения какого-либо объекта удержание в нажатом состоянии клавиши «**Shift**» уменьшает шаг изменений до 1 пиксела;
- нажатие клавиш «**Gray+**» и «**Gray-**», расположенных в правой части клавиатуры, вызывает пропорциональное расширение или сужение выделенных областей.

Для графика одномерной функции:

- «**Space**» – нарисовать координатную сетку;
- «**Alt**»+«**Space**» – отобразить реперное перекрестие с отображением его текущих координат. Перемещение репера происходит с помощью клавиш управления курсором. При повторном нажатии «**Alt**»+«**Space**» репер исчезает.

В случае отображения некоторого сечения (точечной диаграммы, карты уровней):

- «**Space**» – появление на изображении прямоугольной рамки. При помощи клавиш управления курсором можно либо менять размеры рамки, либо перемещать ее (переключение между режимами по клавише «**Ins**»);
- «**Enter**» – увеличение выделенной области, «**F6**» – возврат к первоначальному виду картинка.

При использовании трехмерной графики в полноэкранном режиме в правом нижнем углу экрана выводится в дополнительном окне меньшего размера “скелет” графика, все действия предварительно выполняются над этим “скелетом” и только по нажатию «**Enter**» изменения переносятся на основное изображение. В случае если график отображается не в полноэкранном режиме, при попытке действий над ним он автоматически перерисовывается в “скелетном” виде и возвращается к основной форме отображения только после нажатия на «**Enter**». Подробная инструкция возможностей изменения параметров трехмерного отображения выводится при нажатии клавиши «**F1**».

Вывод результатов на принтер и в файл

Вывод результатов на принтер производится при нажатии клавиши «**F7**». Предполагается, что текст печатается на листах формата А4. При печати текста на принтер выводится все содержимое окна вывода, включая ту его часть, которая в данный момент не видна. Если принтер отключен, программа предлагает пользователю сохранить результаты в файле. Файл, содержащий графическую информацию, запоминается в бинарном виде.

Для сохранения результата из активного окна вывода используется клавиша «**F9**». Текстовые результаты сохраняются в файлах с расширением «*.prn». В появившемся окне необходимо указать директорию и имя файла. Для добавления в этот же файл новых данных пункт «new» нужно заменить на «add».

```
Directory - d:\opal\
File name - lab_6_p .prn new
Information- Частотно-контрастная характеристика
```

Рис.6.14. Вывод в файл.

Все текстовые результаты, получаемые по мере выполнения различных пунктов меню блоков анализа, накапливаются в файле протокола «**protocol.prn**». Файл протокола автоматически очищается при входе в блок «**Формирование**». Находясь в любом из блоков анализа, можно просмотреть содержимое файла протокола при помощи клавиши «**F4**». В тот момент, когда на экране отображается оглавление протокола, его можно сохранить на диске, воспользовавшись клавишей «**F9**», либо напечатать, используя клавишу «**F7**».

П2.4. Анализ габаритов и аберраций

П2.4.1. Задание режимов расчета габаритов

В этом пункте можно установить режимы определения габаритов пучков оптической системы:

- «**Габариты пучков <реальные / заданные>**». **<Заданные>** – габариты пучков определяются заданными апертурой, виньетированием и световыми высотами на поверхностях. Если при этом происходит нарушение условий прохождения лучей, то реальные габариты не вычисляются и дальнейший анализ оптической системы становится невозможным. **<Реальные>** – производится определение реальных габаритов пучков с учетом всех условий прохождения.
- «**Учет условия острого края <ДА / НЕТ>**» – учитывать ли условие острого края при определении реальных габаритов.
- «**Учет световой высоты на поверхностях <ДА / НЕТ>**» – учитывать ли заданные световые высоты на поверхностях при определении реальных габаритов.
- «**Экранирование пучков <Отсутствует / Реальное / Заданное>**» – учитывать ли экранирование пучков.

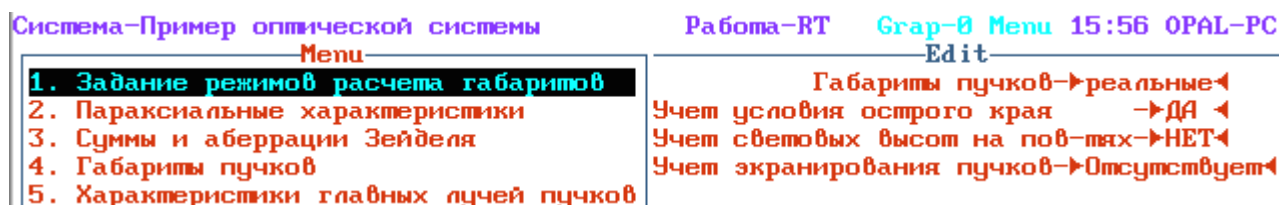


Рис.П2.14. Задание режимов расчета габаритов.

П2.4.2. Параксиальные характеристики

Параксиальные характеристики аналогичны этому же пункту в работе «**Формирование**», за исключением длины оптической системы, которая в данном пункте не вычисляется.

Параксиальные характеристики			характеристики		
F	F'	SF	SF'	SH	SH'
-199.98572	199.98572	-198.65537	193.50341	1.33035	-6.48231
S (дптр)	S' (мм)	S'G (мм)	ν	SP (мм)	SP' (дптр)
0	193.50341	193.50341	-199.98572	1.83584	-5.01300
1	193.50341	193.63366	-.00002	1.82482	-5.01340
2	193.50341	193.59727	.00003	1.84598	-5.01261

Рис.П2.15. Параксиальные характеристики в блоке анализа.

П2.4.3. Суммы и аберрации Зейделя

При выполнении третьего пункта меню рассчитываются и выводятся в виде таблицы монохроматические суммы Зейделя. При помощи сумм Зейделя вычисляется аберрации третьего порядка. В рамках дисциплины «Основы оптики» этот пункт не используется.

П2.4.4. Габариты пучков

Определение габаритов пучков производится всегда перед вычислением аберраций. При расчете габаритов во всплывающее окно выводятся сообщения об ошибках при определении габаритов, и предупреждающие сообщения.

Текстовый режим

В этом пункте вычисляются передние (A_x, A_y) и задние (A_x', A_y') обобщенные апертуры в сечениях по X и Y, обобщенные положения зрачков (S_p, S_p'), коэффициенты верхнего и нижнего виньетирования и светораспределение. Все характеристики вычисляются для каждого пучка каждой длины волны.

N	Апертуры				Положение зрачков (мм)		Виньетир.		Светораспред	
	передние	задние	верх	низ	вход	выход	вход	выход		
	A_x	A_y	A_x'	A_y'	S_p	S_p'				
Габариты пучков										
	Длина волны - .5461									
1	25.32	25.22	-.12526	-.12435	1.832	-5.013	.000	.000	99.6	98.5
2	25.32	25.27	-.12549	-.12504	1.834	-5.013	.000	.000	99.8	99.3
0	25.32	25.32	-.12573	-.12573	1.836	-5.013	.000	.000	100.0	100.0
	Длина волны - .4800									
1	25.32	25.22	-.12524	-.12433	1.821	-5.014	.000	.000	99.6	98.5
2	25.32	25.27	-.12547	-.12501	1.823	-5.014	.000	.000	99.8	99.2
0	25.32	25.32	-.12570	-.12570	1.825	-5.013	.000	.000	100.0	100.0
	Длина волны - .6438									
1	25.32	25.22	-.12528	-.12437	1.842	-5.013	.000	.000	99.6	98.6
2	25.32	25.27	-.12551	-.12506	1.844	-5.013	.000	.000	99.8	99.3
0	25.32	25.32	-.12575	-.12575	1.846	-5.013	.000	.000	100.0	100.0

Рис.П2.16. Габариты пучков (текстовый режим).

Светораспределение показывает отношение площадей входного (выходного) зрачков в обобщенных зрачковых координатах к площади зрачка для осевого пучка основной длины волны. Светораспределение на выходе для изображения ближнего типа определяет функцию освещенности изображения, а

для изображения дальнего типа силу света в зависимости от величины относительной предметной координаты.

В настройках этого пункта можно изменить единицы измерения положения зрачков для предмета (изображения) близкого типа (дптр/мм).

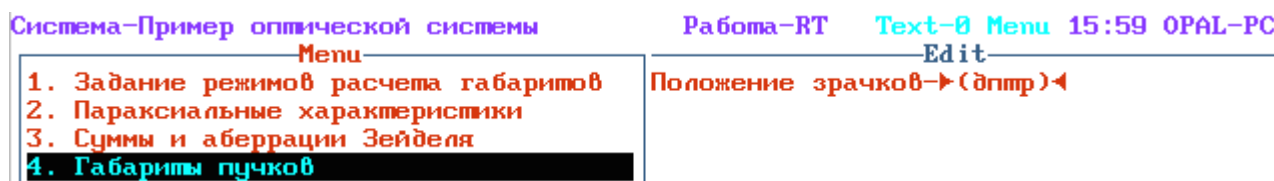


Рис.П2.17. Настройка единиц измерения положения зрачков.

Графический режим

В графической форме рисуется контур входного и выходного зрачка и область прохождения лучей на диафрагме для всех пучков. Для сравнения рисуется круг, соответствующий полной апертуре осевого пучка. Номер пучка и вид контура можно изменять в настройках этого пункта.

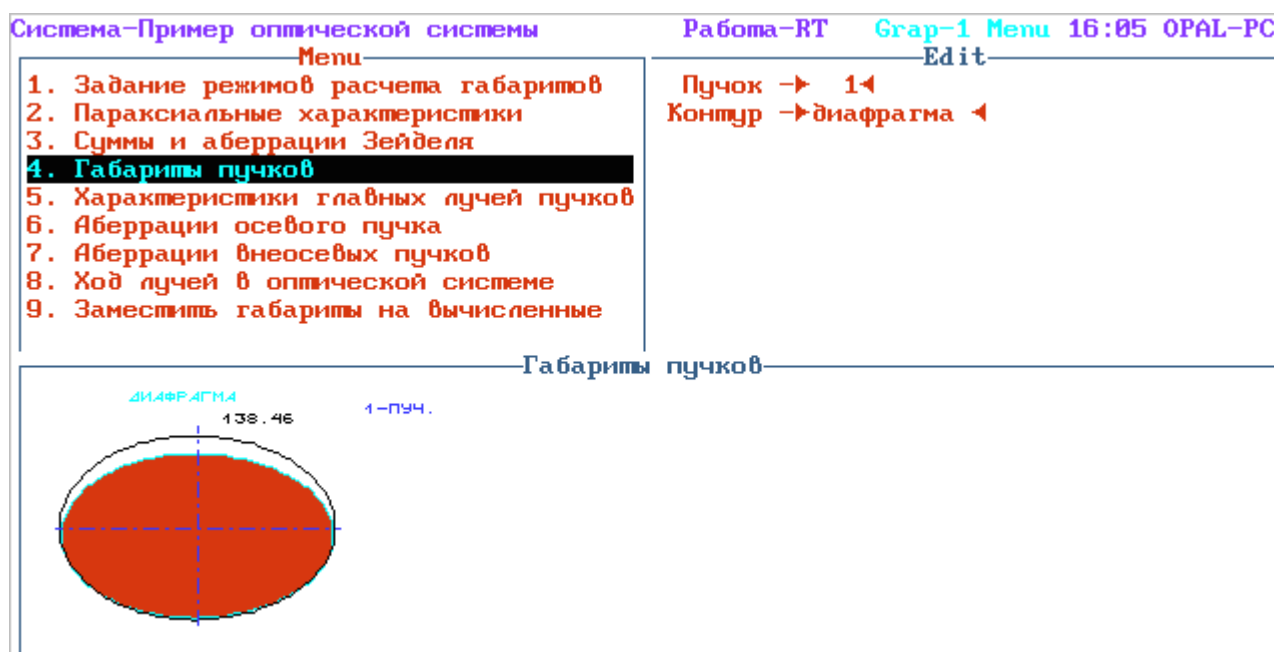


Рис.П2.18. Габариты пучков (графический режим).

П2.4.5. Характеристики главных лучей пучков

Выводятся координаты точек поля и аберрации главных лучей пучков (дисторсия, астигматизм и хроматизм увеличения).

Текстовый режим

В табличной форме при установленном поле «Хроматизм <Аберрация>» для всех пучков выводятся: величина предмета и изображения относительная и реальная, дисторсия абсолютная и относительная, и астигматические отрезки ($Z'm$ и $Z's$).

Система-Пример оптической системы		Работа-RT		Text-0 View 17:00		OPAL-PC		
Характеристики главных лучей пучков								
N	Величина предмета		Величина изображ.		Д и с т о р с и я		Астигмат.отрезки	
	относ.	(гр.мнсек)	относ.	(мм)	%	(мм)	Z'm	Z's
1	1.000	5.000000	1.000	-17.495820	-.0038	.000664	-2.6894	-1.2657
2	.707	3.322217	.707	-12.369780	-.0019	.000235	-1.3517	-.6350
0	.000	.000000	.000	.000000	.0000	.000000	.0000	.0000

Рис.П2.19. Характеристики главных лучей пучков.

В табличной форме при установленном поле «Хроматизм <Разностный>» для всех пучков выводятся: хроматизм увеличения абсолютный (Dy') и относительный ($Del\%$) и хроматизм положения меридиональный ($Z'm$) и сагиттальный ($Z's$).

Система-Пример оптической системы		Работа-RT		Text-0 View 17:03		OPAL-PC		
Хроматизм главных лучей пучков								
N	Хроматизм увеличения				Хроматизм положения			
	Относительный		Абсолютный		Меридиональный		Сагиттальный	
	Del %		Dy'		$Z'm$		$Z's$	
	1-0	2-0	1-0	2-0	1-0	2-0	1-0	2-0
1	-.0020	.0026	.0004	-.0004	.12763	.09311	.1285	.0939
2	-.0020	.0026	.0003	-.0003	.12894	.09348	.1294	.0939
0	-.0020	.0026	.0000	.0000	.13026	.09386	.1303	.0939

Рис.П2.20. Хроматизм главных лучей пучков.

В табличной форме при установленном поле «Хроматизм <Спектр>» для всех пучков выводятся: вторичный хроматизм увеличения абсолютный (Dy') и относительный ($Del\%$) и вторичный хроматизм положения меридиональный ($Z'm$) и сагиттальный ($Z's$).

Система-Пример оптической системы		Работа-RT		Text-0 View 17:04		OPAL-PC		
Спектр-хроматизм главных лучей								
N	Хроматизм увеличения				Хроматизм положения			
	Относительный		Абсолютный		Меридиональный		Сагиттальный	
	Del %		Dy'		$Z'm$		$Z's$	
	1-2	(1+2)/2-0	1-2	(1+2)/2-0	1-2	(1+2)/2-0	1-2	(1+2)/2-0
1	-.0046	.0003	.0008	.0000	.03452	.11037	.0346	.1112
2	-.0046	.0003	.0006	.0000	.03545	.11121	.0355	.1116
0	-.0046	.0003	.0000	.0000	.03640	.11206	.0364	.1121

Рис.П2.21. Спектр-хроматизм главных лучей пучков

Графический режим

В графическом режиме по умолчанию на полный экран выводится семейство основных графиков: дисторсия, астигматизм, кривизна, хроматизм увеличения и положения, светораспределение.

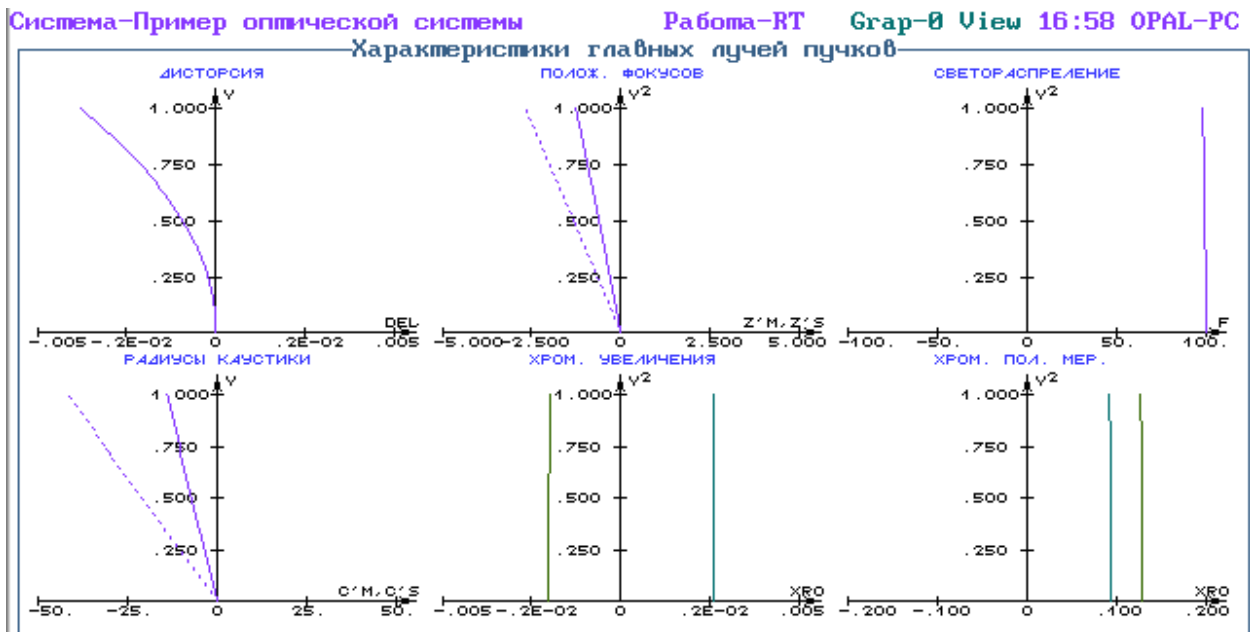


Рис.П2.22. Характеристики главных лучей пучков (графический режим).

Любой из этих графиков, а также дополнительные графики, можно вывести отдельно, используя установку «Вид графика».

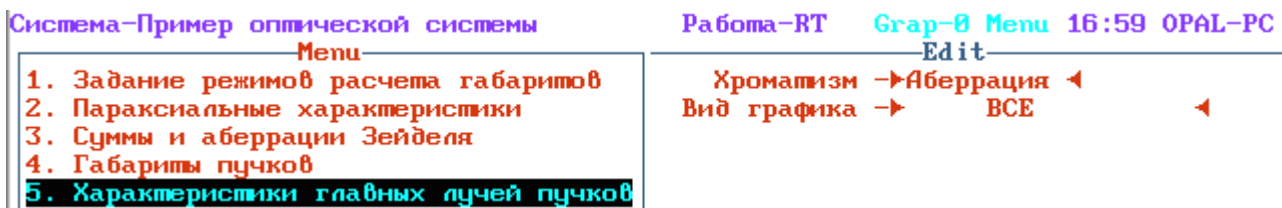


Рис.П2.23. Параметры вывода характеристики главных лучей пучков.

П2.4.6. Аберрации осевого пучка

Для заданных лучей и всех рабочих длин волн определяются поперечные, продольные, волновые аберрации, а также величина относительного неизопланатизма в осевой зоне.

Текстовый режим

В табличной форме выводятся рассчитанные аберрации, а также входные и выходные координаты каждого луча. Входные координаты лучей распределяются равномерно по квадрату зрачковой координаты соответствующего сечения входного зрачка данного пучка.

Способ вывода хроматизма устанавливается в окне «Edit»: «Хроматизм <Аберрация>» – выводятся значения аберраций для текущих длин волн. «Хроматизм <Разностный>» – выводятся разности значений аберраций для текущей и основной длины волны. «Хроматизм <Спектр>» – выводятся первичный хроматизм (разность аберраций для крайних длин волн) и вторичный хроматизм (разность первичного хроматизма и аберрации для

основной длины волны). Кроме того, устанавливается количество лучей (не более 8) и вывод отдельно одного из типов aberrаций.



Рис.П2.24. Аберрации осевого пучка.

Графический режим

В графическом режиме по умолчанию на полный экран выводится семейство основных графиков: поперечные, продольные, волновые aberrации и неизопланатизм. Любой из этих графиков можно вывести отдельно, используя установку «Вид графика» окна «Edit».

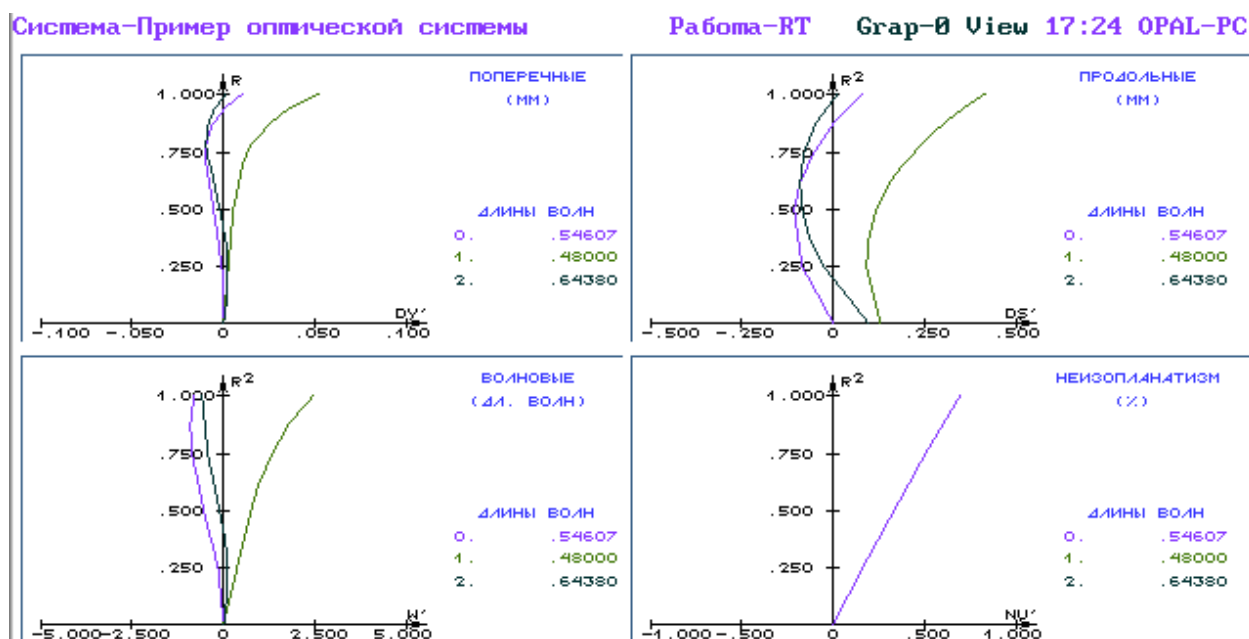


Рис.П2.25. Аберрации осевого пучка (графический режим).

П2.4.7. Аберрации внеосевых пучков

Для указанного количества лучей в заданном сечении пучка (меридиональном, сагиттальном, "косом") могут быть рассчитаны поперечные или волновые аберрации.

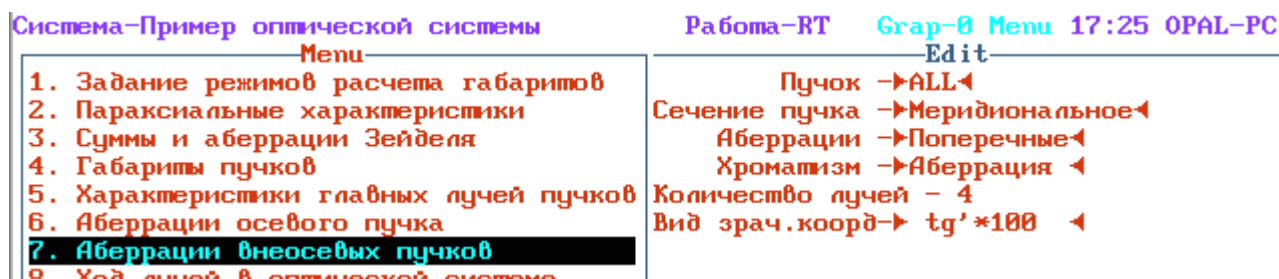


Рис.П2.26. Аберрации внеосевых пучков

Вид аберраций и сечение устанавливается в окне «Edit». Для "косого" сечения в этом окне задается азимутальный угол сечения с меридиональной плоскостью. Могут рассчитываться аберрации сразу для всех внеосевых пучков (поле «Пучок <ALL>»), или для любого заданного пучка. Способ вывода хроматизма устанавливается аналогично пункту «П1.4.6. Аберрации осевого пучка».

Для поперечных аберраций немеридионального сечения пучка выводятся две составляющие аберрации: меридиональная (D_y) и сагиттальная (D_x).

Текстовый режим

В табличной форме выводится рассчитанные аберрации, а также выходные координаты для каждого луча.

Вых. координаты		Аберрации внеосевых пучков		
Канон.	($tg' * 100$)	Поперечные	аберрации	θ (мм)
		θ	1	2
Меридиональное сечение		Пучок 1	$\gamma =$	5.0000
1.000	21.83	-.74224	-.71069	-.74123
.866	20.07	-.59888	-.57616	-.59438
.707	17.99	-.44285	-.42755	-.43668
.500	15.28	-.27014	-.26112	-.26444
.000	8.82	-.00140	-.00099	-.00179
-.500	2.43	.09017	.07696	.08832
-.707	-.19	.07230	.04734	.07503
-.866	-2.19	.02207	-.01634	.03202
-1.000	-3.86	-.05930	-.11324	-.03973
Меридиональное сечение		Пучок 2	$\gamma =$	3.3222
1.000	19.11	-.44545	-.41086	-.44746
.866	17.37	-.35944	-.33455	-.35711
.707	15.31	-.26258	-.24592	-.25779
.500	12.64	-.15514	-.14552	-.15009
.000	6.24	-.00049	-.00020	-.00077
-.500	-.12	.03003	.01748	.02767

Рис.П2.27. Аберрации внеосевых пучков (текстовый режим).

Графический режим

В графическом режиме по умолчанию на полный экран для всех пучков заданного сечения выводится график указанной аберрации.

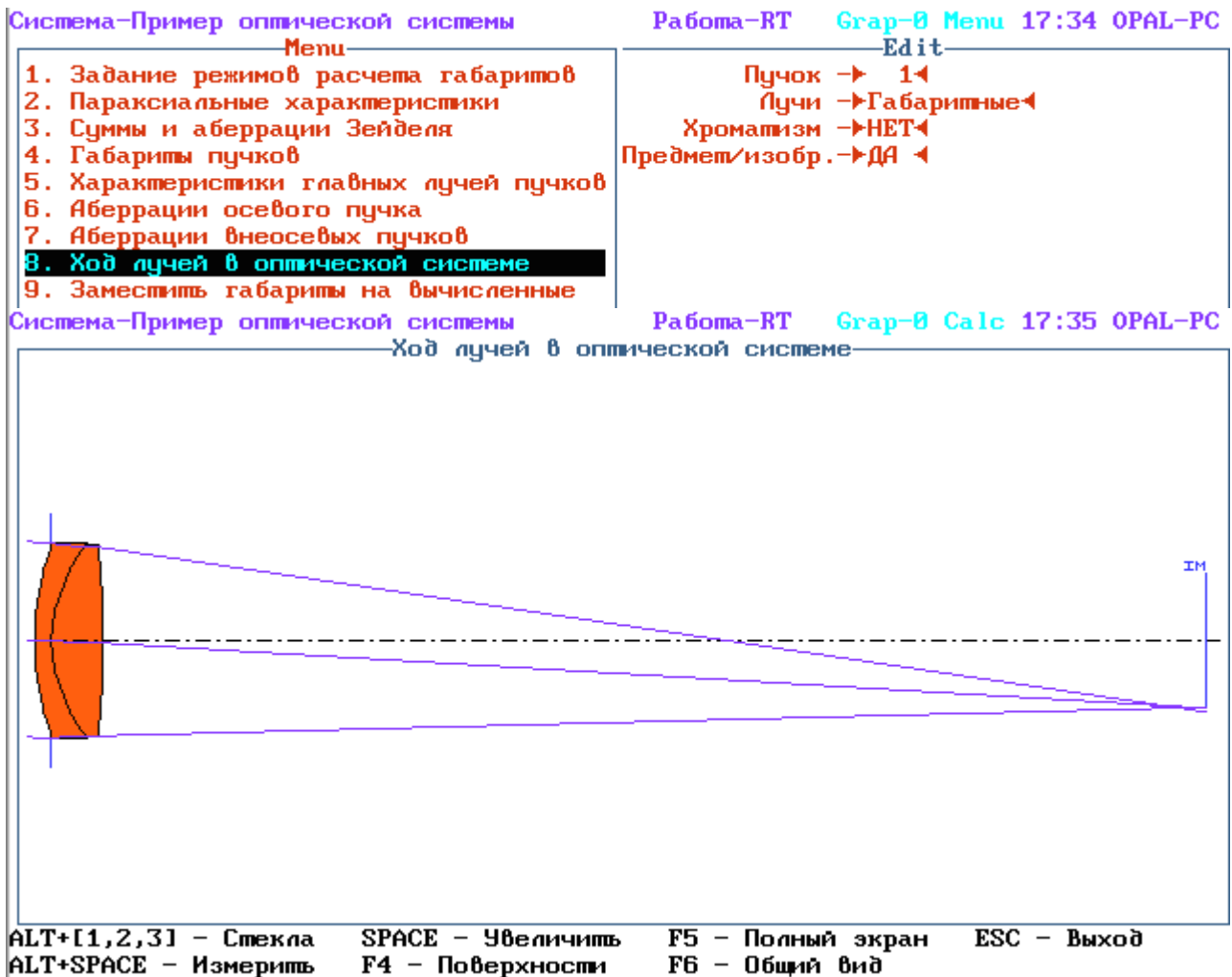


Рис.П2.30. Ход лучей в оптической системе (графический режим).

В процессе просмотра хода лучей можно выделить фрагмент рисунка (появление рамки – «Space», выделение – «Enter»), вызвать измеритель «Alt»+«Space». Подсказки по дополнительным возможностям просмотра находятся в нижней строке экрана.

П2.4.9. Заместить габариты на вычисленные

При выполнении этого пункта вычисленные реальные значения апертур, виньетирования и световых высот на поверхностях заменяют в заданные пользователем значения.

П2.5. Анализ волнового фронта

П2.5.1. Коэффициенты зонального разложения

При зональном полихроматическом разложении в каждой точке поля волновая aberrация аппроксимируется полиномами Цернике от канонических полярных координат на зрачке и ортогональными полиномами от канонической спектральной координаты.

Каждый зональный коэффициент имеет марку C_{xij} , где x – степень разложения по хроматизму, i – степень разложения по радиальной координате, j – степень разложения по угловой координате.

Номер пучка (точки поля) задается в окне «Edit».

Текстовый режим

В текстовом виде производится вывод значений коэффициентов зонального разложения функции волновой аберрации.

Система-Пример оптической системы Работа-WA Text-0 View 18:29 OPAL-PC

Коэффициенты зонального разложения

1 ПУЧОК Y = 5.0000

расфокусировка		с ф е р и ч е с к а я а б е р р а ц и я				
x	C x20	C x40	C x60	C x80	C x100	C x120
0	-14.6562	.1868	.1480	.0054	.0002	.0000
1	-.7586	-.2249	-.0068	-.0002	.0000	.0000
2	.6110	.0201	.0005	.0000	.0000	.0000
дисторсия		к о м а				
x	C x11	C x31	C x51	C x71	C x91	C x111
0	-18.0847	-9.2104	-.2359	-.0126	-.0005	.0000
1	.4339	.2786	.0112	.0004	.0000	.0000
2	-.0463	-.0266	-.0009	.0000	.0000	.0000
		а с т и г м а т и з м				
x	C x22	C x42	C x62	C x82	C x102	
0	-10.2907	.1056	.0064	.0003	.0000	
1	-.0074	-.0043	-.0002	.0000	.0000	
2	.0005	.0003	.0000	.0000	.0000	
		п р о ч и е а б е р р а ц и и				
x	C x33	C x53	C x73	C x93		
0	.0530	-.0012	-.0001	.0000		
1	.0001	.0000	.0000	.0000		

Рис.П2.31. Коэффициенты зонального разложения волновой аберрации.

Графический режим

В графическом режиме производится отображение гистограмм коэффициентов зонального разложения волновой аберрации («Вид отображения <Абсолютный>») или гистограммы вклада в волновой критерий аберраций различных порядков («Вид отображения <СКВ>»).

Справа в подокне для коэффициента, на который указывает стрелка, выводится гистограмма его разложения по хроматизму, переход в подокно и обратно производится клавишей «Tab». В информационном подокне выводится значение коэффициента и для справки значение полихроматического волнового критерия.

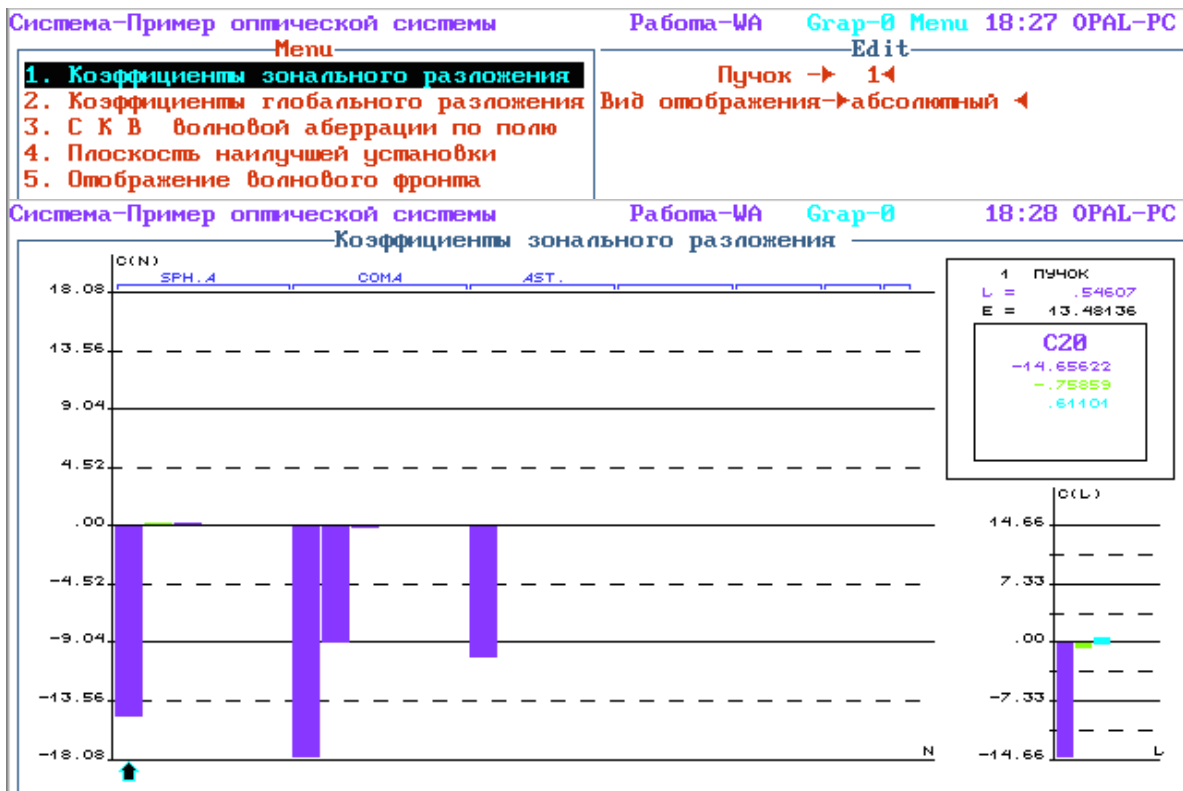


Рис.П2.32. Коэффициенты зонального разложения волновой aberrации (графический режим).

П2.5.2. Коэффициенты глобального разложения

При глобальном полихроматическом разложении волновая aberrация представляется разложением по ортогональным полиномам от относительной координаты на предмете, полиномам Цернике от канонических полярных координат на зрачке и ортогональным полиномам от спектральной координаты.

Система-Пример оптической системы Работа-WA Text-0 View 18:34 OPAL-PC

Коэффициенты глобального разложения

кривизна		с ф е р и ч е с к а я а б е р р а ц и я			
x	C x 020	C x 040	C x 060	C x 080	C x 0100
0	-4.3246	.0597	.0546	.0017	.0000
1	-.2522	-.0574	-.0015	.0000	.0000
2	.1576	.0040	.0001	.0000	.0000
x	C x 220	C x 240	C x 260	C x 280	C x 2100
0	-2.3946	.0138	.0008	.0000	.0000
1	-.0004	-.0004	.0000	.0000	.0000
x	C x 420	C x 440	C x 460	C x 480	
0	.0046	.0000	.0000	.0000	
x	C x 620	C x 640	C x 660		
0	.0000	.0000	.0000		
x	C x 820	C x 840			
0	.0000	.0000			
x	C x 1020				
0	.0000				
дисторсия		к о м а			
x	C x 111	C x 131	C x 151	C x 171	C x 191
0	-4.5392	-1.6438	-.0339	-.0015	-.0001
1	.0624	.0284	.0009	.0000	.0000

Рис.П2.33. Коэффициенты глобального разложения волновой aberrации.

Каждый глобальный коэффициент имеет марку $C \times k_{ij}$, где x – степень разложения по хроматизму, k – степень разложения по координате на предмете, i – степень разложения по радиальной зрачковой координате, j – степень разложения по угловой зрачковой координате.

Вывод полученных коэффициентов производится только в текстовом режиме.

П2.5.3. СКВ волновой aberrации по полю

В этом пункте выводится среднеквадратическое значение волновой aberrации, а также СКВ за вычетом вкладов некоторых aberrаций.

Система-Пример оптической системы Работа-WA Text-0 View 18:34 OPAL-PC

С К В волновой aberrации по полю

Значения среднеквадратической по спектральному интервалу, полю и зрачку волновой aberrации (-A) – без учета расфокусировки, (-B) – без учета кривизны (-C) – без учета дисторсии

W скв	(-C)	(-A-C)	(-A-B-C)		(-A)	(-A-B)
	5.4956	3.3912	2.4013	7.1279	5.6661	5.1353

Рис.П2.34. СКВ волновой aberrации по полю.

П2.5.4. Плоскость наилучшей установки

Вычисления параметров плоскости наилучшей установки производятся отдельно для каждого пучка, и в целом по всем пучкам. Для каждого пучка выводятся:

- положения номинальной плоскости и плоскостей наилучшей установки по волновому и геометрическому критерию (dS');
- значения волнового критерия (СКW);
- значения геометрических критериев (dX') и (dY');
- смещение энергетического центра пятна рассеяния в меридиональном направлении;
- положения границ глубины резкости.

В качестве волнового критерия используется $W_{СКВ}$, а в качестве геометрического критерия используется среднеквадратический размер поперечных aberrаций (СКR) (квадратный корень из суммы квадратов среднеквадратической сагиттальной (dX') и меридиональной (dY') поперечных aberrаций). Положение общей плоскости наилучшей установки определяется как среднее для всех пучков.

Система-Пример оптической системы Работа-WA Text-0 View 18:41 OPAL-PC

Плоскость наилучшей установки

1 пучок пл.установки	смещение dS'	средне-квадратичная (СК)			поперечное смещение	
		W	dY'	dX'	по СК W	по СК dY'
заданная	.0000	9.9991	.1920	.0954	-.0794	-.1210
волновой критерий	-2.0321	5.4573	.1012	.0703	.0986	
геометр. критерий	-1.9932	5.4596	.1022	.0687		.0525
граница глубины резкости	по волн.(.0000; .0000), по геометр.(.0000; .0000)					

Система-Пример оптической системы Работа-WA Graph-0 Menu 18:41 OPAL-PC

Menu Edit

1. Коэффициенты зонального разложения	Пучок → 1
2. Коэффициенты глобального разложения	Допуск на критерий для глубины резкости
3. СКВ волновой aberrации по полю	геометр. .0500 волновой .0750
4. Плоскость наилучшей установки	
5. Отображение волнового фронта	

Рис.П2.35. Плоскость наилучшей установки.

П2.5.5. Отображение волнового фронта

Отображение волнового фронта данного пучка может производиться в виде карты уровней либо в трехмерном виде. Способ отображения и номер пучка устанавливаются в окне «Edit».

Справа в столбик выводится значение волновой aberrации для участка изображения соответствующего цвета. Подробная инструкция по работе с трехмерным отображением волновой aberrации выводится по клавише «F1».

Система-Пример оптической системы Работа-WA Graph-0 Menu 18:43 OPAL-PC

Menu Edit

1. Коэффициенты зонального разложения	Пучок → 1
2. Коэффициенты глобального разложения	Вид отображения → Трехмерное
3. СКВ волновой aberrации по полю	
4. Плоскость наилучшей установки	
5. Отображение волнового фронта	

Система-Пример оптической системы Работа-WA Graph-0 Calc 18:44 OPAL-PC

Отображение волнового фронта

The figure displays a 3D surface plot of the wavefront. The surface is colored according to a scale on the right, ranging from 15.0 (black) to -51.2 (green). The plot shows a complex, non-spherical surface with a central peak and a surrounding valley. A 2D cross-section plot is shown in the bottom right corner, illustrating the wavefront's profile along a specific axis.

Рис.П2.36. Отображение волнового фронта.

П2.6. Анализ геометрического изображения

Работа предназначена для анализа структуры изображения центрированных оптических систем в геометрическом приближении (без учета дифракции). Рекомендуется пользоваться при анализе изображения геометрически-ограниченных систем, в противном случае дифракционные эффекты, не учитываемые при анализе, могут привести к заметному отличию полученных результатов от истинной структуры изображения.

Вычисление всех характеристик в геометрическом приближении основано на определении поперечных аберраций для большого количества точек. Количество точек на зрачке, для которых рассчитываются поперечные аберрации, задается пользователем. Возможен расчет для 1152, 512, 288 точек на половине зрачка для каждой длины волны. Количество точек можно установить в поле «Количество точек на зрачке» окна «Edit».

При задании в оптической системе нескольких длин волн можно рассчитывать полихроматические характеристики с учетом функции спектральной эффективности (пункт «Л1.6.8. Спектральные характеристики») или монохроматические характеристики для центральной длины волны (поле «Характеристики <Полихроматические / Монохроматические>»).

Кроме того, для всех пунктов в окне «Edit» можно задавать номер пучка и смещение плоскости установки.

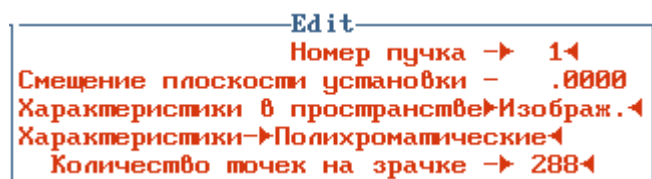


Рис.П2.37. Параметры анализа геометрического изображения.

П2.6.1. Точечная диаграмма

Точечная диаграмма может выводиться для одного пучка или для всех пучков.

При выводе точечной диаграммы для одного пучка выводится рамка: по клавише «Space» выделенная часть изображения отобразится на все окно, по клавише «Enter» производится расчет концентрации энергии в прямоугольнике с размерами рамки. Для справки справа выводятся значения размеров окна и размеров и положения рамки в плоскости изображения.

Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

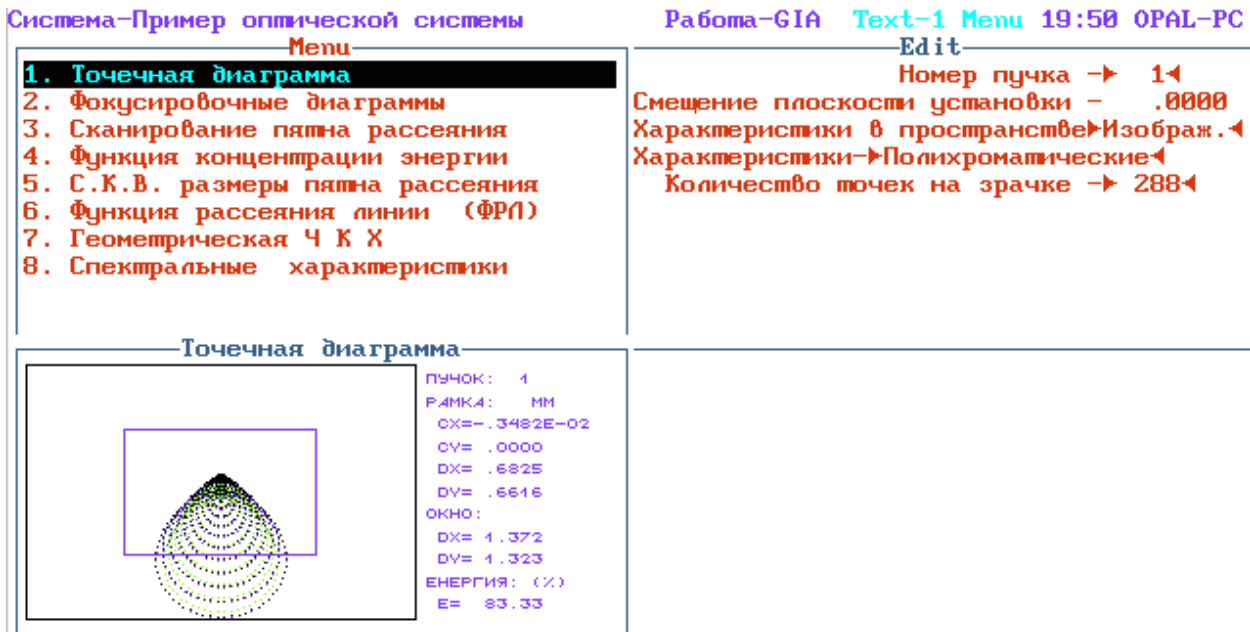


Рис.П2.38. Точечная диаграмма.

П2.6.2. Фокусировочные диаграммы

Фокусировочные диаграммы характеризуют изменение точечных диаграмм при сдвиге плоскости изображения. Для всех пучков выводятся точечные диаграммы для номинальной плоскости установки и для четырех сдвинутых на расстояния $\pm DS'$ и $\pm 2 \cdot DS'$ плоскостей.

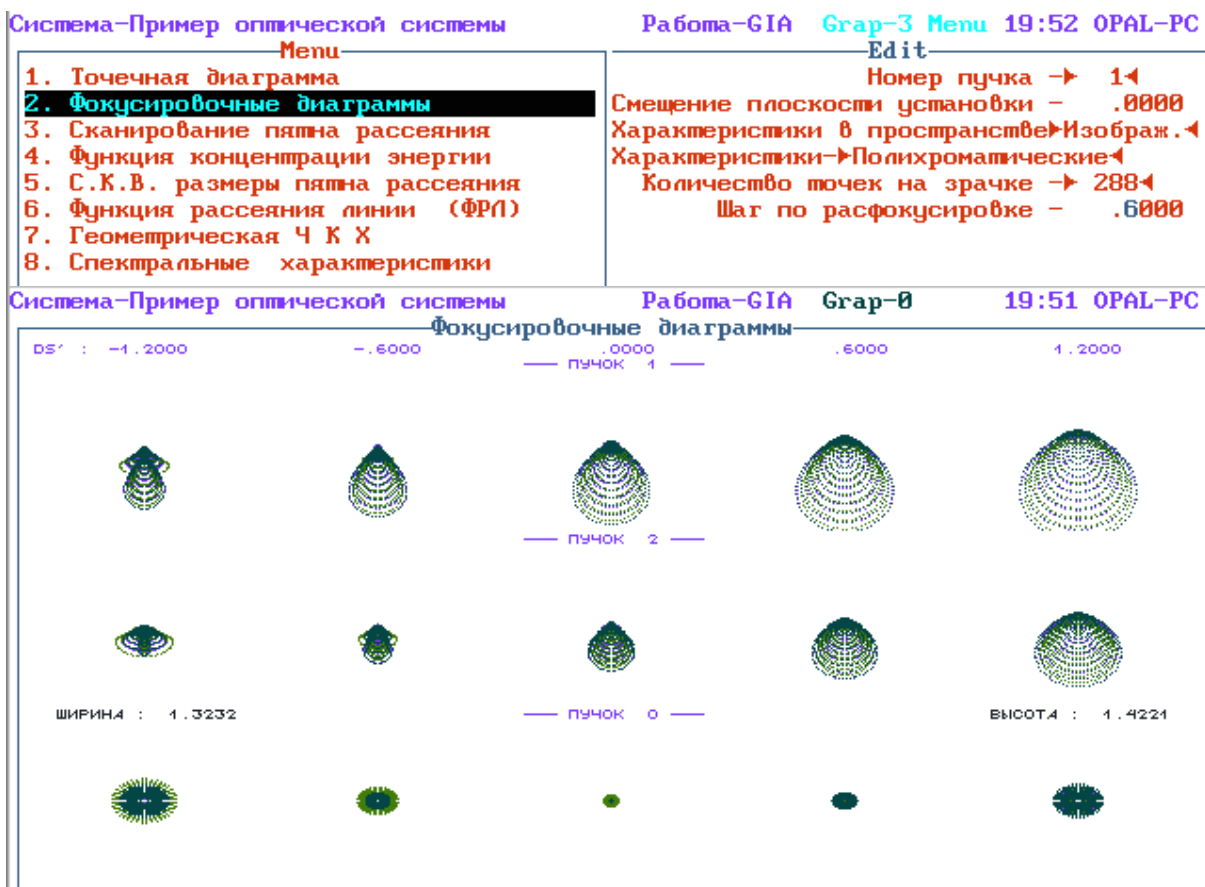


Рис.П2.39. Фокусировочные диаграммы.

Величина сдвига DS' задается в поле «Шаг по расфокусировке» окна «Edit». Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

П2.6.3. Сканирование пятна рассеяния

В этом пункте отображается топограмма пятна рассеяния. «Шаг сканирования» определяет минимальный размер элемента этой картины.



Рис.П2.40. Сканирование пятна рассеяния.

П2.6.4. Функция концентрации энергии

Функция концентрации энергии показывает зависимость энергии пятна рассеяния, содержащейся в круге диаметром D , от величины диаметра при условии, что полная энергия равна 100%.

Функция концентрации энергии выводится для 20 различных диаметров кружков до диаметра, в который попадает 100% энергии, либо до диаметра, указанного в поле «Максимальный диаметр кружка» окна «Edit». Смещение центра кружков можно задать в поле «Координата центра по Y». Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

Вывод результатов возможен в виде графика или таблицы.

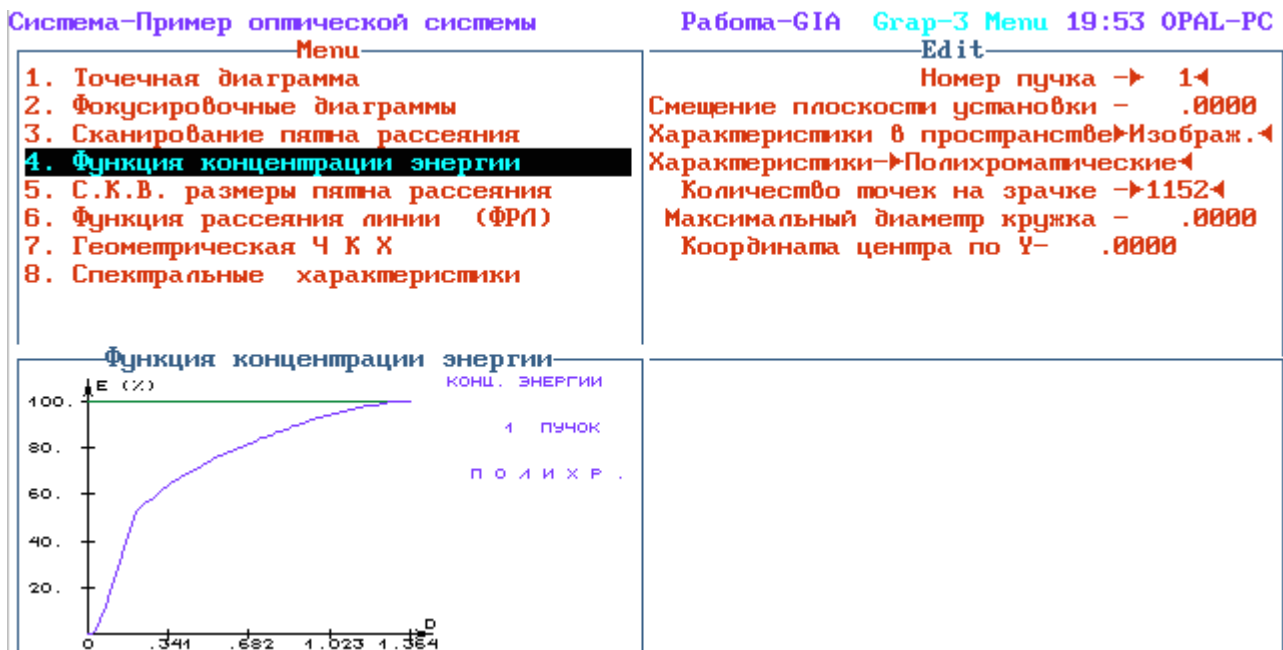


Рис.П2.41. Функция концентрации энергии.

П2.6.5. СКВ пятна рассеяния

В табличной форме выводятся среднеквадратические размеры пятна рассеяния ($X_{скв}$, $Y_{скв}$) и положение энергетического центра пятна ($Y_{цэ}$), по их значениям можно оценить размеры пятна в меридиональном и сагиттальном направлениях. Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

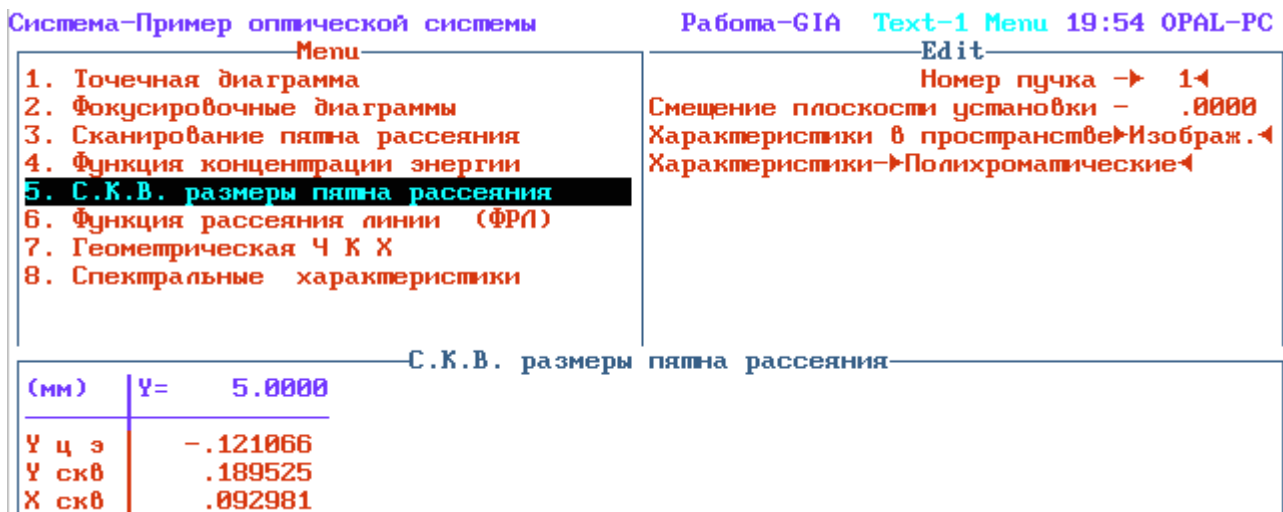


Рис.П2.42. СКВ пятна рассеяния.

П2.6.6. Функция рассеяния линии (ФРЛ)

Функция рассеяния линии представляет собой распределение интенсивности в изображении оптической системой бесконечно длинной линии в меридиональном или сагиттальном сечении. Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

Вывод возможен в графическом и текстовом режимах.

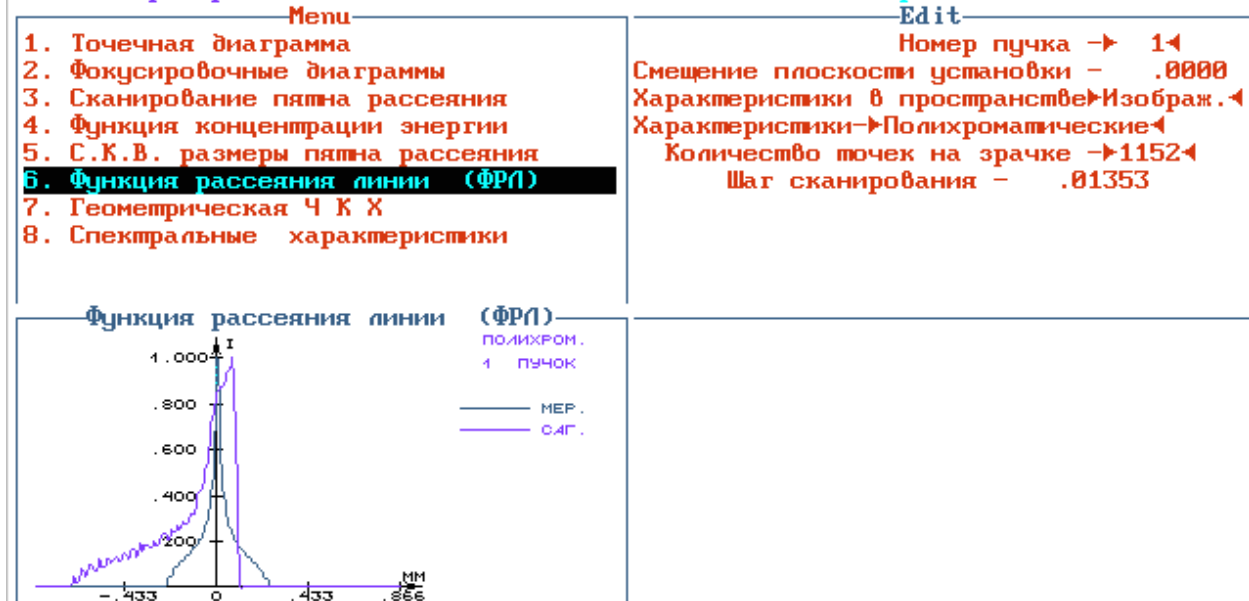


Рис.П2.43. Функция рассеяния линии.

П2.6.7. Геометрическая ЧКХ

Частотно-контрастная характеристика рассчитывается для 20 значений пространственных частот до частоты заданной пользователем (поле «Пространственная частота») или до максимально возможного значения. Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

Вывод результатов возможен в виде графика или таблицы. В графической форме для справки выводится безаберрационная ЧКХ, определяемая с учетом дифракции. Геометрической ЧКХ на данной частоте можно пользоваться, если безаберрационная ЧКХ отстоит от нее достаточно далеко.

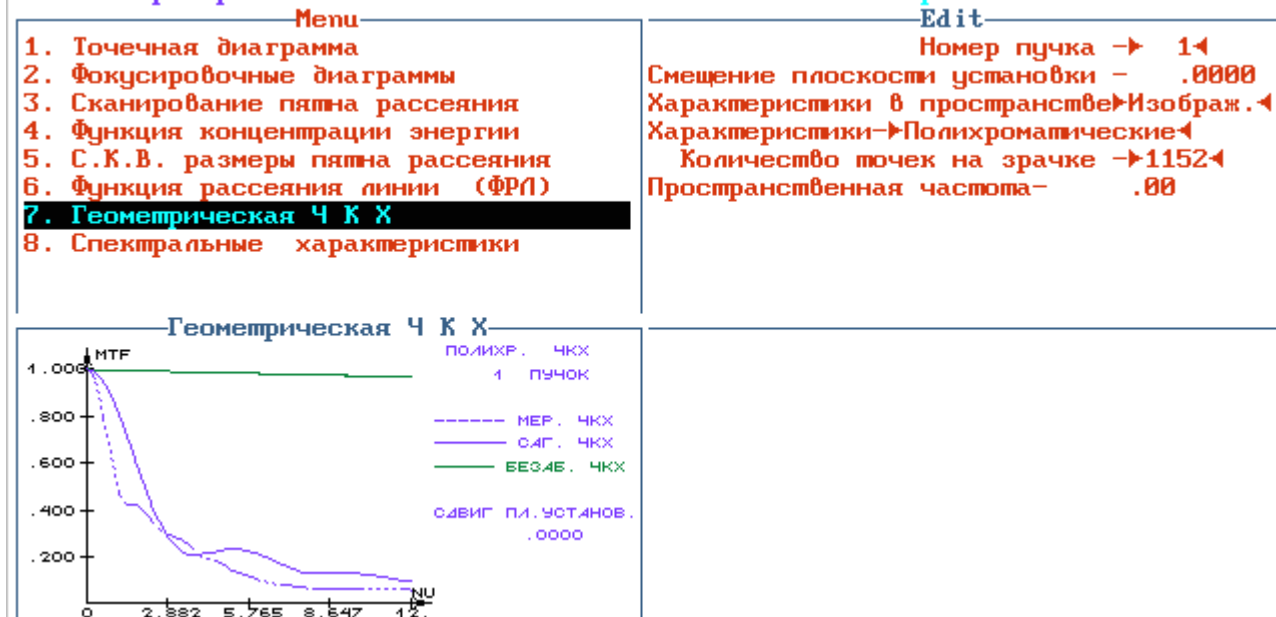


Рис.П2.44. Геометрическая ЧКХ (график).

Система-Пример оптической системы Работа-GIA Text-0 View 19:57 OPAL-PC

Геометрическая Ч К X

Простр.	γ= 5.0000	
частота	мер.	сиг.
лин/мм		
Полихроматические (линейный спектр для 3 длин волн)		
.00	1.00	1.00
.58	.79	.94
1.15	.47	.80
1.73	.42	.60
2.31	.35	.42
2.88	.30	.28
3.46	.27	.22
4.04	.21	.21
4.61	.18	.22
---	---	---

Рис.П2.45. Геометрическая ЧКX (таблица).

П2.6.8. Спектральные характеристики

В окне «Edit» можно задать способ вычисления полихроматических характеристик и значения спектральной эффективности. Функция спектральной эффективности показывает "вес" данной длины волны в вычисляемой полихроматической характеристике.

Если «Спектральный диапазон <непрерывный>», то спектральный диапазон определяются по максимальной и минимальной рабочей длине волны или задаются в работе «Формирование». Центральная длина волны в этом случае лежит в середине диапазона. Если «Спектральный диапазон <дискретный>», то полихроматические характеристики определяются как средневзвешенные с весом равным спектральной эффективности по заданным длинам волн.

В графическом режиме функция спектральной эффективности отображается в виде графика.

Система-Пример оптической системы Работа-GIA Grap-3 Menu 19:57 OPAL-PC

Menu Edit

<ol style="list-style-type: none"> 1. Точечная диаграмма 2. Фокусировочные диаграммы 3. Сканирование пятна рассеяния 4. Функция концентрации энергии 5. С.К.В. размеры пятна рассеяния 6. Функция рассеяния линии (ФРЛ) 7. Геометрическая Ч К X 8. Спектральные характеристики 						Спектральный диапазон ▶ дискретный ◀					
Спектральная эффективность											
N	—	Лмкм	—	Q	—	N	—	Лмкм	—	Q	—
0		.5461		1.000		3		.0000		.000	
1		.4800		1.000		4		.0000		.000	
2		.6438		1.000		5		.0000		.000	
						6		.0000		.000	
						7		.0000		.000	

Рис.П2.46. Спектральные характеристики.

П2.7. Анализ дифракционного ЧКX

Работа предназначена для анализа частотно-контрастной характеристики в дифракционном приближении.

Любые характеристики могут вычисляться либо при номинальном положении плоскости изображения («Пл. регистрации <номинальная>»), либо при заданном смещении относительно номинального положения. Смещение может задаваться непосредственной величиной («Пл. регистрации

<смещенная>») либо можно выбрать плоскость наилучшей установки по геометрическому критерию («Пл. регистрации <ПНУ геометр. критер.>») или по волновому критерию («Пл. регистрации < ПНУ волновой критер.>») (положение плоскости наилучшей установки рассматривается в пункте «Л1.5.4. Плоскость наилучшей установки»).

При задании в оптической системе нескольких длин волн можно рассчитывать полихроматические характеристики с учетом функции спектральной эффективности (пункт «Л1.6.8. Спектральные характеристики») или монохроматические характеристики для центральной длины волны (поле «Характеристики <Полихроматические / Монохроматические>»).

Задание пространственных частот, для которых рассчитывается ЧКХ, производится в окне «Edit» и допускает задание либо непосредственных значений частот, либо их максимального значения и количества частот, либо величину шага и количество шагов. Максимальное количество частот 20. Кроме того, для всех пунктов в окне «Edit» можно задавать номер пучка.

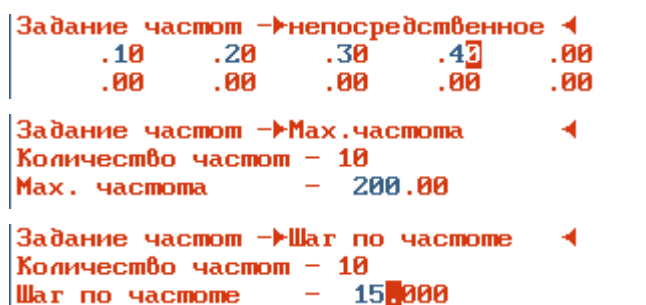


Рис.П2.47. Способы задания частот при анализе дифракционного ЧКХ.

П2.7.1. Частотно-контрастная характеристика

Выводится частотно-контрастная характеристика оптической системы в графическом или текстовом виде. Для справки рассчитывается и показывается безаберрационная ЧКХ, показывающая значения ЧКХ при отсутствии аберраций.

Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ дифракционного ЧКХ».

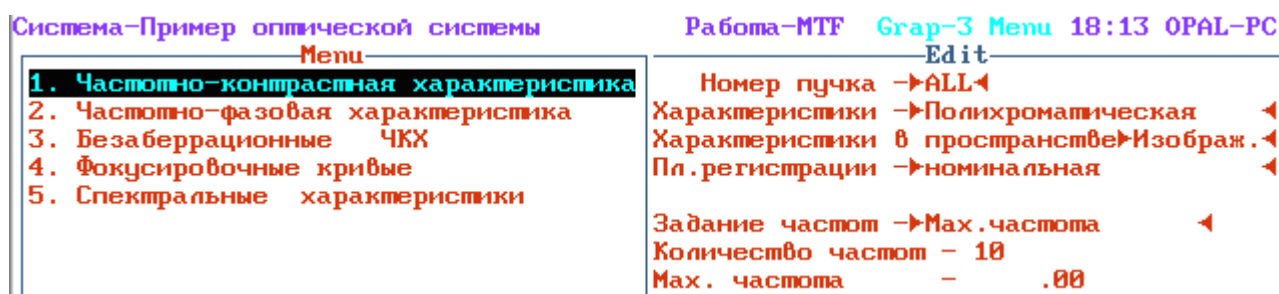


Рис.П2.48. Параметры ЧКХ.

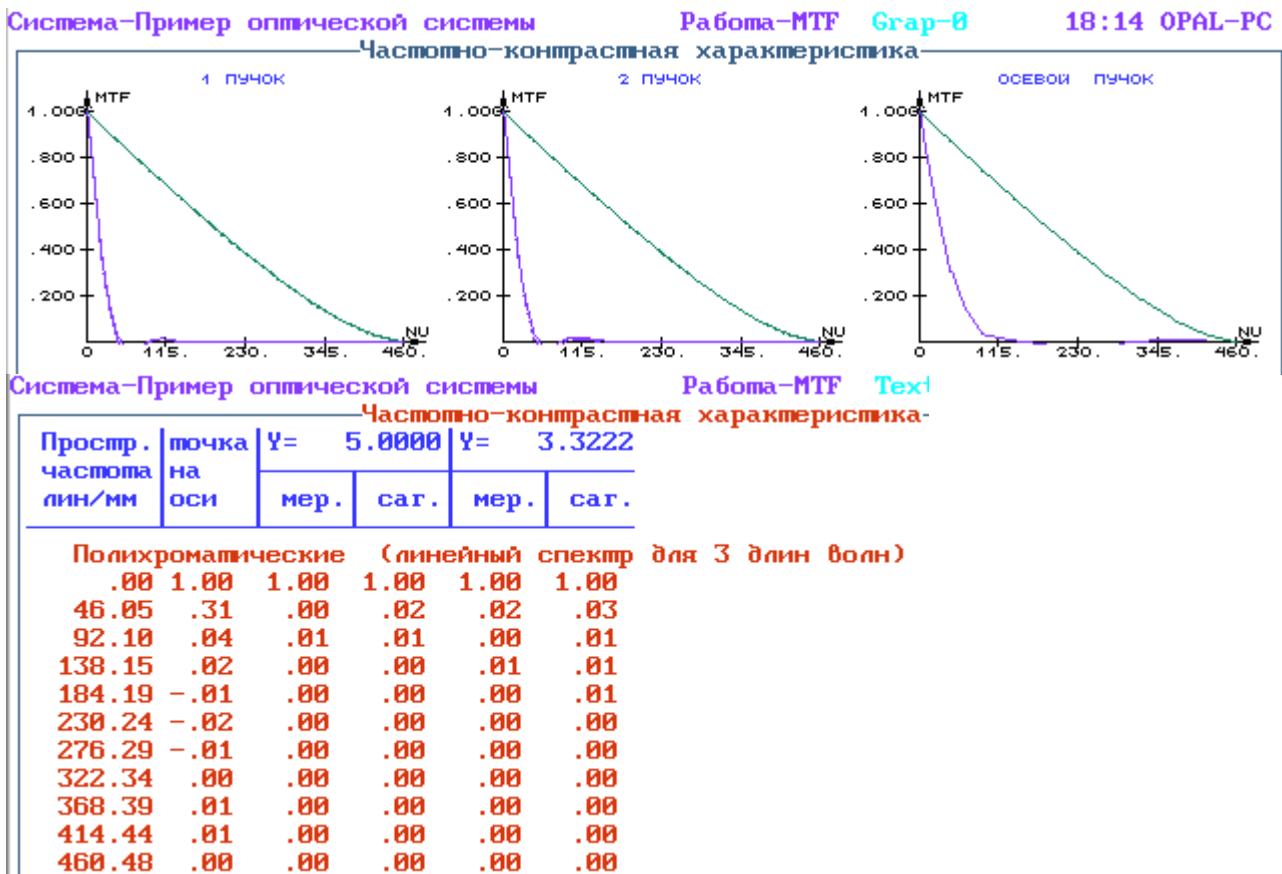


Рис.П2.49. ЧКХ (график и таблица).

П2.7.2. Частотно-фазовая характеристика

В тестовом режиме выводится значение частотно-фазовой характеристики.

Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ дифракционного ЧКХ».

П2.7.3. Безаберрационные ЧКХ

В тестовом режиме выводится значение частотно-контрастной характеристики при отсутствии aberrаций.

Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ дифракционного ЧКХ».

П2.7.4. Фокусировочные кривые

Фокусировочные диаграммы характеризуют изменение ЧКХ при сдвиге плоскости установки и рассчитываются для указанных пользователем частот (не более 5) и 5 положений плоскости установки: номинальной, $\pm DS'$ и $\pm 2 \cdot DS'$.

Величина сдвига DS' задается в поле «Шаг по дефокусир.» окна «Edit». Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ дифракционного ЧКХ».



Рис.П2.50. Безабберационные ЧКХ.

П2.7.5. Спектральные характеристики

Аналогично пункту «Л1.6.8. Спектральные характеристики».

П2.8. Анализ функции рассеяния точки

Анализ функции рассеяния точки возможен только для дифракционно-ограниченных оптических систем. Если aberrации в анализируемой точке велики, то рекомендуется проводить анализ в геометрическом приближении (параграф «Л1.6. Анализ геометрического изображения»).

Любые характеристики могут вычисляться либо при номинальном положении плоскости изображения («Пл. регистрации <номинальная>»), либо при заданном смещении относительно номинального положения. Смещение может задаваться непосредственной величиной («Пл. регистрации <смещенная>») либо можно выбрать плоскость наилучшей установки по геометрическому критерию («Пл. регистрации <ПНУ геометр. критер.>») или по волновому критерию («Пл. регистрации < ПНУ волновой критер.>») (положение плоскости наилучшей установки рассматривается в пункте «Л1.5.4. Плоскость наилучшей установки»).

Кроме того, для всех пунктов в окне «Edit» можно задавать номер пучка.

П2.8.1. Функция рассеяния точки

Функция рассеяния точки выводится в виде карты уровней равной интенсивности или в трехмерном виде. В заголовке рабочего окна выводится число Штреля.

Вид отображения устанавливается в окне «Edit». Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ функции рассеяния точки».



Рис.П2.51. Функция рассеяния точки.

П2.8.2. Функция концентрации энергии

Функция концентрации энергии показывает зависимость энергии ФРТ, содержащейся в круге определенного диаметра, от величины этого диаметра. Вывод результатов возможен в графической и табличной форме.

Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ функции рассеяния точки».

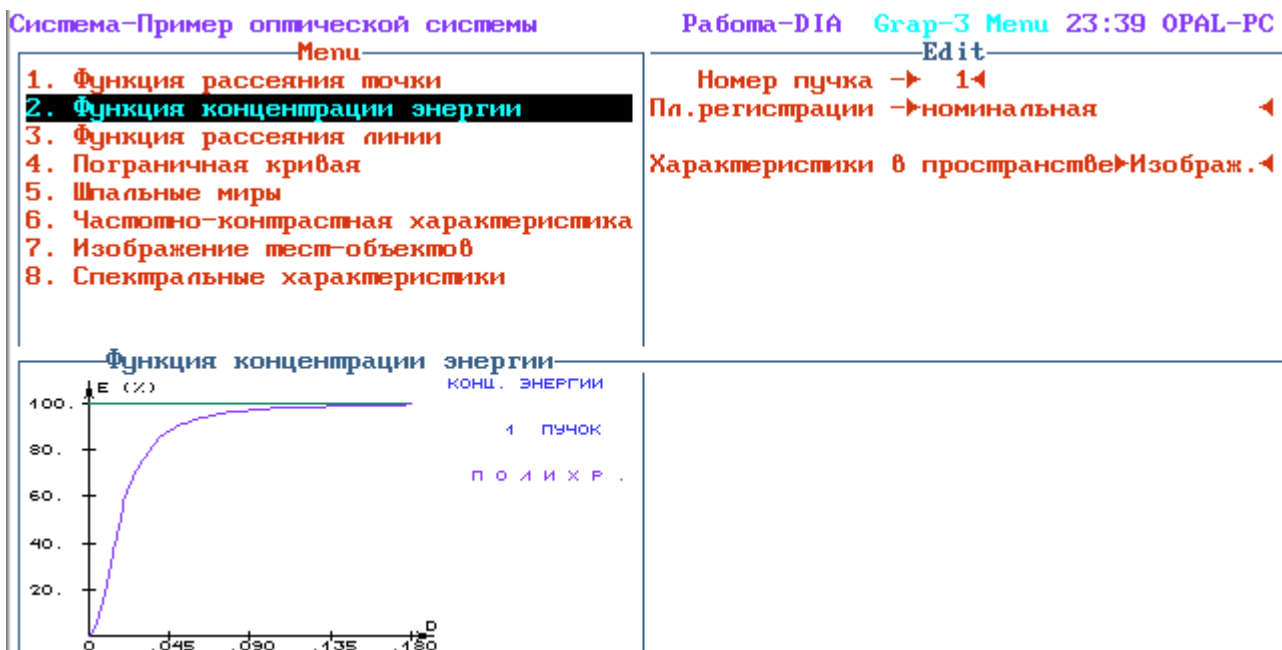


Рис.П2.52. Функция концентрации энергии.

П2.8.3. Функция рассеяния линии

Функция рассеяния линии представляет собой распределение интенсивности в изображении оптической системой бесконечно длинной линии в направлении Y (меридиональная ФРЛ) или X (сагиттальная ФРЛ).

Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ функции рассеяния точки».

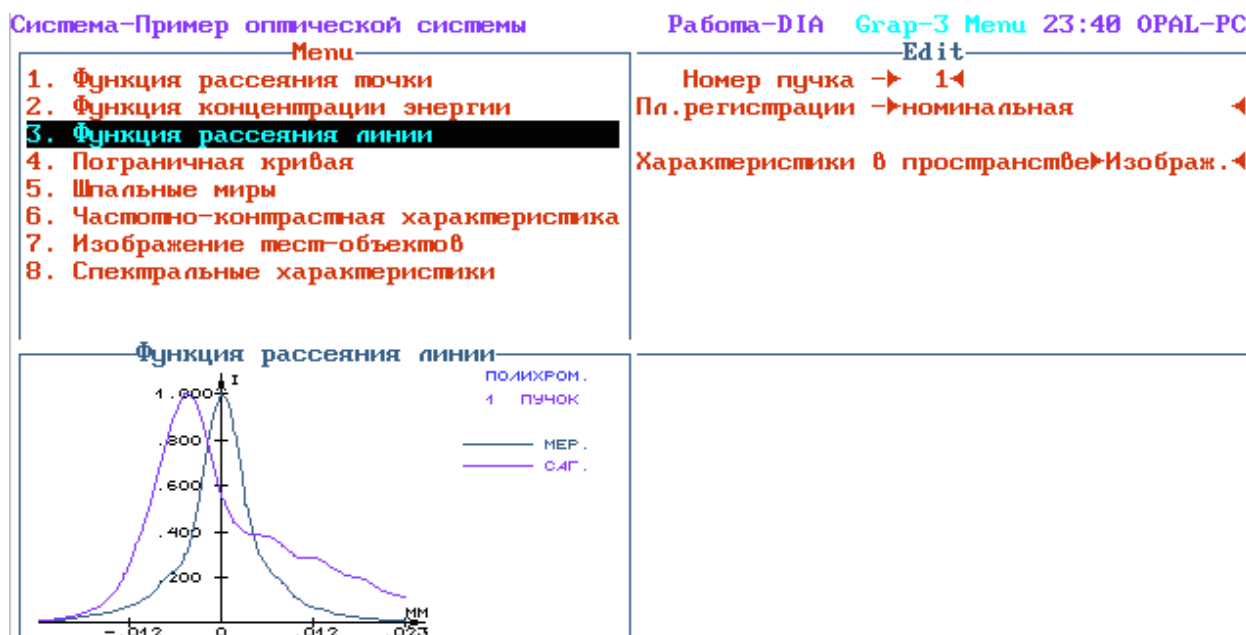


Рис.П2.53. Функция рассеяния линии.

П2.8.4. Пограничная кривая

Изображаются сечения интенсивности в изображении светящейся полуплоскости. Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ функции рассеяния точки».



Рис.П2.54. Пограничная кривая.

П2.8.5. Шпальные миры

Производится расчет изображения шпальной миры. Задание ориентации миры, количества шпал и размер шпалы производится в окне «Edit». Остальные

настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ функции рассеяния точки». Результат выводится в виде сечения или в табличной форме.

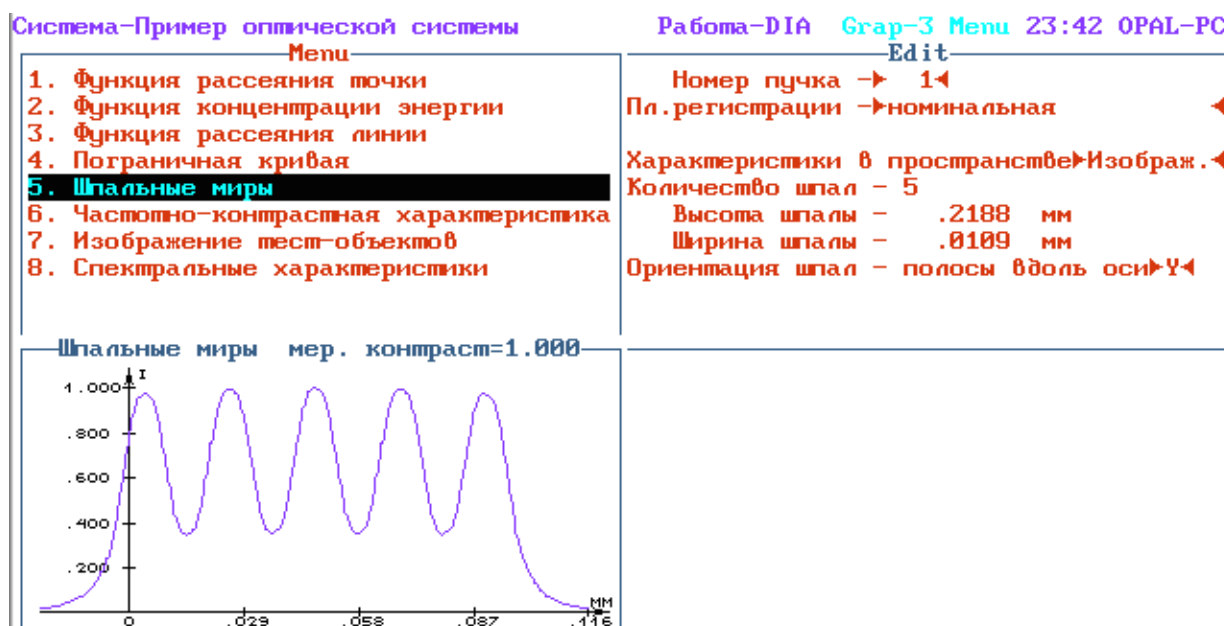


Рис.П2.55. Шпальные миры.

П2.8.6. Частотно-контрастная характеристика

Вывод частотно-контрастной характеристики возможен либо в виде двумерной функции для всех направлений частот, либо в виде графиков или таблиц для меридионального и сагиттального направления или "косых" сечений под углом 45° и 135° к меридиональному направлению.

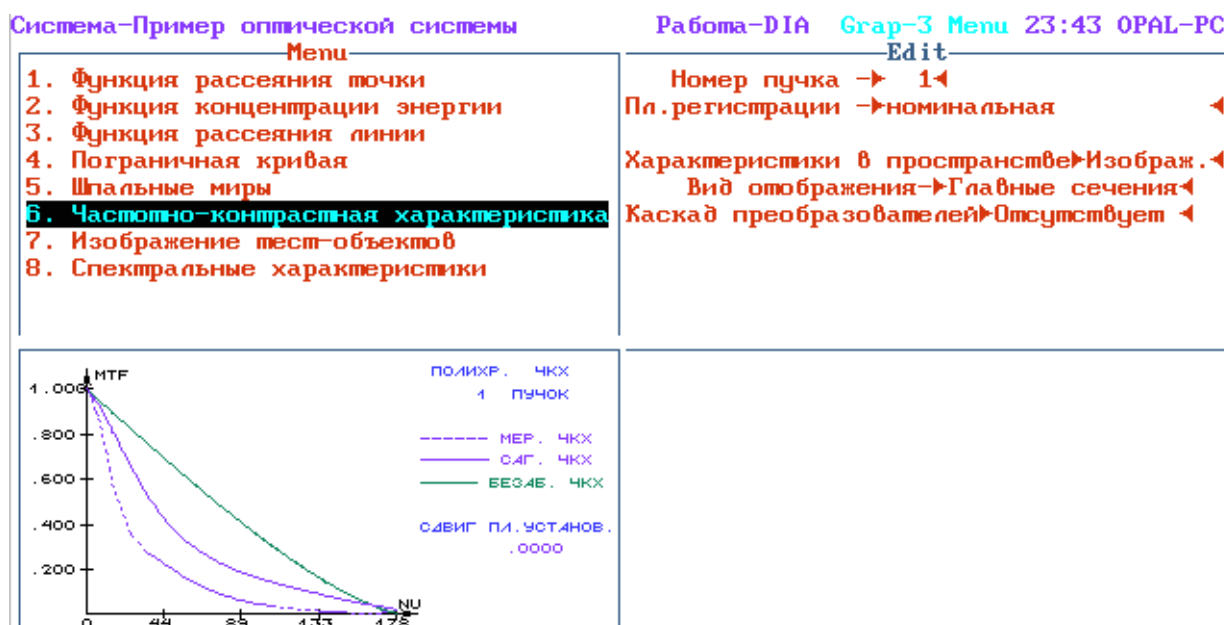


Рис.П2.56. Частотно-контрастная характеристика.

Шаг по пространственной частоте определяются автоматически. Настройка способа отображения производится в поле «Вид отображения». Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ функции рассеяния точки».

П2.8.7. Изображение тест-объектов

Производится компьютерное моделирование формирования изображения каскадом линейных изопланатических преобразователей, включающих анализируемую оптическую систему.

П2.8.8. Спектральные характеристики

Аналогично пункту «Л1.6.8. Спектральные характеристики».

Литература

Основная литература

1. Основы оптики. Конспект лекций. Под редакцией Шехонина А.А. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 156 с.
2. Родионов С.А. Основы оптики [Электронный учебник] / С.А. Родионов, Н.Б. Вознесенский, Т.В. Иванова. – СПб: СПбГУ ИТМО, ЦДО. (<http://cde.ifmo.ru>).
3. Толстоба Н.Д., Багдасарова О.В., Карпова Г.В. Основы оптики. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов. Часть 1. Под редакцией Шехонина А.А. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 108.
4. Толстоба Н.Д., Багдасарова О.В., Карпова Г.В. Основы оптики. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов. Часть 2. Под редакцией Шехонина А.А. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 92 с.

Дополнительная литература

5. Заказнов, Н.П. Теория оптических систем / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев . – Изд. 4-е, стер . – СПб. [и др.]: Издательство "Лань", 2008 . – 446 с.
6. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. - М.: Наука, 1973. – 720 с.
7. Верхотуров, О.П. Введение в вычислительную оптику / О.П. Верхотуров. - Новосибирск: СГГА, 1998. – 272 с.
8. Вычислительная оптика : справочник. / М.М. Русинов [и др.]. - 2-е изд. – СПб: ЛКИ, 2008. – 424 с.
9. Зверев, В.А. Основы оплотехники : учеб. пособие / В.А. Зверев, Т.В. Точилина. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 293 с.
10. Можаров, Г.А. Основы геометрической оптики / Г.А. Можаров. – М.: Издательский дом ЛОГОС, 2006. – 280 с.
11. Родионов, С.А. Автоматизация проектирования оптических систем / С.А. Родионов. - Л.: Машиностроение, 1982. – 270 с.
12. Стафеев, С.К. Основы оптики / С.К. Стафеев, К.К. Боярский, Г.Л. Башнина. – СПб: Питер, 2006. – 336 с.

Оглавление

Введение	3
Лабораторная работа №1. Знакомство с программой OPAL-PC	4
1.1. Задание для работы	4
1.1.1. Линзы с одной плоской поверхностью	4
1.1.2. Линзы-мениски	4
1.2. Пример выполнения работы	5
1.2.1. Создание оптической системы	5
1.2.2. Просмотр профиля линзы	5
1.2.3. Сохранение оптической системы	6
Лабораторная работа №2. Определение параксиальных параметров склеенного объектива	7
2.1. Задание для работы	7
2.2. Краткие теоретические сведения	7
2.3. Пример выполнения работы	7
2.3.1. Создание оптической системы	7
2.3.2. Определение параксиальных характеристик объектива	8
2.3.3. Определение параксиальных характеристик отдельных линз	9
2.3.4. Определение S, S', β объектива	9
2.3.5. Проверка правильности вычислений для объектива	10
2.3.6. Определение S' и β для первой линзы	11
2.3.7. Определение S' и β для второй линзы	11
2.3.8. Проверка правильности вычислений для отдельных линз	11
2.4. Оформление работы	12
2.4.1. Графическое построение изображения через объектив и его компоненты	12
2.5. Индивидуальные варианты задания	13
2.6. Вопросы для защиты	14
Лабораторная работа №3. Ограничение пучков лучей в оптических системах	15
3.1. Задание для работы	15
3.2. Краткие теоретические сведения	15
3.3. Пример выполнения работы	16
3.3.1. Задание	16
3.3.2. Создание оптической системы	16
3.3.3. Определение диаметра входного зрачка	17
3.3.4. Первая часть системы (до апертурной диафрагмы)	17
3.3.5. Определение положения входного зрачка	18
3.3.6. Диаметр апертурной диафрагмы	18
3.3.7. Вторая часть системы (после апертурной диафрагмы)	19
3.3.8. Положение выходного зрачка	19
3.3.9. Диаметр выходного зрачка	20

3.3.10. Проверка правильности вычислений при помощи OPAL-а	20
3.4. Оформление работы.....	21
3.4.1. Последовательность решения задачи и необходимые расчёты.	21
3.4.2. Чертеж объектива с указанием положения и диаметров зрачков и апертурной диафрагмы.....	22
3.4.3. Чертежи, иллюстрирующие перенос диафрагмы в пространство предметов и в пространство изображений.....	22
3.4.4. Построение хода апертурного и главного реальных лучей.....	23
3.5. Индивидуальные варианты задания.....	25
3.6. Вопросы для защиты.....	33
Лабораторная работа №4. Исследование aberrаций осевой точки	34
4.1. Задание для работы	34
4.2. Краткие теоретические сведения.....	34
4.3. Указания по выполнению работы.	34
4.3.1. Создание оптической системы.....	34
4.3.2. Определение aberrаций осевого пучка	35
4.3.3. Определение диаметра пятна рассеяния.....	37
4.3.4. Определение плоскости наилучшей установки	38
4.3.5. Определение диаметра пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки	41
4.3.6. Определение aberrаций осевого пучка в плоскости наилучшей установки	41
4.4. Оформление работы.....	42
4.4.1. Оформление графиков aberrаций	43
4.5. Индивидуальные варианты задания.....	44
4.6. Вопросы к защите.....	45
Лабораторная работа №5. Исследование aberrаций внеосевой точки 46	46
5.1. Задание для работы	46
5.2. Краткие теоретические сведения.....	46
5.3. Пример выполнения работы	47
5.3.1. Создание оптической системы.....	47
5.3.2. Определение aberrаций узкого пучка лучей	48
5.3.3. Определение aberrаций широкого пучка лучей.....	49
5.3.4. Определение диаметра пятна рассеяния.....	52
5.3.5. Определение плоскости наилучшей установки	53
5.4. Оформление работы.....	54
5.4.1. Оформление графиков aberrаций узкого пучка лучей	54
5.4.2. Оформление графиков aberrаций широкого пучка лучей	55
5.4.3. Оформление таблицы размеров и формы пятна рассеяния	56
5.5. Задание для работы	56
5.6. Вопросы к защите.....	58
Лабораторная работа №6. Исследование качества изображения оптических систем.....	59

6.1. Задание для работы	59
6.2. Краткие теоретические сведения	59
6.3. Пример выполнения работы	59
6.3.1. Создание оптической системы.....	59
6.3.2. Определение $W_{СКВ}$ и плоскости наилучшей установки	60
6.3.3. Определение числа Штреля	61
6.3.4. Определение разрешающей способности.....	62
6.4. Оформление работы.....	64
6.4.1. Пример оформления таблицы положений плоскости наилучшей установки	64
6.4.2. Пример оформления графиков ЧКХ	64
6.5. Индивидуальные варианты задания.....	66
6.6. Вопросы к защите.....	73
Приложение 1. Примеры отчетов к лабораторным работам	74
Лабораторная работа 2. Определение параксиальных параметров склеенного объектива	74
Лабораторная работа 3. Ограничение пучков лучей в оптических системах	78
Лабораторная работа 4. Исследование аберраций осевой точки	82
Лабораторная работа 5. Исследование аберраций внеосевой точки	85
Лабораторная работа 6. Исследование качества изображения оптических систем	88
Приложение 2. Описание работы с программой OPAL-PC.....	90
П2.1. Запуск программы	90
П2.2. Блок «Формирование»	90
П2.2.1. Меню «Файл»	91
П2.2.2. Меню «Система»	93
П2.2.3. Меню «Поверхность»	98
П2.2.4. Меню «Блок»	98
П2.2.5. Меню «Перестройка».....	99
П2.2.6. Меню «Настроить».....	99
П2.2.7. Меню «Выполнить»	99
П2.3. Общие принципы функционирования блоков анализа	100
П2.4. Анализ габаритов и аберраций	103
П2.4.1. Задание режимов расчета габаритов	103
П2.4.2. Параксиальные характеристики	103
П2.4.3. Суммы и аберрации Зейделя	104
П2.4.4. Габариты пучков	104
П2.4.5. Характеристики главных лучей пучков	105
П2.4.6. Аберрации осевого пучка	107
П2.4.7. Аберрации внеосевых пучков	109
П2.4.8. Ход лучей в оптической системе	110
П2.4.9. Заместить габариты на вычисленные.....	111

П2.5. Анализ волнового фронта	111
П2.5.1. Коэффициенты зонального разложения	111
П2.5.2. Коэффициенты глобального разложения	113
П2.5.3. СКВ волновой аберрации по полю	114
П2.5.4. Плоскость наилучшей установки	114
П2.5.5. Отображение волнового фронта	115
П2.6. Анализ геометрического изображения	116
П2.6.1. Точечная диаграмма	116
П2.6.2. Фокусировочные диаграммы	117
П2.6.3. Сканирование пятна рассеяния	118
П2.6.4. Функция концентрации энергии	118
П2.6.5. СКВ пятна рассеяния	119
П2.6.6. Функция рассеяния линии (ФРЛ)	119
П2.6.7. Геометрическая ЧКХ	120
П2.6.8. Спектральные характеристики	121
П2.7. Анализ дифракционного ЧКХ	121
П2.7.1. Частотно-контрастная характеристика	122
П2.7.2. Частотно-фазовая характеристика	123
П2.7.3. Безаберрационные ЧКХ	123
П2.7.4. Фокусировочные кривые	123
П2.7.5. Спектральные характеристики	124
П2.8. Анализ функции рассеяния точки	124
П2.8.1. Функция рассеяния точки	124
П2.8.2. Функция концентрации энергии	125
П2.8.3. Функция рассеяния линии	125
П2.8.4. Пограничная кривая	126
П2.8.5. Шпальные миры	126
П2.8.6. Частотно-контрастная характеристика	127
П2.8.7. Изображение тест-объектов	127
П2.8.8. Спектральные характеристики	128
Литература.....	129

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2009 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, метрографическими), 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 – ВНЦ 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 оплотехники.

Иванова Т.В. Основы оптики. Методические рекомендации к выполнению лабораторного практикума. Под редакцией Шехонина А.А.
– СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 133 .

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 17.06.09

Заказ № 2124

Тираж 300 экз.

Отпечатано на ризографе

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ОТДЕЛ

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

