

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Владимирский государственный университет имени  
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**

**Д.В. АБРАМОВ, С.А. МАКОВ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Методические указания к выполнению практических работ по  
дисциплине «Информационные технологии в оплотехнике»**

*Учебное электронное издание*

**ВЛАДИМИР 2013**

Д.В. Абрамов, С.А. Маков. Автоматизированный расчет оптических систем: Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Информационные технологии в оплотехнике». Владимирский государственный университет. Владимир. 2013. 36 с.

Методические указания к выполнению практических работ содержит материалы, предназначенные для организации занятий по овладению учащимися навыками проектирования оптических систем с помощью систем автоматизированного проектирования в оптике на примере программного пакета ZEMAX в рамках курса «Информационные технологии в оплотехнике».

Издание предназначено для учащихся первого курса магистратуры по направлению 200400 «Оплотехника», а также старших курсов других физических и технических специальностей и направлений подготовки.

Ил. 31. Табл. 3. Библиогр.: 5 назв.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Информационные технологии в оплотехнике»

Авторы:

Абрамов Дмитрий Владимирович  
Маков Степан Андреевич

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ЗАНЯТИЕ 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОДНОЛИНЗОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	6
ЗАНЯТИЕ 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	16
ЗАНЯТИЕ 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	21
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	25
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	26
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.	27
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.	29

## ВВЕДЕНИЕ

Информационные технологии стали в настоящее время неотъемлемой частью системы обеспечения как профессиональной, так научно-исследовательской деятельности специалистов любого направления и оптотехники в частности. Важное место здесь занимают системы автоматизированного проектирования (САПР). В оптотехнике САПР имеют не такую глубокую историю, как в машиностроении или радиотехнике, но не менее важны для повышения эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Поэтому овладение навыками использования таких информационных технологий необходимо при подготовке магистров направления 200400 «Оптотехника».

Одной из наиболее распространенных САПР в оптике является программный пакет ZEMAX. Он позволяет моделировать и анализировать оптические системы, что сильно облегчает процесс проектирования оптических систем. Интерфейс ZEMAX прост в использовании. К большинству функциональных возможностей ZEMAX обращаются, выбирая опции в диалоговых окнах или опускающихся меню. Описание пакета и примеры доступны в сети Internet [1], что позволяет после некоторой практики научиться быстрому диалоговому проектированию. Однако данный ресурс представляет информацию на английском языке, что затрудняет понимание программы, особенно если потенциальный пользователь только начинает ее освоение.

Настоящее издание является методическими указаниями к выполнению практических работ по курсу «Информационные технологии в оптотехнике» и предназначено для магистрантов направления 200400 «Оптотехника», обучающихся в ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». Однако оно также может быть использовано для подготовки специалистов и по другим направлениям, в том числе и в других учебных заведениях. Направленность изложенного материала определяется имеющимся в

ВлГУ специальным обеспечением, а именно лицензионным программный пакет ZEMAX. При подготовке издания учтен опыт использования и обучения работе в среде ZEMAX как в ВлГУ, так и в других вузах (см. например [2]).

Методические указания содержат пошаговые рекомендации для решения задач проектирования и анализа в среде программного пакета ZEMAX трех базовых схем прикладной оптики, а именно однолинзовой, двухкомпонентной и трехкомпонентной оптических систем. В конце описания каждого занятия приведены задания для контроля полученных навыков проектирования оптических систем с использованием возможностей ZEMAX. В приложении 1 приведено описание основных компонентов интерфейса ZEMAX, инструментов и параметров оптической системы, необходимых для начального освоения данной программы, составлено на основании ресурсов [1, 2]. В приложении 2 приведены некоторые основные определения, термины, обозначения и соотношения, применяемые в оптике, в соответствии с ГОСТ 7427-76. Данный материал предназначен для облегчения восприятия компьютерной модели оптической системы во взаимосвязи с ее физической реализацией.

# ЗАНЯТИЕ 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОДНОЛИНЗОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

## Задача.

Необходимо спроектировать оптическую систему, состоящую из одиночной линзы, для видимой области спектра с фокусным расстоянием 100 мм и размером пятна не более 0,15 мм из стекла марки ВК7.

## Порядок решения задачи.

1. Для решения задачи необходимо запустить программу Zemax. На экране монитора появится главное окно программы (рисунок 1).

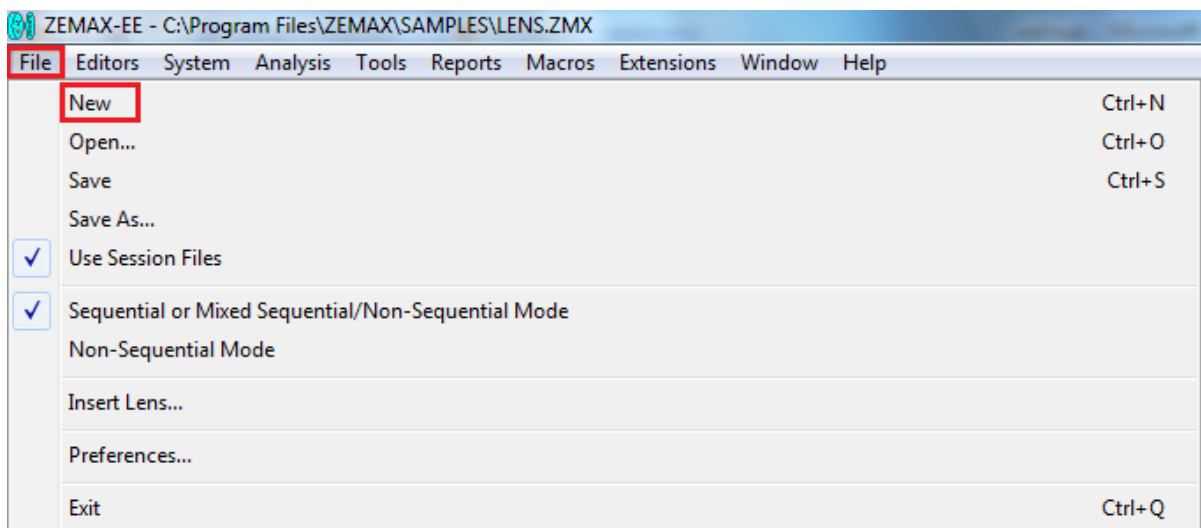
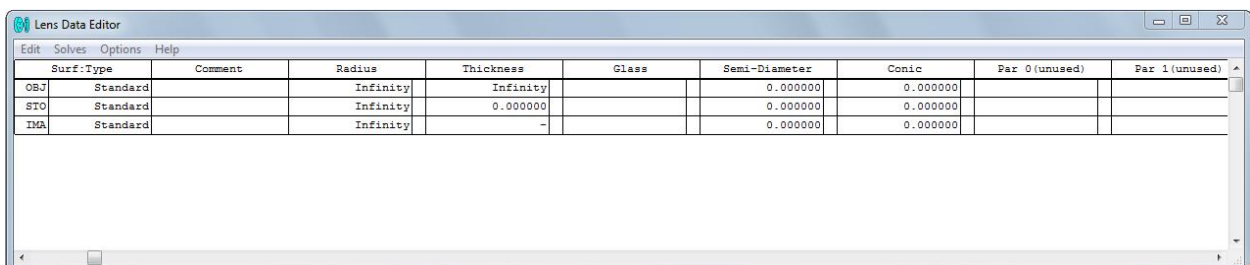


Рисунок 1. Главное окно программы ZEMAX

2. Создайте новую оптическую систему. Для этого необходимо в главном меню программы выбрать раздел **File** и вкладку **New**.

В результате становится доступной таблица для редактирования оптической системы Lens Data Editor (LDE), см. рисунок 2.

The image shows the Lens Data Editor (LDE) window. The title bar reads 'Lens Data Editor'. The menu bar includes 'Edit', 'Solves', 'Options', and 'Help'. The main area contains a table with the following columns: 'Surf:Type', 'Comment', 'Radius', 'Thickness', 'Glass', 'Semi-Diameter', 'Conic', 'Par 0 (unused)', and 'Par 1 (unused)'. The table has three rows of data:

Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0 (unused)	Par 1 (unused)
OBJ		Infinity	Infinity		0.000000	0.000000		
STO		Infinity	0.000000		0.000000	0.000000		
IMA		Infinity	-		0.000000	0.000000		

Рисунок 2. Таблица редактирования оптических элементов

Для построения оптической системы необходимо задать в таблице редактирования параметры каждой ее поверхности. По умолчанию программа предлагает систему из трех поверхностей, что соответствует одиночной тонкой линзе.

В обозначениях ZEMAX это следующие поверхности:

- OBJ – поверхность объекта;
- STO – поверхность апертурной диафрагмы системы;
- IMA – поверхность плоскости изображения.

Оптическая система с одиночной физической линзой имеет 4 поверхности. Добавьте еще одну поверхность. Это осуществляется при помощи комбинации клавиш Ctrl+Insert при выделенной строке STO. Новая поверхность получит имя 2.

3. Установите в таблице редактирования значения параметров поверхностей STO и 2. В случае первой поверхности линзы (STO) они соответствуют характеристикам физической линзы: радиусу апертуры (Semi-Diameter), толщине (Thickness) и материалу (Glass). Вторая поверхность линзы (2) считается идеальной. Значения параметров поверхностей в программе указываются в относительных единицах. Для определенности будем считать, что они соответствуют миллиметрам. Пусть характеристики проектируемой системы следующие: радиус апертуры – 10, толщина – 5, материал – стекло марки BK7 (рисунок 3).

Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000
STO*	Standard		Infinity	5.000000	BK7	10.000000 U
2*	Standard		Infinity	0.000000		10.000000 U
IMA	Standard		Infinity	-		0.000000

Рисунок 3. Установка в таблице редактирования значений параметров оптической системы

3. Задайте радиусы кривизны поверхностей линзы с учетом знака. Пусть поверхность STO имеет радиус кривизны 104, а поверхность 2 – -104.

4. Установите значение апертуры (Aperture Value) для диаметра входного зрачка (Entrance pupil diameter). Максимальное значение





Поэтому необходимо выбрать диапазон F, d, C (Visible), автоматически устанавливая значения длин волн для видимого диапазона.

6. Для более удобного восприятия результатов проектирования рекомендуется сопровождать работу построением изображения получаемой оптической системы. Вывод изображения на экран монитора можно осуществить при помощи инструмента 2D Layout опции Layout вкладки Analysis (рисунок 6).

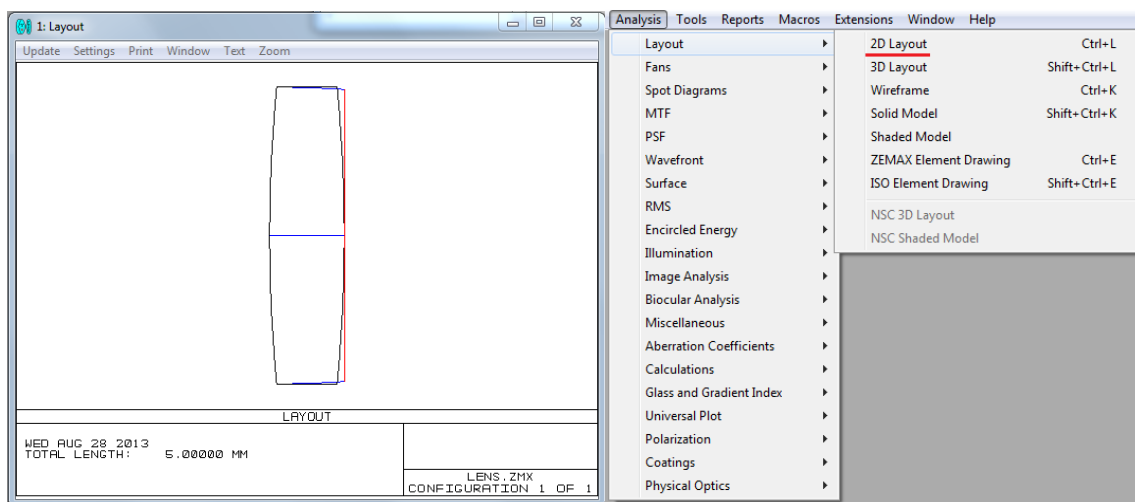


Рисунок 6. Построение двумерного изображения оптической системы

7. Определите фокусное расстояние построенной линзы. САПР ZEMAX позволяет автоматически рассчитывать фокусное расстояние. Для этого необходимо выполнить следующие операции. Выберите инструмент Quick Focus опции Miscellaneous во вкладке Tools (см. рисунок 7).

8. Все операции по заданию и расчету параметров проектируемой оптической системы отображаются в таблице редактирования. В рассматриваемом случае на данном

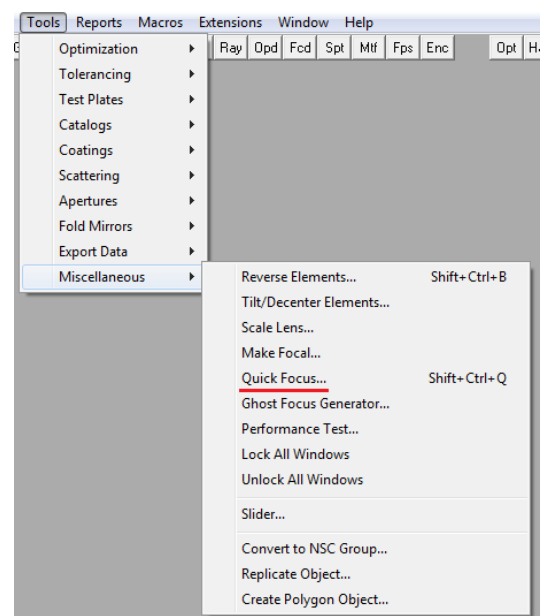


Рисунок 7. Расчет фокусного расстояния

этапе таблица редактирования примет вид, представленный на рисунке 8.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000
STO*	Standard		104.000000	5.000000	BK7	10.000000 U
2*	Standard		-104.000000	98.533451		10.000000 U
IMA	Standard		Infinity	-		0.140981

Рисунок 8. Актуализированный вид таблицы редактирования

Как видно на рисунке 8 в таблице редактирования в дополнение к радиусам кривизны появилось еще и фокусное расстояние. Оно отображается как Thickness поверхности 2 и равно 98.533451. Так же в дополнение ко всему появился еще размер пятна, который отображается как Semi-Diameter поверхности IMA и равен 0.140981.

Поменялось и окно вывода изображения линзы. Теперь в нем отображается ход лучей (рисунок 9).

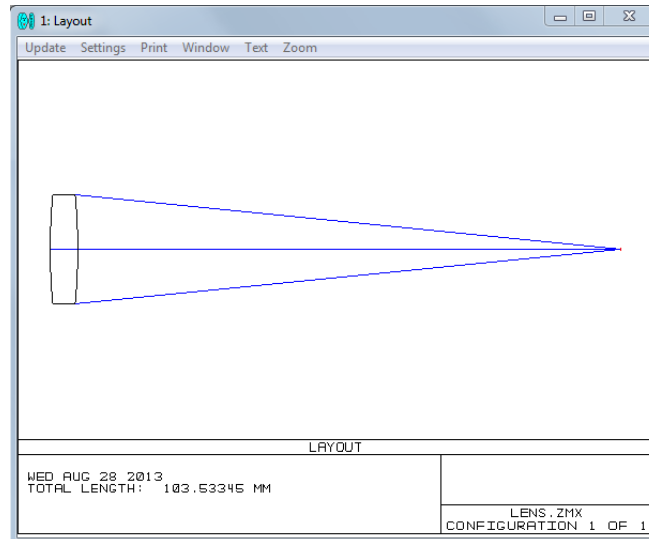


Рисунок 9. Актуализированное окно вывода изображения проектируемой оптической системы

9. Произведите автоматическую оптимизацию расчетов параметров оптической системы.

Оптимизация осуществляется на основе оценочной функции, для задания которой необходимо воспользоваться опцией Merit Function из списка вкладки Editors (рисунок 10).

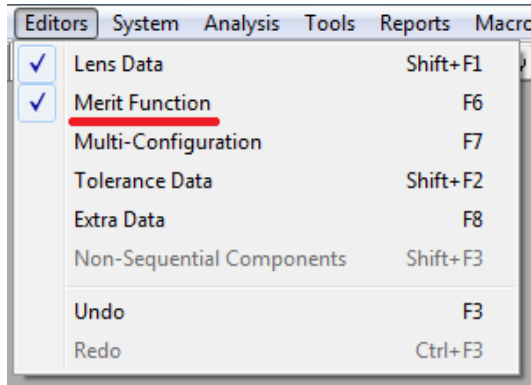


Рисунок 10. Задание оценочной функции

На экране монитора появится таблица задания оценочной функции, которая похожа на таблицу редактирования оптической системы (LDE). Из меню этого нового окна выберите вкладку Tools, а затем опцию Default Merit Function (рисунок 11). В результате станет доступно окно редактирования параметров оценочной функции.

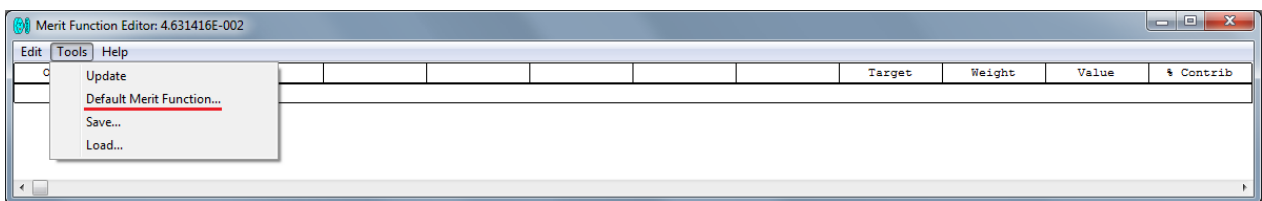


Рисунок 11. Окно задания оценочной функции

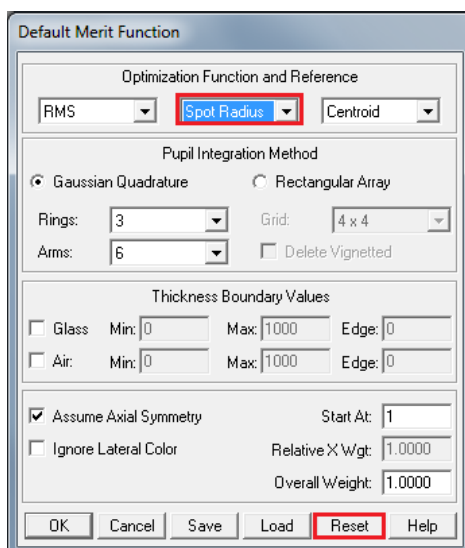


Рисунок 12. Окно управления параметрами оценочной функции

Для введения в оценочную функцию требования о необходимой величине фокусного расстояния и диаметра пятна в появившемся диалоговом окне кликните мышкой на Reset и измените значение Wavefront на Spot Radius так, как это показано на рисунке 12.

После проделанных операций на экране монитора должна появиться таблица с параметрами оценочной функции (рисунок 13).

В эту таблицу необходимо добавить функцию, отвечающую за

фокусное расстояние. Нажмите клавишу Insert для добавления к таблице еще одной строки. В столбце Type (тип функции) напечатайте EFFL и нажмите клавишу Enter. В столбце Target (цель) введите значение требуемого фокусного расстояния (100) и в столбец Weight (вес функции) впишите значение 1 (рисунок 14). Задание новой целевой функции подтвердите нажатием клавиши Enter..

Oper #	Type	Target	Weight	Value	% Contrib
1	DMFS				
2	BLNK	Default merit function: RMS spot radius centroid GQ 3 rings 6 arms			
3	BLNK	No default air thickness boundary constraints.			
4	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.			
5	BLNK	Operands for field 1.			
6	TRAC	1	0.000000	0.000000	2.148009E-003
7	TRAC	1	0.000000	0.000000	9.345122
8	TRAC	1	0.000000	0.000000	44.148089
9	TRAC	2	0.000000	0.000000	4.315766
10	TRAC	2	0.000000	0.000000	5.864972
11	TRAC	2	0.000000	0.000000	0.641988
12	TRAC	3	0.000000	0.000000	8.880335
13	TRAC	3	0.000000	0.000000	23.581014
14	TRAC	3	0.000000	0.000000	3.220567

Рисунок 13. Таблица с параметрами оценочной функции

Oper #	Type	Wave	Target	Weight	Value	% Contrib
1	DMFS					
2	EFFL	2	100.000000	1.000000	0.000000	0.000000

Рисунок 14. Новая оценочная функция

Для того, чтобы после оптимизации наши параметры изменились, нам нужно изменить параметры переменных в LDE с Fixed на Variable, но только тех значений, которые должны подбираться автоматически.

В таблице редактирования оптической системы (LDE) нажимаем правой кнопкой мыши на значение одной из поверхностей линзы и, в появившемся диалоговом окне (рисунок 15) меняем значение с Fixed на Variable.

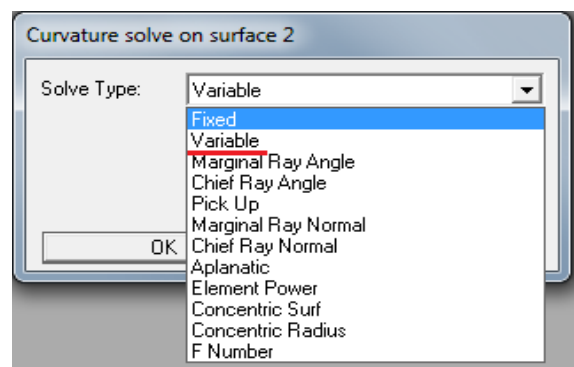


Рисунок 15. Изменение параметров переменных

Если вы все проделали верно, то напротив значения в таблицы появится знак «v» (рисунок 16).

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000
STO*	Standard		100.000000	5.000000	BK7	10.000000
2*	Standard		-104.104040	96.580142		10.000000
IMA	Standard		Infinity	-		0.141994

Рисунок 16. Подтверждение задания оценочной функции в таблице редактирования оптической системы

Далее следует запустить процесс оптимизации. Из строки главного меню выберите вкладку Tools (инструментарий) и в открывшемся списке выберите опцию Optimization (оптимизация). Появится диалоговое окно Optimization. Нажмите на команду Automatic (автоматический режим работы). Результаты автоматической оптимизации будут отражены в выпадающем окне (рисунок 17).

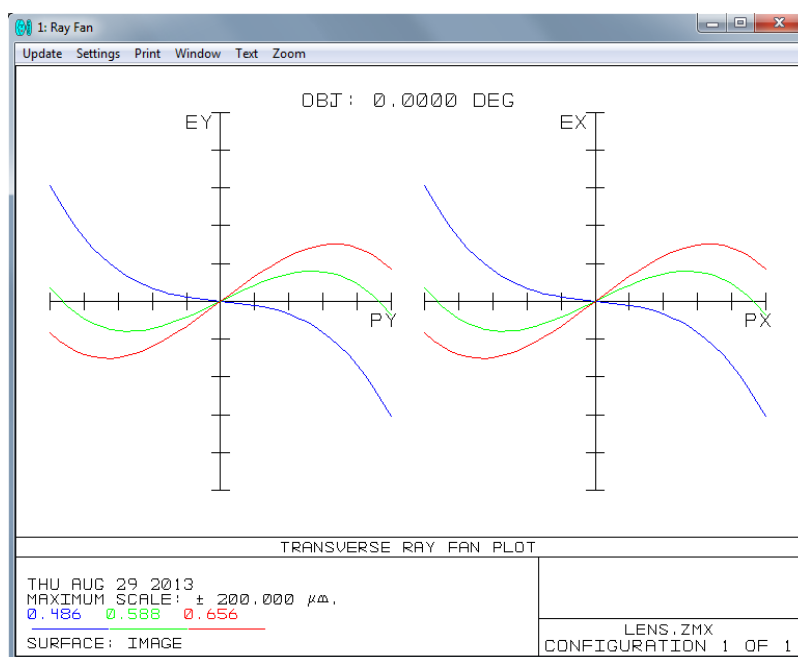


Рисунок 17. Окно результатов оптимизации

Из рисунка 17 следует, что оптимизированная оптическая схема имеет aberrации  $\pm 200$  мкм.

10. Произведите анализ диаграммы пятна рассеяния. Для этого выберите из главного меню вкладку Analysis, а в ней опцию Spot

Diagrams (диаграммы пятна рассеяния). Появится диаграмма пятна рассеяния (рисунок 18).

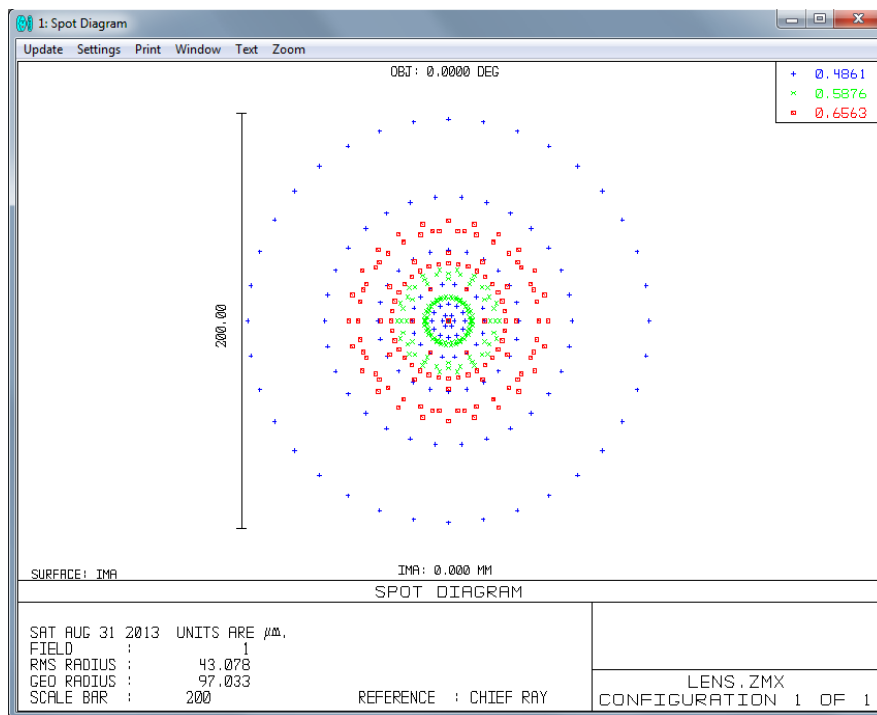


Рисунок 18. Диаграмма пятна рассеяния

Из диаграммы пятна рассеяния видно, что радиус пятна 97 мкм, что полностью удовлетворяет условиям поставленной задачи.

11. Произведите анализ качества проектируемой оптической системы на основании графика оптической разности хода (Optical Path Difference). Чтобы рассчитать Optical Path Difference (OPD) необходимо выбрать в главном меню программы вкладку Analysis и в открывшемся списке опцию Fan, а затем инструмент Optical Path (оптический путь). Результат расчета оптической разности хода будет выведен на экран монитора в виде графика OPD, показанного на рисунке 19.

График OPD для оптической системы, построенной в рамках поставленной задачи имеет aberrации, равные примерно 5 длинам волн. В основном это сферическая и сферохроматическая aberrации дефокусировка и продольный хроматизм. Кроме того, программа ZEMAX позволяет получить график хроматического смещения фокуса, который показывает изменения величины параксиального

заднего фокального расстояния в зависимости от длины волны. Для этого нужно воспользоваться инструментом Chromatic Focal Shift опции Miscellaneous из списка вкладки Analysis.

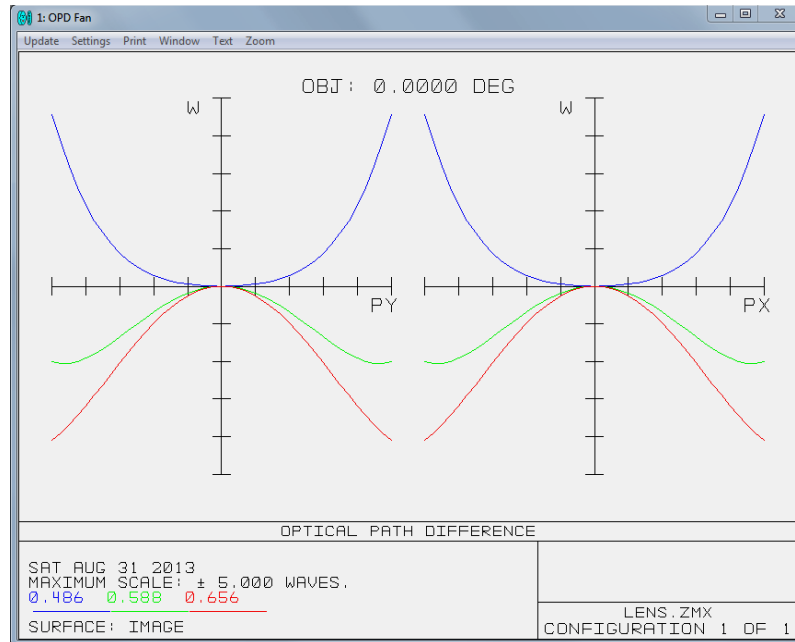


Рисунок 19. График OPD

Задание для проверки усвоения материала.

Необходимо спроектировать оптическую систему, состоящую из одиночной линзы, с фокусным расстоянием  $f$  и размером пятна не более  $d$  из стекла марки BK7 для работы на длине волны  $\lambda$ . Исходные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

$f$ , мм	170	150	120	100	100	70	70	50	50	100
$d$ , мм	0.30	0.30	0.25	0.25	0.20	0.20	0.15	0.15	0.20	0.20
$\lambda$ , нм	ВД	6328	4880	ВД	10600	6328	6943	4880	4416	ВД

ВД – видимый диапазон

## ЗАНЯТИЕ 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

### Задача.

Необходимо спроектировать двухкомпонентную оптическую систему для длины волны  $\lambda = 0,486$  мкм с фокусным расстоянием не более 60 мм и размером пятна не более 0,15 мм из стекла марки BK7. Расстояние между линзами не должно превышать 5 мм. Необходимо минимизировать потери качества оптического излучения.

### Порядок решения задачи.

1. Запустите программу Zemax.
2. Создайте двухкомпонентную оптическую систему.

Для этого воспользуйтесь результатами Занятия 1, в ходе которого была создана однолинзовая оптическая система. Измените некоторые ее значения и добавьте к ней вторую линзу для улучшения оптических характеристик системы. На рисунке 20 приведена принципиальная схема новой двухкомпонентной оптической системы.

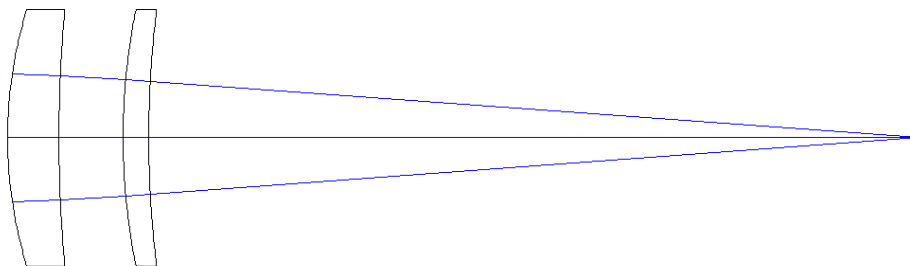


Рисунок 20. Схема двухкомпонентной оптической системы с трассировкой [4]

3. Произведите автоматическую оптимизацию расчетов параметров оптической системы.

Результаты автоматической оптимизации будут выведены на экран монитора в выпадающем окне, которое должно соответствовать рисунку 21, который показывает что двухкомпонентная оптическая схема, соответствующая условию задачи, обладает aberrациями  $\pm 10$  мкм.



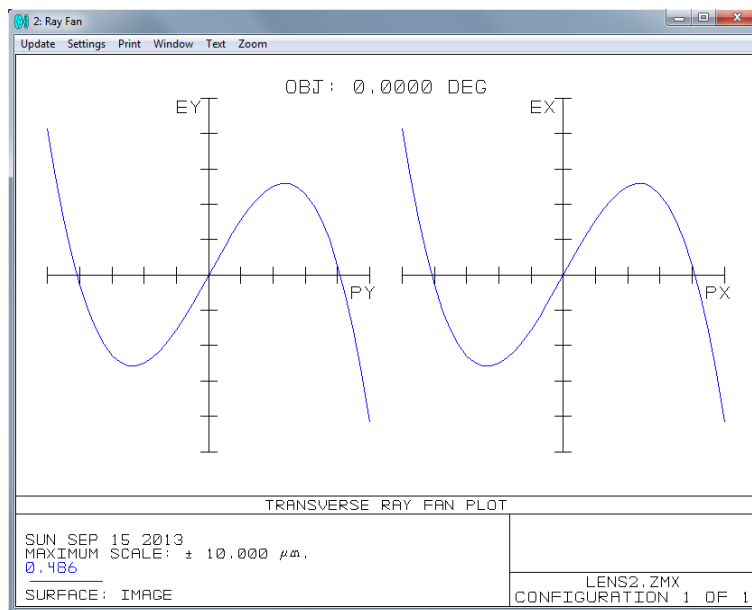


Рисунок 21. Результаты автоматической оптимизации двухкомпонентной оптической системы

4. Произведите анализ продольных aberrаций двухкомпонентной оптической системы. Для этого нужно воспользоваться инструментом Longitudinal aberration опции Miscellaneous из списка вкладки Analysis. Результат анализа будет представлен на экране монитора в виде графика показанного на рисунке 22.

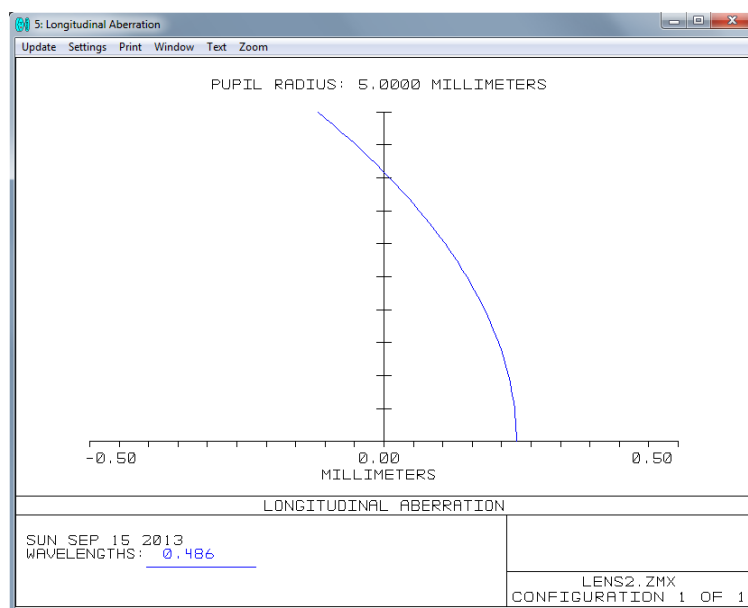


Рисунок 22. График продольных aberrаций.

5. Рассчитайте диаметр пятна фокусировки излучения в плоскости изображения проектируемой оптической системы на основании ее диаграммы рассеяния. Результат расчета диаграммы рассеяния должен соответствовать рисунку 23. Диаграмма рассеяния показывает, что диаметр пятна фокусировки излучения в плоскости изображения равен 8,2 мкм. Это удовлетворяет условиям задачи.

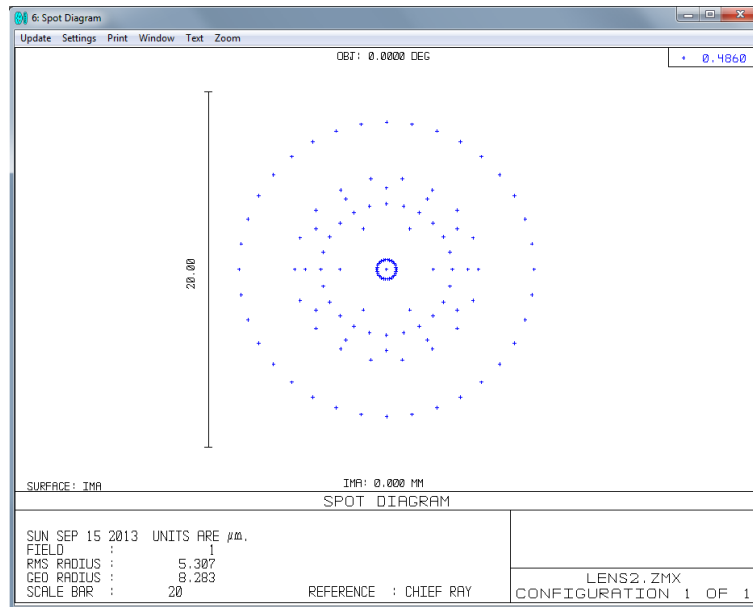


Рисунок 23. Диаграмма пятна рассеяния двухкомпонентной оптической системы

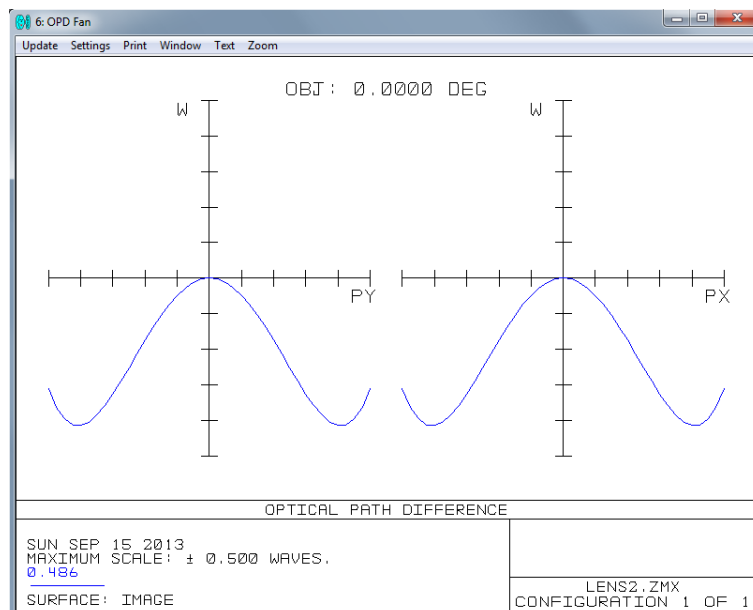


Рисунок 24. График OPD двухкомпонентной оптической системы

6. Постройте график OPD двухкомпонентной оптической системы. Результат автоматического расчета должен соответствовать рисунку 24. Исходя из графика, представленного на рисунке 24, можно определить, что разность оптического хода лучей равна, половине длины волны.

7. Постройте и исследуйте график хроматического смещения фокуса (Chromatic Focal Shift) проектируемой двухкомпонентной оптической системы. Результат автоматического расчета должен соответствовать рисунку 25.

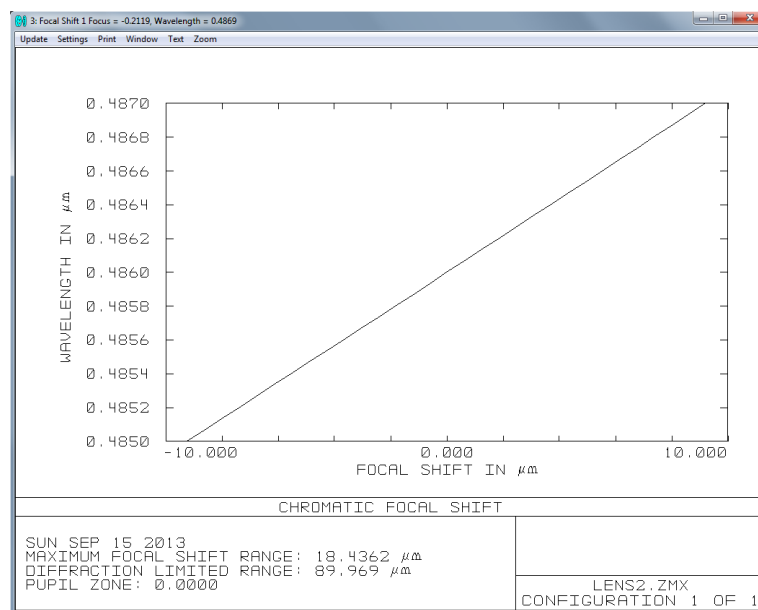


Рис. 25. График хроматического смещения фокуса.

Рисунок 25 показывает, что максимальная величина сдвига фокуса составляет около 18,4 мкм.

#### Задание для проверки усвоения материала.

Необходимо спроектировать двухкомпонентную оптическую систему с фокусным расстоянием не более  $f$  и размером пятна не более  $d$  из стекла марки BK7 для работы на длине волны  $\lambda$ . Расстояние между компонентами не должно превышать величину  $h$ . При проектировании необходимо минимизировать потери качества оптического излучения. Исходные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2

f, мм	170	150	120	100	100	70	70	50	50	100
d, мм	0.30	0.30	0.25	0.25	0.20	0.20	0.15	0.15	0.20	0.20
h, мм	15	7	10	15	10	5	5	5	7	15
$\lambda$ , нм	ВД	6328	4880	ВД	10600	6328	6943	4880	4416	ВД

ВД – видимый диапазон

## ЗАНЯТИЕ 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

### Задача.

Необходимо спроектировать трехкомпонентную оптическую систему для длины волны  $\lambda = 0,486$  мкм с фокусным расстоянием не более 70 мм и размером пятна не более 0,15 мм из стекла марки BK7. Расстояние между линзами не должно превышать 10 мм. Необходимо минимизировать потери качества оптического излучения.

### Порядок решения задачи.

1. Запустите программу Zemax.
2. Создайте двухкомпонентную оптическую систему.

Для этого воспользуйтесь результатами Занятия 2, в ходе которого была создана двухкомпонентная оптическая система. Добавьте к ней третью линзу. На рисунке 26 приведена принципиальная схема новой трехкомпонентной оптической системы [5].

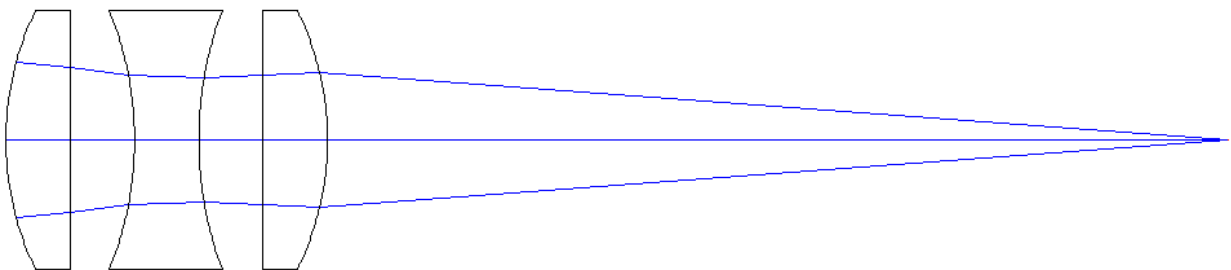


Рисунок 26. Схема трехкомпонентной оптической системы с трассировкой

3. Произведите автоматическую оптимизацию расчетов параметров оптической системы. Результаты автоматической оптимизации должны соответствовать рисунку 27. Как видно на рисунке 27, проектируемая трехкомпонентная оптическая схема обладает aberrациями  $\pm 5$  мкм.

4. Проанализируйте продольные aberrации трехкомпонентной оптической системы. Результат анализа будет представлен на экране монитора в виде графика показанного на рисунке 28.

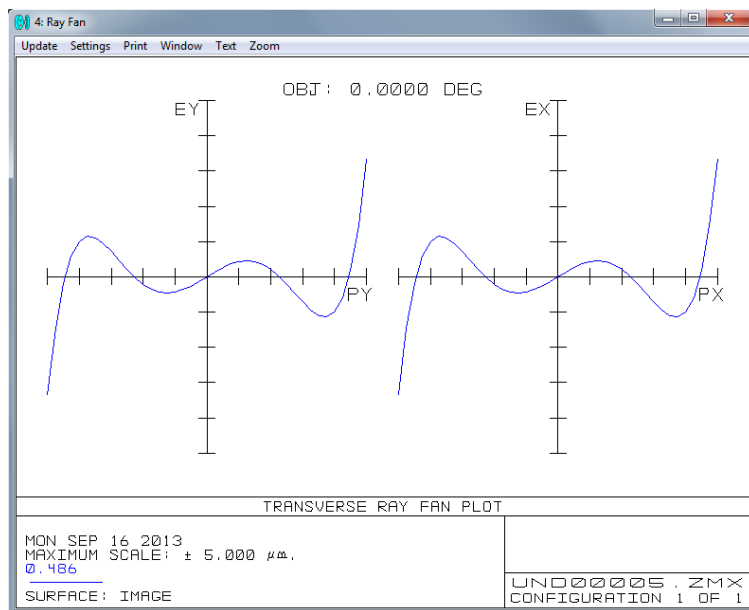


Рисунок 27. Аберрации трехкомпонентной оптической системы

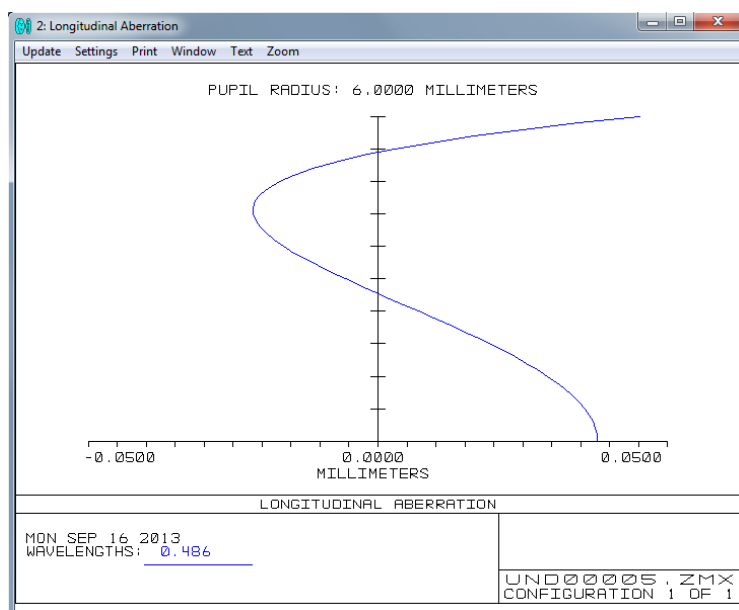


Рисунок 28. График продольных аберраций трехкомпонентной оптической системы

5. Произведите анализ диаграммы рассеяния трехкомпонентной оптической системы и определите диаметр пятна фокусировки излучения в плоскости изображения. Результат расчета диаграммы рассеяния должен соответствовать рисунку 29. Диаграмма рассеяния показывает, что диаметр пятна фокусировки излучения в плоскости изображения равен 3,1 мкм. Это удовлетворяет условиям задачи.

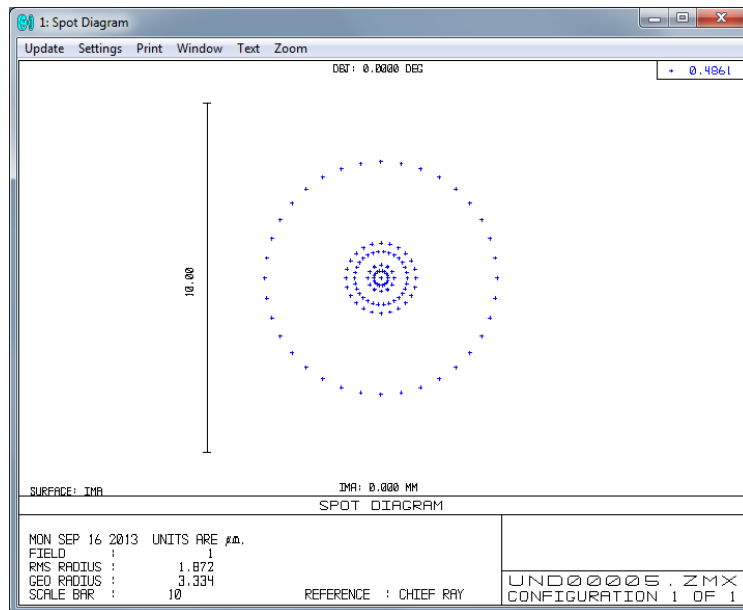


Рисунок 29. Диаграмма пятна рассеяния трехкомпонентной оптической системы

6. Постройте график OPD трехкомпонентной оптической системы. Результат автоматического расчета должен соответствовать рисунку 30. Исходя из графика, представленного на рисунке 30, можно определить, что разность оптического хода лучей равна, половине длины волны.

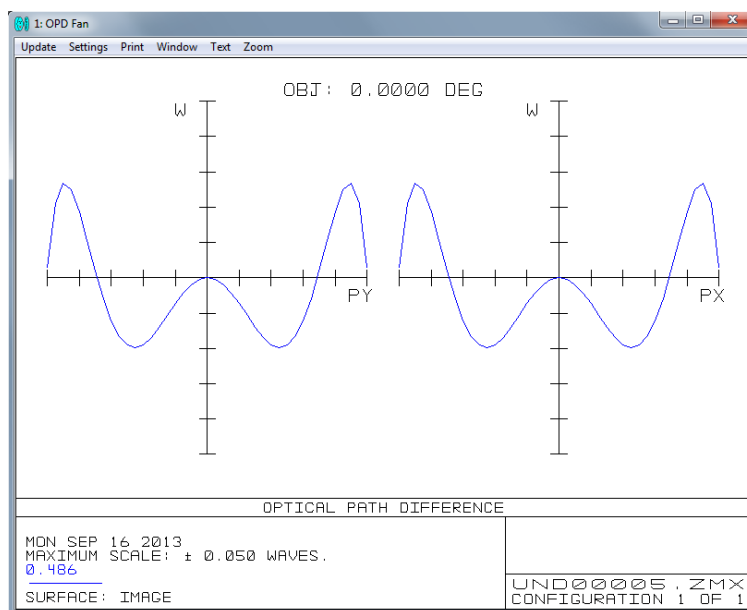


Рисунок 30. График OPD трехкомпонентной оптической системы

7. Постройте и исследуйте график хроматического смещения фокуса трехкомпонентной оптической системы. Результат автоматического расчета должен соответствовать рисунку 31. Для проектируемой трехкомпонентной оптической системы величина сдвига фокуса не превышает 27 мкм.

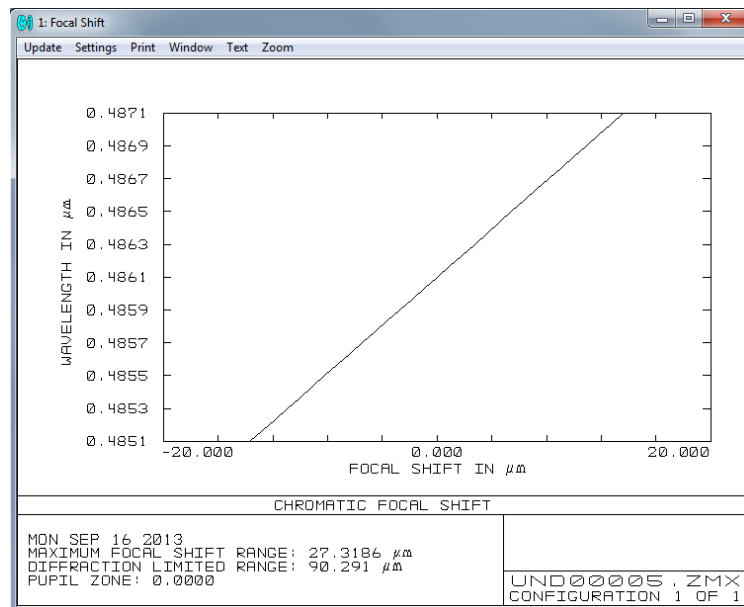


Рисунок 31. График хроматического смещения фокуса трехкомпонентной оптической системы

Задание для проверки усвоения материала.

Необходимо спроектировать трехкомпонентную оптическую систему с фокусным расстоянием не более  $f$  и размером пятна не более  $d$  для работы на длине волны  $\lambda$ . Марку стекла подобрать самостоятельно. Расстояние между компонентами не должно превышать величину  $h$ . При проектировании необходимо минимизировать потери качества оптического излучения. Исходные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3

$f$ , мм	170	150	120	100	100	70	70	50	50	100
$d$ , мм	0.30	0.30	0.25	0.25	0.20	0.20	0.15	0.15	0.20	0.20
$h$ , мм	15	7	10	15	10	5	5	5	7	15
$\lambda$ , нм	ВД	6328	4880	ВД	10600	6328	6943	4880	4416	ВД

ВД – видимый диапазон



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программный пакет ZEMAX оказывает значительную помощь при проектировании и анализе оптических систем. Выполнение практических заданий по расчету базовых оптических систем (однолинзовой, двухкомпонентной и трехкомпонентной) с использованием рекомендаций, данных в настоящих методических указаниях, позволит получить навыки использования его возможностей. Однако, эффективное использование возможностей ZEMAX предполагает знание основных принципов прикладной оптики. Поэтому настоятельно рекомендуется при проектировании оптических систем в среде систем автоматизированного проектирования совмещать использование программного продукта и проверочные расчеты на основании соотношений и положений, представленных в научно-технических изданиях, например в работах [3-5], которые рекомендуются для более полного освоения материала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Radiant Zemax [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://radiantzemax.com>.
2. Шишаков, К. В. Моделирование оптических элементов в программе ZEMAX. Практикум для учебных курсов «Прикладная оптика» и «Оптические устройства в радиотехнике» / К. В. Шишаков, И. Р. Загидуллин – Ижевск: Издательство ИжГТУ, 2008. – 64 с.
3. Гвоздева, Н. П. Теория оптических систем и оптические измерения: учебник для техникумов / Н. П. Гвоздеева, К. И. Коркина. – М.: Машиностроение, 1981. – 384 с.
4. Ефремов, А. А. Сборка оптических приборов: учебник для средних профессионально-технических училищ / А. А. Ефремов, В. П. Законников, А. В. Подобрый. – М.: Высшая школа, 1978. – 296 с.
5. Русинов, М. М. Вычислительная оптика: справочник / М. М. Русинов, А. П. Грамматин, П. Д. Иванов, Л. Н. Андреев – М.-Л.: Машиностроение, 1984. – 423 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

### ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИНТЕРФЕЙСА ZEMAX, ИНСТРУМЕНТОВ И ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Описание основных компонентов интерфейса ZEMAX, инструментов и параметров оптической системы, необходимых для начального освоения данной программы, составлено на основании ресурсов [1, 2].

Основные разделы главного меню ZEMAX:

*System.*

Используется для отображения параметров и характеристик оптической системы, таких как длина волны, параметры полей, апертура.

*Analysis.*

Используется для вычисления и представления параметров и характеристик линз в численном и графическом виде.

*Tools.*

Используется для изменения или полного расчета системы.

*Reports.*

Используется для получения данных в численном или графическом виде о рассчитываемых линзах.

Основные инструменты для оценки оптических компонентов:

*2D Layout.*

Используется только если система построена без нарушения вращательной симметрии схемы.

*3D Layout.*

Представляет трехмерное изображение оптической схемы.

*Ray Aberration.*

Рассчитывает лучевые aberrации в зависимости от координаты зрачка.

*Optical Path.*

Рассчитывает разность хода в зависимости от координат зрачка.

*Spot Diagrams.*

Рассчитывает диаграмму пятна рассеяния.

FFT Through Focus MTF.

Вычисляет методом быстрого преобразования Фурье дифракционную модуляционную передаточную функцию.

*Interferogram.*

Определяет искажения волнового фронта в зрачке для двух пучков лучей.

Значения параметров в таблице для редактирования оптической системы:

*Surf: Type* – тип поверхности (параксиальная, биконическая);

*Comment* – комментарии;

*Radius* – радиус кривизны поверхности;

*Thickness* – расстояние между последовательно расположенными поверхностями;

*Glass* – марка стекла оптического элемента;

*Semi Diameter* – радиус поверхности (оптического элемента);

*Conic* – коническая константа.

### ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ТЕРМИНЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ОПТИКЕ

В данном разделе приведены некоторые основные определения, термины, обозначения и соотношения, применяемые в оптике, в соответствии с ГОСТ 7427-76.

#### Определения и термины

**Пространство предметов** – совокупность точек пространства.

**Пространство изображений** – совокупность изображений точек пространства предметов, определенных по законам параксиальной оптики.

**Оптическая ось** – общая ось вращения поверхностей, составляющих центрированную оптическую систему.

**Геометрические объекты** – соответствующие друг другу в разных пространствах, называются сопряженными.

Установление зависимостей между взаимным расположением сопряженных друг с другом точек, принадлежащих сопряженным пространствам, происходит на основе теории со-линейного сродства (теории коллинеарных преобразований), удовлетворяющих следующим положениям:

- 1) каждой прямой одного пространства соответствует только одна прямая в другом пространстве (сопряженные прямые);
- 2) каждой точке одного пространства соответствует только одна сопряженная точка другого пространства;
- 3) всякой плоскости одного пространства соответствует только одна сопряженная плоскость другого пространства
- 4) оси симметрии одного пространства сопряжены с осями другого пространства;
- 5) повороту меридиональной (проходящей через оси симметрии) плоскости в одном пространстве на некоторый угол соответствует поворот сопряженной ей плоскости на тот же угол.

Плоскости, перпендикулярные осям, называются **нормально сопряженными**.

**Линейное увеличение** – увеличение в сопряженных плоскостях, перпендикулярных оптической оси, определяемое отношением размера параксиального изображения к размеру предмета.

**Угловое увеличение** – увеличение в сопряженных точках на оптической оси, определяемое отношением углов, образованных параксиальными лучами с оптической осью в пространстве изображений и в пространстве предметов.

**Продольное увеличение** в сопряженных точках на оптической оси – отношение размера параксиального изображения бесконечно малого отрезка, расположенного вдоль оптической оси, к размеру этого отрезка.

**Передняя и задняя главные плоскости** (не относится к телескопическим системам) – плоскости в пространстве предметов и изображений (перпендикулярные оптическим осям) и сопряженные друг с другом), для которых увеличение равно +1.

**Передний фокус** – точка на оптической оси в пространстве предметов, сопряженная с бесконечно удаленной точкой, расположенной на оптической оси в пространстве изображений.

**Задний фокус** – точка на оптической оси в пространстве предметов, сопряженная с бесконечно удаленной точкой, расположенной на оптической оси в пространстве предметов.

**Передняя (задняя) фокальная плоскость** – плоскость, перпендикулярная оптической оси и проходящая через передний (задний) фокус.

**Передняя (задняя) главная точка** – точка пересечения передней (задней) главной плоскости с оптической осью.

**Передняя (задняя) узловая точка** – точка на оптической оси в пространстве предметов (изображений), для которой угловое увеличение равно +1.

**Вершина преломляющей (отражающей) поверхности** – точка пересечения преломляющей (отражающей) поверхности с оптической осью.

**Осевая точка предмета (изображения)** – точка пересечения плоскости предмета (изображения) с оптической осью.

**Осевая точка входного (выходного) зрачка** – точка пересечения плоскости входного (выходного) зрачка с оптической осью.

**Радиус сферической поверхности** – расстояние от вершины преломляющей или отражающей поверхности до центра кривизны сферической поверхности.

**Переднее фокусное расстояние** – расстояние от передней главной точки до переднего фокуса.

**Передний фокальный отрезок** – расстояние от вершины передней поверхности до переднего фокуса.

**Задний фокальный отрезок** – расстояние от вершины задней до заднего фокуса.

**Передний отрезок** – расстояние от вершины первой преломляющей или отражающей поверхности до точки пересечения с оптической осью луча, входящего в оптическую систему.

**Задний отрезок** – расстояние от вершины последней преломляющей или отражающей поверхности до точки пересечения с оптической осью луча, выходящего из оптической системы.

**Косая толщина** – расстояние от точки пересечения луча с поверхностью до точки пересечения его с последующей по ходу луча поверхностью.

**Угол падения** – угол между лучом, падающим на преломляющую или отражающую поверхность, и нормалью к поверхности в точке падения.

**Угол преломления (отражения)** – угол между преломленным (отраженным) лучом и нормалью к поверхности в точке преломления (отражения). Углы падения и преломления отсчитывают от нормали.

**Апертурный угол в пространстве предметов** – угол между оптической осью и лучом, выходящим из осевой точки предмета и идущим на край апертурной диафрагмы.

**Апертурный угол в пространстве изображений** – угол между оптической осью и лучом, проходящим через осевую точку изображения и край апертурной диафрагмы.

**Преломляющий угол** – угол между двумя непараллельными преломляющими плоскостями призмы или клина. Его измеряют в плоскости, перпендикулярной ребру двугранного угла, между непараллельными преломляющими плоскостями.

**Видимое увеличение** – отношение тангенса угла, под которым наблюдается параксиальное изображение, к тангенсу угла, под которым наблюдается предмет невооруженным взглядом.

**Видимое увеличение телескопической системы** – угловое увеличение для параксиальных лучей, проходящих через осевые точки входного и выходного зрачков.

**Апертурная диафрагма** – диафрагма, ограничивающая пучок лучей, выходящих из осевой точки предмета.

**Входной зрачок** – параксиальное изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов или апертурная диафрагма, расположенная в пространстве предметов.

**Выходной зрачок** – параксиальное изображение апертурной диафрагмы в пространстве изображений или апертурная диафрагма, расположенная в пространстве изображений.

**Числовая апертура** (в пространстве предметов) – произведение показателя преломления на абсолютное значение синуса апертурного угла.

**Относительное отверстие** – абсолютное значение отношения удвоенного расстояния от оптической оси до точки преломления или отражения меридионального луча, параллельного оптической оси в пространстве предметов и проходящего через край апертурной диафрагмы, к заднему фокусному расстоянию системы.

**Диафрагменное число** – величина, обратная относительному отверстию.

**Полевая диафрагма** – диафрагма, расположенная в плоскости предмета или в одной из плоскостей, с ней сопряженных, и



ограничивающая размер линейного поля оптической системы в пространстве изображений.

**Параксиальный луч** – луч, идущий бесконечно близко к оптической оси.

**Нулевой луч** – условный луч, используемый при расчете оптических систем, отличающийся от параксиального тем, что для него масштаб высот и масштаб отрезков вдоль оптической оси связаны через произвольный постоянный коэффициент пропорциональности.

Нулевой луч обладает следующими свойствами:

1) он отсекает на оптической оси те же отрезки, что и параксиальный;

2) высоты, отсекаемые на главных плоскостях преломляющихся поверхностей, немного отличаются от высот реального луча;

3) тангенсы углов нулевого и параксиального лучей с оптической осью пропорциональны.

Формулы для расчета нулевого луча проще аналогичных формул для расчета реального луча. Изображения предметов с помощью нулевых лучей строятся на положениях со-линейного сродства.

### **Буквенные обозначения**

Латинскими буквами обозначаются следующие величины:

$A$  – осевая точка предмета;

$A'$  – осевая точка изображения;

$C$  – центр кривизны сферической поверхности;

$D$  – диаметр входного зрачка;

$D'$  – диаметр выходного зрачка;

$\frac{D}{f'}$  – относительное отверстие;

$F$  – передний фокус;

$F'$  – задний фокус;

$K$  – диафрагменное число;

$H$  – передняя главная точка;

$H'$  – задняя главная точка;  
 $M$  – координата точки пересечения луча с плоскостью входного зрачка по оси  $OX$  (в сагиттальной плоскости);  
 $M'$  – координата точки пересечения луча с плоскостью выходного зрачка по оси  $OX$  (в сагиттальной плоскости);  
 $N$  – передняя узловая точка;  
 $N$  – задняя узловая точка;  
 $O$  – вершина преломляющей (отражающей) поверхности;  
 $P$  – осевая точка входного зрачка;  
 $P'$  – осевая выходного зрачка;  
 $Q$  – продольное увеличение в сопряженных точках на оптической оси;  
 $V$  – линейное увеличение;  
 $W$  – угловое увеличение;  
 $a$  – расстояние от передней главной точки до осевой точки предмета;  
 $a'$  – расстояние от задней главной точки до осевой точки изображения;  
 $a_p$  – расстояние от передней главной точки до осевой точки входного зрачка;  
 $a'_p$  – расстояние от задней главной точки до осевой точки выходного зрачка;  
 $d$  – расстояние от вершины поверхности до вершины последующей по ходу луча поверхности;  
 $f$  – переднее фокусное расстояние;  
 $f'$  – заднее фокусное расстояние;  
 $h$  – расстояние от оптической оси до точки преломления (отражения) меридионального луча;  
 $m$  – координата точки пересечения луча с плоскостью входного зрачка по оси  $OY$  (в меридиональной плоскости);  
 $m'$  – координата точки пересечения луча с плоскостью выходного зрачка по оси  $OY$  (в меридиональной плоскости);  
 радиус сферической поверхности;  
 $s$  – передний отрезок;

$s'$  – задний отрезок;  
 $s_F$  – передний фокальный отрезок;  
 $s'_{F'}$  – задний фокальный отрезок;  
 $s_H$  – расстояние от вершины передней поверхности до передней главной точки;  
 $s'_{H'}$  – расстояние от вершины задней поверхности до задней главной точки;  
 $2y$  – линейное поле оптической системы в пространстве предметов;  
 $2y'$  – линейное поле оптической системы в пространстве изображений;  
 $z$  – расстояние от переднего фокуса до осевой точки предмета;  
 $z'$  – расстояние от заднего фокуса до осевой точки изображения;

Греческими буквами обозначаются следующие величины:

$A$  – числовая апертура;  
 $\Gamma$  – видимое увеличение;  
 $\bar{\Gamma}$  – видимое увеличение лупы, микроскопа, окуляра;  
 $\Gamma_{\tau}$  – видимое увеличение телескопической системы;  
 $\theta$  – преломляющийся угол;  
 $\alpha$  – угол между оптической осью и параксиальным лучом, выходящим из осевой точки предмета до преломления (отражения);  
 $\alpha'$  – угол между оптической осью и параксиальным лучом, выходящим из осевой точки предмета после;  
 $\beta$  – угол между оптической осью и параксиальным лучом, проходящим через осевую точку входного зрачка;  
 $\beta'$  – угол между оптической осью и параксиальным лучом, проходящим через осевую точку выходного зрачка после преломления (отражения);  
 $\gamma$  – угловое увеличение;  
 $\varepsilon$  – угол падения;  
 $\varepsilon'$  – угол преломления (отражения);  
 $\sigma$  – угол между оптической осью и меридиональным лучом;  
 $\sigma_A$  – апертурный угол в пространстве предметов;  
 $\sigma_{A'}$  – апертурный угол в пространстве изображений;

$\varphi$  – угол между нормалью к поверхности и оптической осью;  
 $2\omega$  – угловое поле оптической системы в пространстве предметов;

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

### Линзы

Линза – простейшая оптическая система в виде одного прозрачного тела, ограниченного двумя полированными преломляющими поверхностями, из которых хотя бы одна является неплоской. Линзы делятся по виду преломляющих поверхностей на сферические, параболические и цилиндрические. Нумерация поверхностей линз идет слева направо.

Введем обозначения:  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы первой и второй поверхностей линзы;  $d$  – толщина линзы вдоль оси;

Переднее и заднее фокусное расстояния вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} f'_1 = \frac{n_2 r_1}{(n_2 - n_1)}; & f'_2 = \frac{n_3 r_2}{(n_3 - n_2)} \\ f_1 = -\frac{n_1 r_1}{(n_2 - n_1)}; & f_2 = -\frac{n_2 r_2}{(n_3 - n_2)} \end{cases},$$

где  $n_1$  – показатель преломления среды до линзы;

$n_2$  – показатель преломления линзы;

$n_3$  – показатель преломления после линзы;

Для заднего фокусного расстояния линзы можно написать выражение:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{n_3} \left( \frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_3 - n_2}{r_2} \right) - \frac{(n_2 - n_1)(n_3 - n_2)}{n_2 n_3 r_1 r_2} \cdot d.$$

Аналогично для переднего фокусного расстояния:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{n_1} \left( \frac{n_1 - n_2}{r_1} + \frac{n_2 - n_3}{r_2} \right) - \frac{(n_1 - n_2)(n_2 - n_3)}{n_1 n_2 r_1 r_2} \cdot d.$$

Одной из главных характеристик линзы это ее оптическая сила:

$$\Phi = \frac{1000}{f}.$$