

## **Общая информация по дистанционному изучению дисциплины «Оптика»**

На период карантина аспирантам НТЦ УП РАН предлагается дистанционно изучить следующие разделы дисциплины «Оптика»:

1. Геометрическая оптика.  
*Идеальная оптическая система. Оптика параксиальных лучей. Ограничение пучков лучей. Монохроматические и хроматические aberrации оптических систем. Типы оптических приборов (телескопическая система, микроскоп, фотообъектив, проекционная система).*
2. Оптика лазеров.  
*Свойства излучения лазеров. Параметры лазерного пучка. Оптические системы для концентрации и уменьшения расходимости лазерного излучения.*
3. Интерференция и дифракция световых волн.  
*Двухлучевая интерференция, схемы двухлучевых интерферометров. Дифракция. Влияние дифракции на качество изображения.*

Для изучения рекомендуется пользоваться приведенным ниже конспектом, а также дополнительной литературой:

1. Заказнов Н.П. и др. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. СПб.: Лань. 2008. 448 с.
2. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ). 2000. 167 с.

Приведенный ниже конспект содержит основы моделирования оптических систем и разработан применительно к САПР ZEMAX. Аспирантам предлагается ознакомиться с конспектом; после отмены карантина в НТЦ УП РАН будут проведены демонстрационные лабораторные работы в САПР ZEMAX для закрепления изученного теоретического материала.

## **1. Общие сведения**

Программа расчета оптических систем ZEMAX позволяет моделировать, анализировать и оптимизировать ОС различных типов: центрированные, пространственные, панкратические, изображающие и осветительные. В программе можно рассчитывать как реальные, так и параксиальные лучи, проводить анализ геометрических aberrаций, а также анализировать ОС с точки зрения физической оптики, назначать допуски и многое другое.

Подробную справку по работе с ZEMAX можно получить в руководстве пользователя, которое прилагается к программе (Help → Manual).

### **1.1. Интерфейс программы**

В ZEMAX существуют различные типы окон (рис. 1.1).

*Главное окно* имеет большую свободную область с заголовком программы, панелью меню и панелью инструментов вверху. Команды, доступные на этой панели меню, применяются к оптической системе в целом.

*Окна редакторов:* редактор конструктивных параметров (Lens Data Editor), редактор оценочной функции (Merit Function Editor), редактор мультikonфигураций (Multi-Configuration Editor), редактор допусков (Tolerance Data Editor), редактор дополнительных данных (Extra Data Editor) и редактор пространственной ОС (Non-Sequential Components Editor).

*Графические окна* используются, чтобы отобразить графические данные моделируемой системы (оптические схемы с ходом лучей, графики aberrаций и др.).

*Текстовые окна* применяются для отображения текстовых данных, например, основных параметров ОС, значений aberrаций и других численных данных.

*Диалоговые окна* (неизменяемые всплывающие окна) используются, чтобы изменить опции или значения угловых полей, длин волн, апертур и типов поверхностей. Также широко применяются для изменения опций в графических и текстовых окнах, чтобы, например, изменить число лучей на графике хода лучей через проектируемую систему.

Все окна могут быть перемещены или изменены (кроме диалоговых) с использованием мыши или команд клавиатуры.

### **1.2. Правила знаков, обозначения и определения**

Перед началом работы с программой дадим обозначения основным характеристикам, описывающим ОС, и сформулируем правила определения их значений и знаков.

Нумерация поверхностей в ZEMAX начинается с поверхности предмета, которой присваивается номер 0. Поверхность 1 – это первая поверхность первого оптического элемента и т.д. В соответствии с правилом знаков, принятым в России, положение предмета отсчитывается от первой поверхности ОС до предмета и считается отрицательным, если предмет находится левее первой поверхности ОС. Следует запомнить, что в ZEMAX, наоборот, положение предмета

измеряется в направлении от предмета до первой поверхности ОС, т.е. расположение предмета слева от ОС соответствует положительному предметному отрезку.

Правило определения знака углов в ZEMAX также противоположно принятому в России. Положительным считается угол между лучом и осью в том случае, если для того, чтобы описать угол, ось необходимо повернуть до луча против часовой стрелки. Например, если как на рис. 1.2 предметная точка находится выше оптической оси и предмет расположен перед входным зрачком ОС, то угол наклона главного луча к оптической оси отрицательный (тогда как по правилу знаков, принятому в России, этот угол положительный).

На рис. 1.1 показаны некоторые параксиальные характеристики ОС в том виде, в котором они фигурируют в программе.

EFFL (Effective focal length) – эквивалентное фокусное расстояние. Отсчитывается от задней главной плоскости системы до плоскости параксиального изображения бесконечно удаленного предмета. Эквивалентное фокусное расстояние всегда вычисляется для показателя преломления, равного 1.0, даже если пространство изображения имеет другую величину показателя преломления.

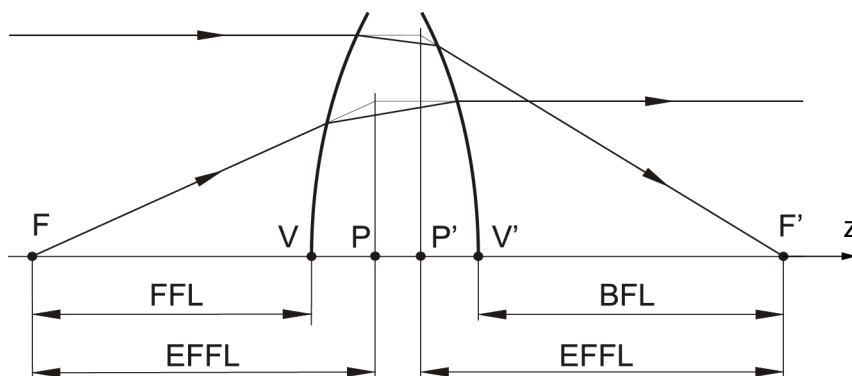


Рисунок 1.1 – Параксиальные характеристики ОС

FFL – передний фокальный отрезок.

BFL (Back focal length) – задний фокальный отрезок. Это расстояние определяется вдоль оси Z от последней поверхности детали, сделанной из стекла, до задней фокальной плоскости. Если в ОС отсутствуют детали из стекла, то задний фокальный отрезок равен расстоянию от первой поверхности до плоскости параксиального изображения бесконечно удаленного предмета.

V и V' – вершины первой и последней по ходу лучей поверхностей.

P и P' – передняя и задняя главные точки. Положение главной плоскости всегда рассчитывается для параксиальной области.

На рис. 1.2 показаны входной и выходной зрачки ОС, а также крайний луч, идущий из осевой предметной точки A, и главный луч, идущий из внеосевой точки B.

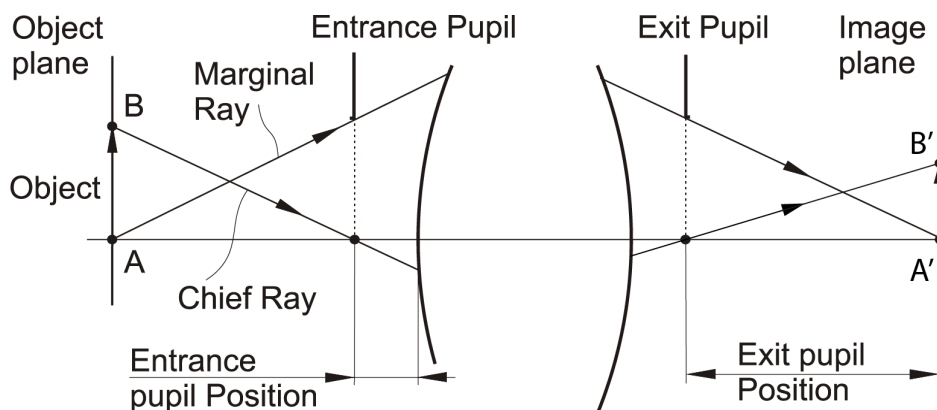


Рисунок 1.2 – Ограничение пучков лучей в ОС

Entrance (Exit) Pupil – входной (выходной) зрачок.

Marginal Ray – крайний луч, идущий из осевой предметной точки A через край входного зрачка (при наличии виньетирования – через край виньетируемого входного зрачка), при этом игнорируется aberrация входного зрачка. Когда включен режим «прицеливания луча» Ray Aiming (см. п. 1.4), крайний луч идет через край виньетируемой апертурной диафрагмы.

Chief Ray – главный луч, идущий из внеосевой точки B через центр входного зрачка, либо через центр виньетируемого входного зрачка, если присутствует виньетирование.

Entrance Pupil Position – параксиальное положение входного зрачка, отсчитываемое от первой поверхности ОС.

Exit Pupil Position – параксиальное положение выходного зрачка, отсчитываемое от поверхности изображения.

## 2. Моделирование оптических систем

### 2.1. Редактирование конструктивных параметров

Конструктивные параметры оптической системы записываются в окне редактора конструктивных параметров (Editors → Lens Data), которое выглядит, как показано на рисунке 2.1.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000
STO	Standard		Infinity	0.000		0.000
IMA	Standard		Infinity	-		0.000

Рисунок 2.1 – Окно редактора конструктивных параметров

В начале работы в этом окне присутствуют лишь 3 строки:

- 1) "OBJ" описывает поверхность предмета;

- 2) "IMA" описывает поверхность изображения;
- 3) "STO" – единственная поверхность, принадлежащая будущей оптической системе. "STO" – сокращение от слова Stop (диафрагма), обозначающее положение апертурной диафрагмы.

С помощью пункта меню Edit в окне редактора конструктивных параметров можно управлять количеством и типом поверхностей. Вставить/удалить поверхность можно и с помощью клавиш Ins/Del на клавиатуре.

Конструктивные параметры линзы записываются в соответствующие ячейки редактора (Radius, Thickness, Glass, ...). Навигация в поле редактора осуществляется стрелками на клавиатуре или щелчком левой кнопки мыши. Ввод данных осуществляется в активную ячейку с клавиатуры. При этом если ячейка уже содержала некоторую информацию, она полностью стирается. Если нужно отредактировать данные ячейки, нажимают клавиши F2 или Backspace – в ячейке появляется курсор, который перемещают с помощью мыши или стрелок на клавиатуре.

В первом столбце редактора конструктивных параметров указывается информация о типе оптической поверхности. Изменить тип поверхности можно, вызвав диалоговое окно Surface Properties. Делается это щелчком правой кнопки мыши по соответствующей ячейке первого столбца редактора конструктивных параметров. В появившемся окне во вкладке Type из списка Surface Types выбирается необходимый тип поверхности.

В ZEMAX существует возможность моделирования оптических элементов различных типов. Это сферические и асферические поверхности вращения, цилиндрические и торические поверхности, дифракционные решетки, градиентные элементы и др. Существуют также специальные типы поверхностей, которые не могут быть реализованы на практике, а нужны лишь для моделирования ОС. Таковыми, например, являются «Paraxial», представляющая собой идеальную тонкую линзу, и «Coordinate Break», необходимая при моделировании пространственных ОС для изменения направления оптической оси.

## **2.2. Использование функций "Solves"**

Часто возникает необходимость автоматического определения значения того или иного конструктивного параметра ОС. Например, при моделировании ОС симметричного типа значение некоторых параметров удобно сделать зависимыми от значений других параметров. При этом изменение независимых параметров приведет к автоматическому изменению параметров, от них зависящих. Другой пример – установка поверхности изображения в плоскость Гаусса. Это может производиться автоматически, так что при изменении ОС поверхность изображения будет всегда совпадать с плоскостью Гаусса. Это и многое другое можно сделать с использованием функций "Solves".

### 2.3. Работа с каталогами стекол

Каталоги стекол существуют в виде файлов с расширением «.agf». Расположение каталогов указывается в пункте меню File → Preferences → Directories (см. рис. 2.2). Здесь также указывается расположение других данных, например, макросов, данных о покрытиях и др.

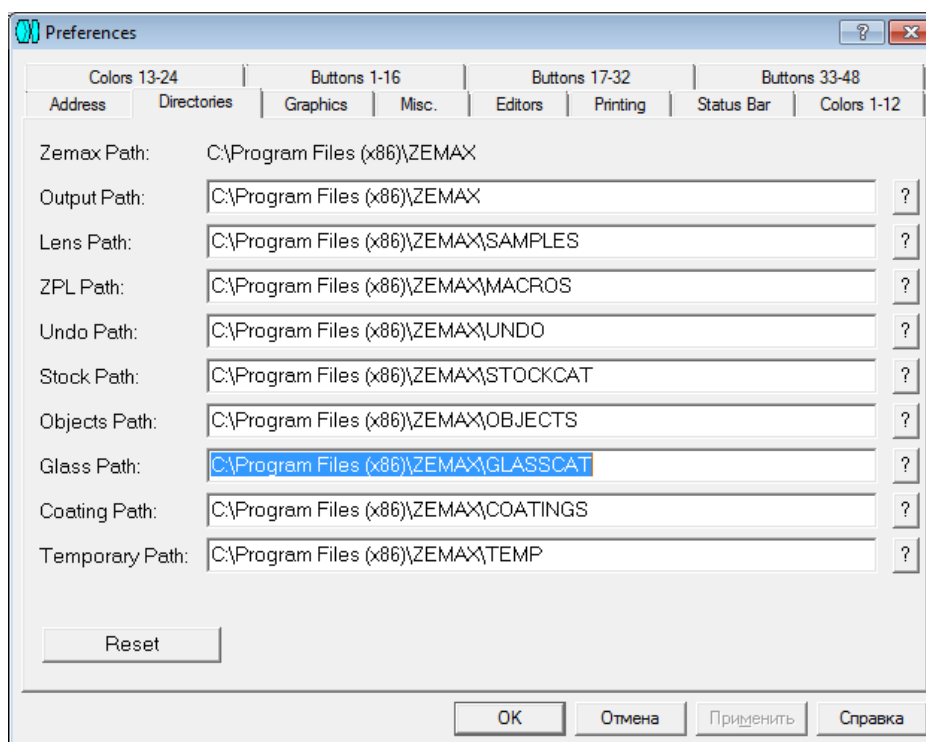


Рис. 2.2 – Размещение каталогов стекол

В директории «C:\Program Files\ZEMAX\GLASSCAT» размещены все каталоги стекол. Чтобы определить, какие каталоги используются в открытой для редактирования оптической системе, следует выбрать System → General → Glass Catalogs (рис. 2.3). Обычно по умолчанию используется каталог SCHOTT. При использовании нескольких каталогов их названия разделяются пробелами. Загрузить новый каталог (например, HOYA) можно с помощью кнопки Use This Catalog.

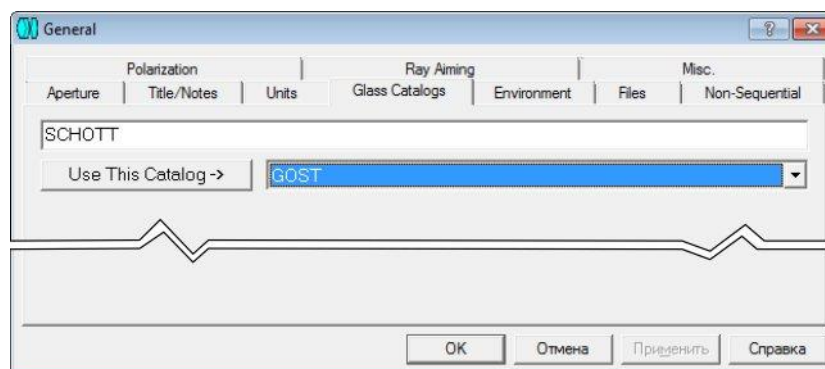


Рис. 2.3 – Выбор каталога стекла

Чтобы получить или редактировать информацию о каком-либо материале, а также создать новый материал, следует выбрать Tools → Catalogs → Glass Catalog. Появится диалоговое окно (рис. 2.4), в котором для каждого материала представлен показатель преломления  $n_d$  для длины волны  $d$  (587,6 нм), коэффициент дисперсии  $v_d$ . Показатель преломления для других длин волн рассчитывается по одной из дисперсионных формул (Зельмеера, Герцбергера, ...). Соответствующие коэффициенты разложения также приведены в этом диалоговом окне.

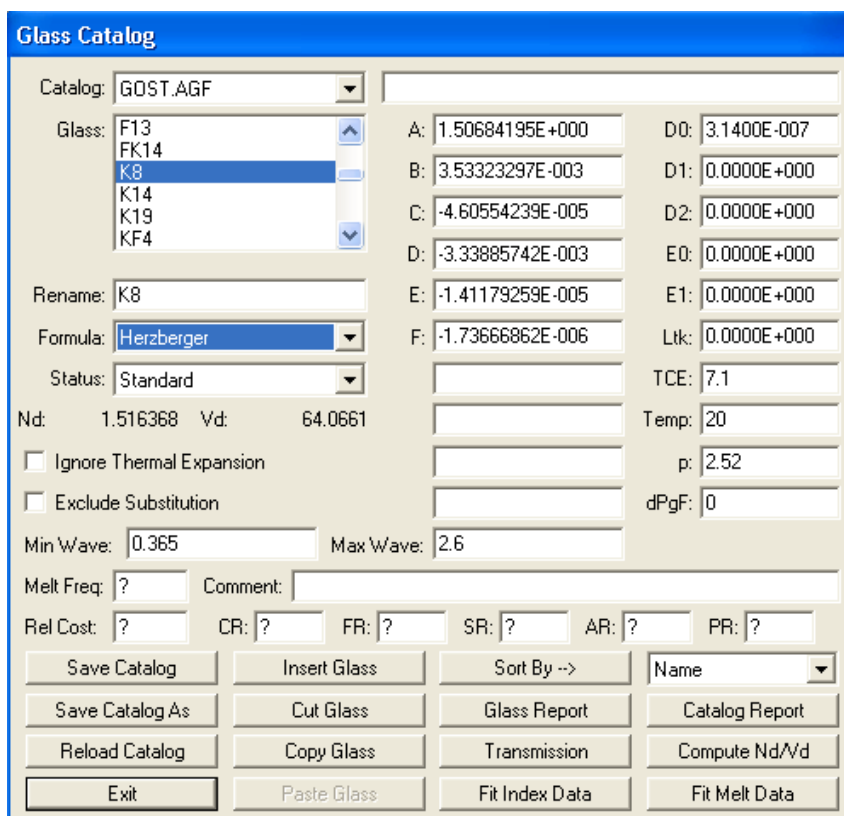


Рис. 2.4 – Редактирование данных о материалах

Следует помнить, что параметры  $n_d$  и  $v_d$  не всегда адекватно описывают свойства стекла из-за нелинейности зависимости показателя преломления от длины волны. Эти параметры актуальны лишь при работе в видимом диапазоне длин волн.

## 2.4. Редактирование апертурных характеристик. Функция «Ray Aiming»

При моделировании любой ОС необходимо указать ее апертурные характеристики. Сделать это можно разными способами в зависимости от типа ОС.

Апертура ОС указывается во вкладке System → General → Aperture. В строке Aperture Type выбирается, какой именно параметр будет указан, в строке Aperture Value указывается значение этого параметра.

На рис. 2.5 показаны все возможные способы задания апертуры ОС.

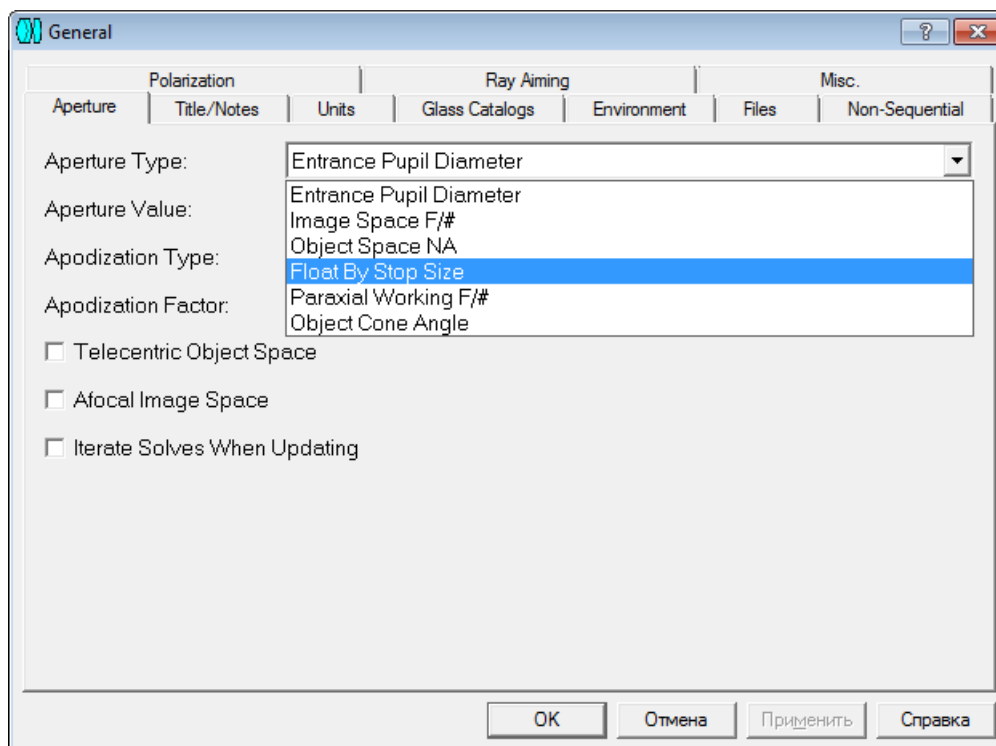


Рис. 2.5 – Способы задания апертуры ОС

- 1) Entrance Pupil Diameter – диаметра входного зрачка.
- 2) Image Space F/# - диафрагменное число (величина, обратная относительно отверстию).
- 3) Object Space NA – числовая апертура в пространстве предметов (произведения показателя преломления предметной среды на синус апертурного угла). Предмет должен находиться на конечном расстоянии.
- 4) Float by Stop Size. Этот тип апертуры можно использовать, если известен диаметр апертурной диафрагмы. В этом случае в столбце Semi-diameter редактора конструктивных параметров пользователь указывает полудиаметр апертурной диафрагмы, а световые высоты остальных поверхностей ОС рассчитываются автоматически.
- 5) Paraxial Working F/# – диафрагменное число, рассчитанное по формуле

$$W = 1/(n \cdot \text{tg}\sigma),$$

где  $n$  – показатель преломления среды в пространстве изображений,  $\sigma$  – задний апертурный угол, вычисленный в параксиальном приближении. Этот параметр совпадает с диафрагменным числом для ОС, работающих с бесконечно удаленным предметом, в пространстве изображений которых  $n = 1$ .

- 6) Object Cone Angle – передний апертурный угол. Предмет должен находиться на конечном расстоянии. Значение апертурного угла может превышать 90, однако, если входной зрачок ОС находится перед плоскостью предметов (т.е.  $-s < -s_p$ ), этот параметр не может быть использован.



**Важно.** Апертура системы задается **только** в окне General. Указания вручную световых высот всех поверхностей в колонке Semi-Diameter редактора конструктивных параметров не достаточно для того, чтобы задать апертуру ОС.

Положение апертурной диафрагмы указывается в редакторе конструктивных параметров. В крайнем левом столбце окна редактора указаны номера всех поверхностей ОС, напротив апертурной диафрагмы вместо номера пишется обозначение «СТО». Апертурной диафрагмой может являться как одна из оптических поверхностей ОС (отражающая или преломляющая), так и поверхность без оптической силы, специально заданная для размещения апертурной диафрагмы.

Чтобы установить апертурную диафрагму (Stop) на одной из поверхностей ОС, необходимо один раз щелкнуть правой кнопкой мыши (либо два раза левой кнопкой мыши) по ячейке в первом столбце Surf:Type, соответствующей этой поверхности, для вызова диалогового окна Surface Properties и во вкладке Type активировать позицию Make Surface Stop, как показано на рисунке 2.6.

Для сложных оптических систем, например, для широкоугольных объективов расчет положений входного и выходного зрачков представляет собой непростую задачу. Более того, положение зрачка может быть непостоянным по полю, поэтому могут быть неверно определены координаты лучей, входящих в ОС, так как главные лучи пучков направляется программой в центр входного зрачка, рассчитанного для точки на оси. Это может в худшем случае привести к невозможности трассирования лучей через ОС. Для корректной трассировки лучей необходимо включить функцию «прицеливания лучей» (System → General → Ray Aiming). В этом случае главные лучи направляются не в центр входного зрачка, а в центр апертурной диафрагмы. Время трассировки лучей в этом режиме увеличивается.

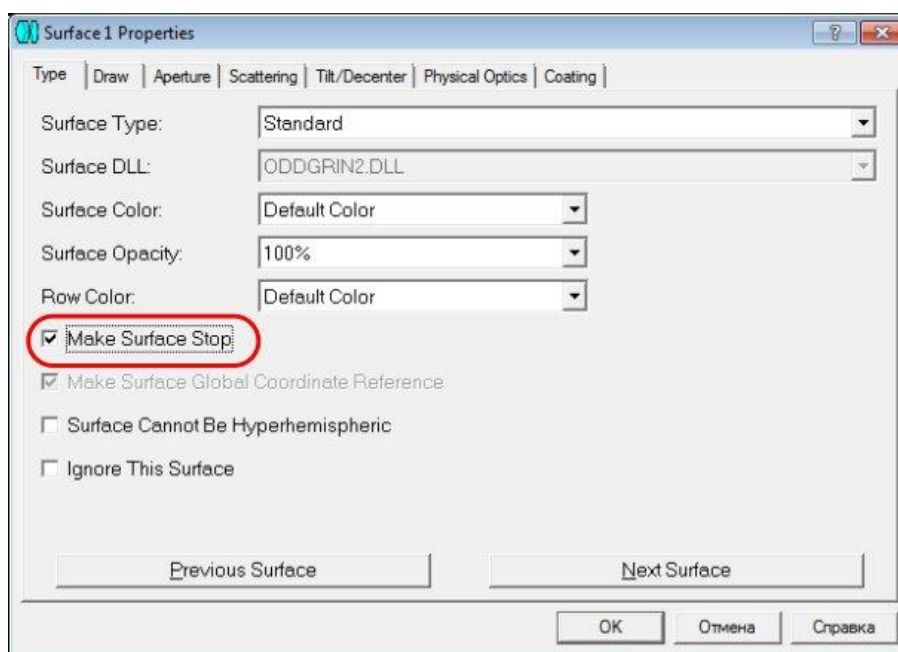


Рис. 2.6 – Установка апертурной диафрагмы

## 2.5. Редактирование спектральных характеристик

Значения длин волн (System → Wavelengths...) всегда указываются в микрометрах для воздуха. Их можно задавать как вручную, так и выбирать с помощью выпадающего меню и кнопки Select из набора наиболее используемых значений (рис. 2.7). В правом нижнем углу диалогового окна указывается основная длина волны (Primary). Также, около каждой длины волны можно установить весовой коэффициент (Weight), который будет учитываться при оптимизации ОС.

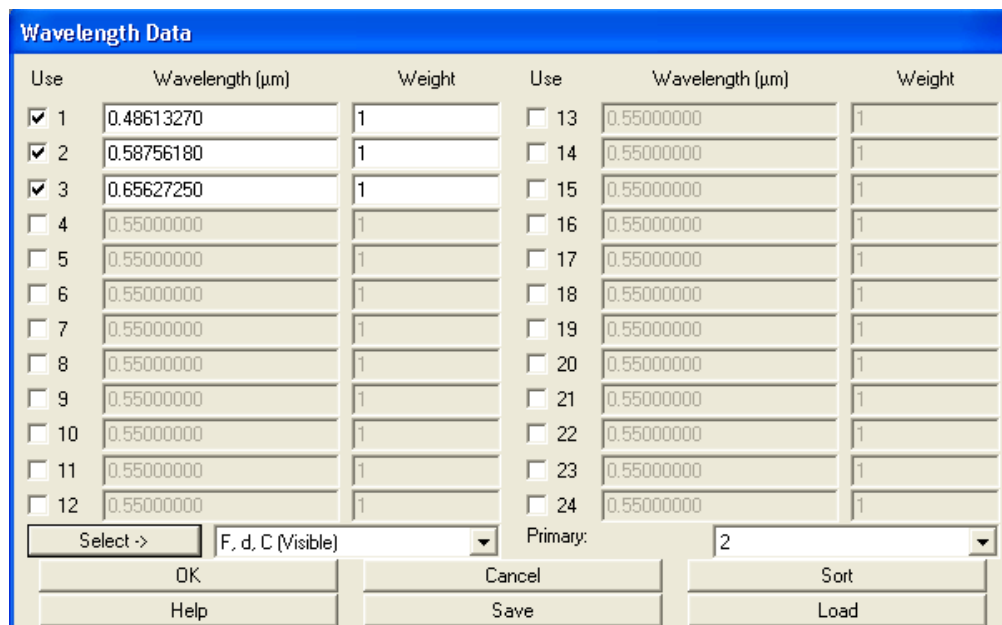


Рис. 2.7 – Установка длин волн

## 2.6. Редактирование полевых характеристик

Величина поля (System → Fields...) может быть определена в угловой мере или линейной (величина предмета), а также величинами параксиального и реального изображения. Значения углов в угловой мере всегда указываются в градусах, в линейной – в единицах, принятых для задания конструктивных параметров ОС (по умолчанию в миллиметрах).

Как было сказано выше, положительному значению поля в угловой мере соответствует отрицательное значение величины предмета. Величина поля задается двумя полевыми координатами: меридиональной (Y-Field) и сагиттальной (X-Field). На рисунке 2.8 задано 4 различных угловых поля ОС:

- 1) точка на оси,
- 2) поле в меридиональном сечении,
- 3) поле в сагиттальном сечении,
- 4) поле в косом сечении.

В правой части окна указываются весовые коэффициенты (столбец Weight), используемые при оптимизации ОС, и коэффициенты виньетирования, о которых будет сказано в следующем разделе.

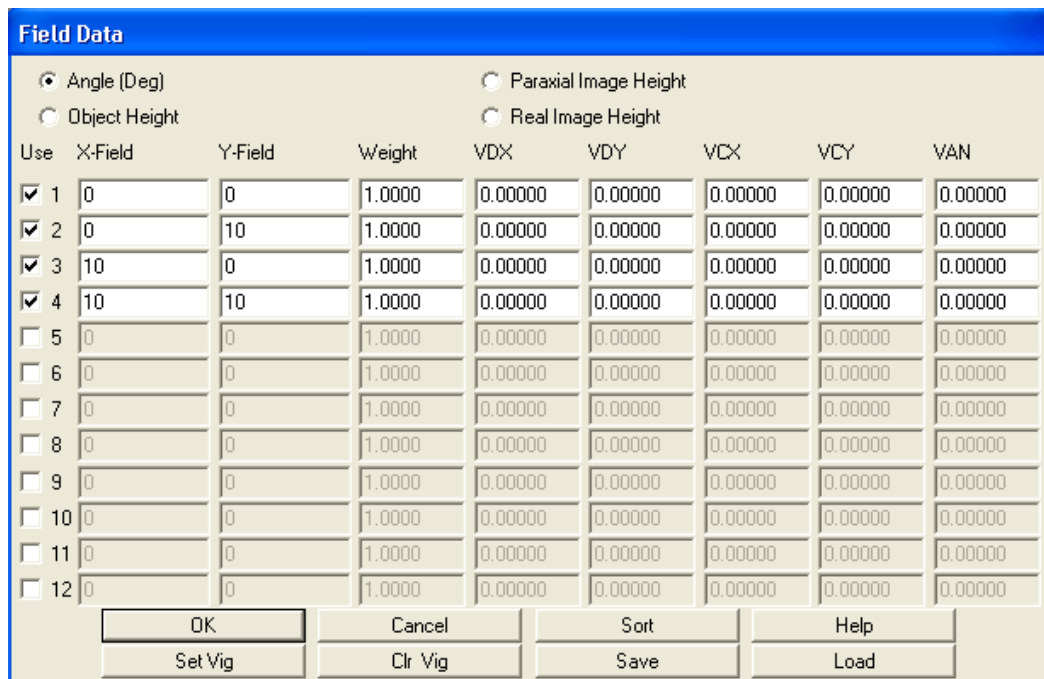


Рис. 2.8 – Установка величины поля

## 2.7. Относительные зрачковые и полевые координаты луча. Виньетирование

Для описания луча, входящего в ОС, необходимо и достаточно указать, в какой точке и под каким углом луч падает на входной зрачок. Этой цели служат зрачковые и полевые координаты, определяющие точку пересечения луча с плоскостью входного зрачка и величину наклона пучка, которому принадлежит луч.

В большинстве случаев при работе с программой ZEMAX используются относительные координаты в плоскости входного зрачка  $P_x$  и  $P_y$  и относительные полевые координаты  $H_x$  и  $H_y$ . Т.е. координаты, нормированные на полудиаметр входного зрачка и на максимальный (угловой или линейный) размер предмета соответственно. В совокупности они представляют собой набор координат, достаточный для описания любого луча, входящего в ОС:  $(H_x, H_y, P_x, P_y)$ .

Относительные координаты могут принимать значения в пределах:  $[-1, 1]$ , причем  $P_x^2 + P_y^2 \leq 1$  и  $H_x^2 + H_y^2 \leq 1$ . Например, точка пересечения крайнего верхнего луча осевого пучка в меридиональном сечении с плоскостью входного зрачка имеет координаты  $(0, 0, 0, 1)$ , а координаты главного луча меридионального сечения пучка, идущего из крайней предметной точки, равны  $(0, 1, 0, 0)$ .

Наличие виньетирования в ОС означает, что размеры входного зрачка наклонного пучка меньше размеров зрачка осевого пучка. В программе ZEMAX виньетирование задается с помощью 4-х коэффициентов:  $VCX, VCY, CDX, VDY$  – представляющих собой коэффициенты сжатия зрачка и величины его децентрировок в сагиттальном и меридиональном сечениях. Координаты точек в виньетированном и невиньетированном зрачках связаны соотношениями:

$$P_x' = VDX + (1-VCX) P_x \quad \text{и} \quad P_y' = VDY + (1-VCY) P_y.$$

Влияние этих величин на форму пучка иллюстрирует рисунок 2.9, на котором показано сечение крайнего пучка плоскостью апертурной диафрагмы. Символами  $O$ ,  $C$ ,  $K_1$ - $K_4$  показаны положения некоторых лучей, принадлежащих этому пучку. Символом  $O$  обозначен главный луч, идущий через центр апертурной диафрагмы,  $C$  – центральный луч пучка,  $K_1$ - $K_4$  – крайние лучи.

Длина отрезка  $OC$ , отнесенная к полудиаметру апертурной диафрагмы ( $D_{AD}$ ), равна модулю величины  $VDY$  (знак минус означает, что точка  $C$  находится ниже  $O$ ). Величины  $K_2K_4$  и  $K_1K_3$ , отнесенные к полудиаметру апертурной диафрагмы, равны соответственно величинам  $(1 - VCY)$  и  $(1 - VCX)$ .

В реальности форма виньетируемого зрачка не является эллиптической, как на рисунке 2.9; чаще всего она состоит из нескольких секторов. Однако ZEMAX при расчетах использует именно такое эллиптическое приближение зрачка.

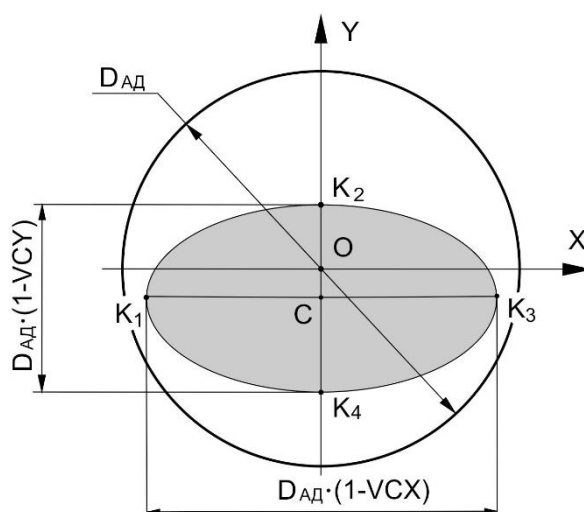


Рис. 2.9– Сечение крайнего пучка плоскостью апертурной диафрагмы

Существуют два варианта задания виньетирования в моделируемой ОС. Во-первых, можно вручную указать коэффициенты виньетирования в окне редактора полевых характеристик. В этом случае световые диаметры всех поверхностей в системе будут посчитаны автоматически в соответствии с заданными коэффициентами (кроме диаметров, заданных пользователем вручную).

Во-вторых, можно вручную задать световые диаметры некоторых поверхностей ОС. И если это приведет к виньетированию внеосевых пучков, то коэффициенты виньетирования будут рассчитаны при нажатии кнопки “Set Vig” в окне редактора полевых характеристик (см. рисунок 2.8). Может произойти ситуация, когда на одной из поверхностей, диаметр которой задан вручную, произойдет диафрагмирование осевого пучка, т.е. фактически поверхность станет апертурной диафрагмой. Однако, если символом «STO» помечена другая поверхность, то программа формально будет считать ее апертурной диафрагмой, а в осевом пучке тоже будет присутствовать виньетирование.

## 2.8. Пример №1. Моделирование двухлинзового склеенного объектива

Данный пример рассмотрен для практического ознакомления с принципами моделирования ОС в ZEMAX.

Смоделируем в программе ZEMAX двухлинзовый склеенный компонент, изображенный на рис. 2.10, конструктивные параметры которой указаны в таблице 1. Диаметр входного зрачка 20 мм, апертурная диафрагма установлена на первой поверхности. Угловое поле оптической системы  $2\omega = 1^\circ$ , спектральный диапазон – видимый (длины волн:  $\lambda_1 = 0.48613$  мкм,  $\lambda_2 = 0.58756$  мкм,  $\lambda_3 = 0.65627$  мкм). Основная длина волны 0.58756 мкм.

Модель аналогичного объектива присутствует среди примеров ОС ZEMAX (файл “doublet.zmx” в директории “ZEMAX\Samples\Sequential\Objectives”).

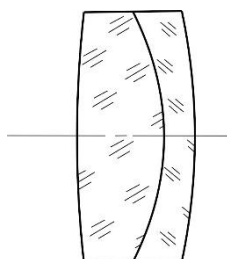


Рисунок 2.10 – Двухлинзовый склеенный объектив

Таблица 1 – Конструктивные параметры двухлинзового объектива

Радиусы, мм	Толщина, мм	Марка стекла (каталог Schott)
92.847	6.0	BK7
-30.716		
-78.197	3.0	F2

Шаг 1. Для начала в пункте меню File выберем команду New, чтобы создать новую оптическую систему. В главном меню программы появится окно редактора конструктивных параметров, которое после введения конструктивных параметров должно выглядеть, как на рис. 2.11.

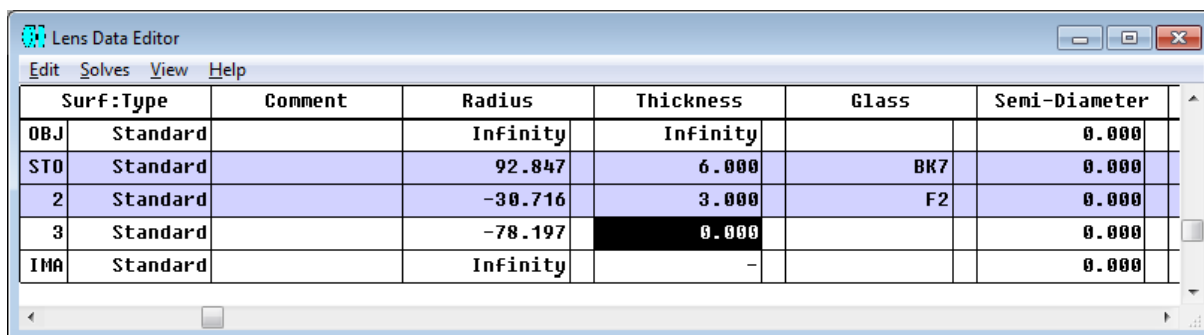


Рисунок 2.11 – Окно редактора конструктивных параметров

В данном примере использованы марки стекол из каталога фирмы Shcott, который по умолчанию является рабочим каталогом в ZEMAX. Убедиться в том, что и в данном случае именно он используется программой, можно зайдя в диалоговое окно System → General и открыв вкладку “Glass Catalog”.

Шаг 2. Как видно из рисунка 2.11, световые высоты поверхностей равны нулю, потому что не задана апертура ОС. Вызовем окно General (из меню System или нажатием кнопки “Gen” на панели инструментов) и во вкладке “Aperture” укажем диаметр входного зрачка равным 20 мм (как показано на рисунке 2.12). После этого автоматически рассчитываются световые высоты поверхностей ОС.

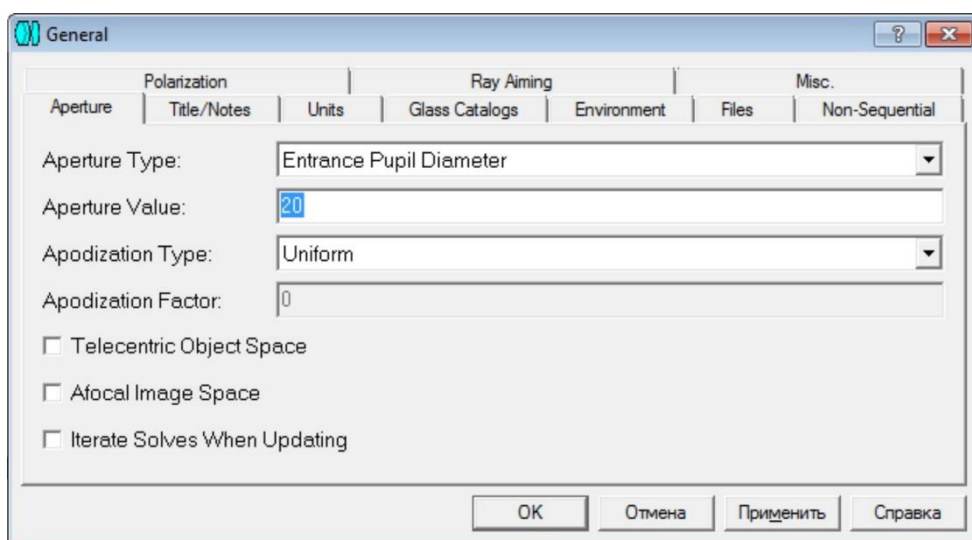


Рисунок 2.12 – Задание диаметра входного зрачка

Шаг 3. Зададим полевые характеристики ОС в окне “Field Data” (в разделе меню System). Укажем два поля: точку на оси и меридиональное поле  $\omega = 0.5^\circ$  (рисунок 2.13).

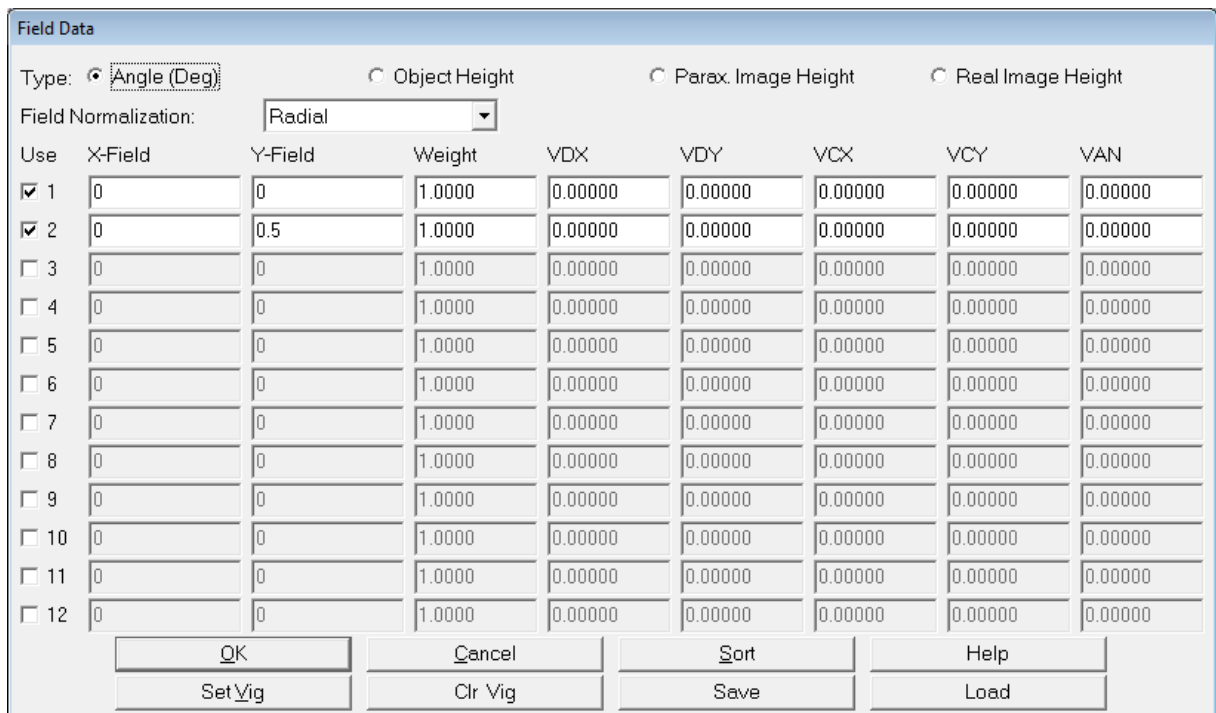


Рисунок 2.13 – Полевые характеристики ОС

**Шаг 4.** Совместим теперь поверхность изображения с плоскостью Гаусса. Двойным кликом по ячейке с осевым расстоянием в третьей строке вызывается диалоговое окно Thickness solve on surface 3, в выпадающем меню Solve Type следует выбрать Marginal Ray Height и установить равными нулю все присутствующие параметры (рис. 2.14).

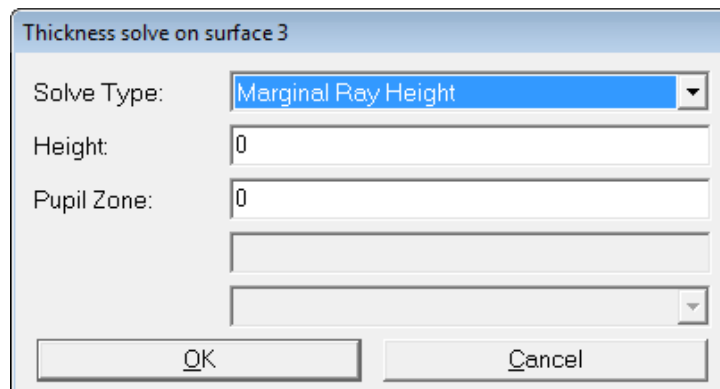


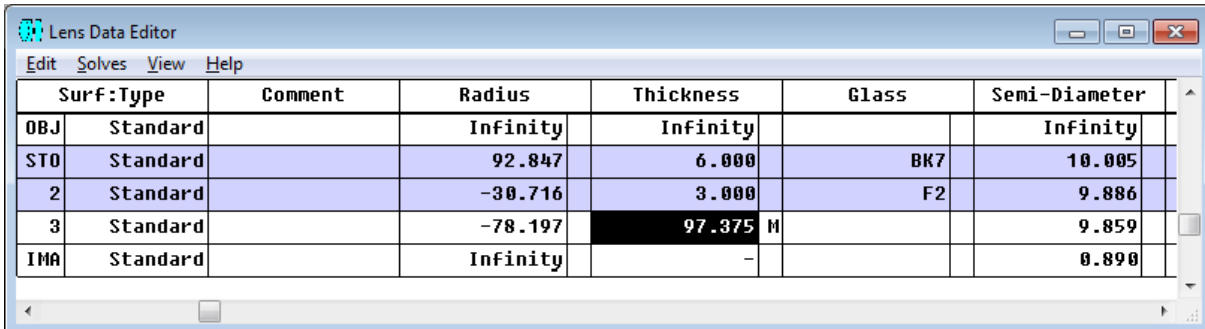
Рисунок 2.14 – Установка плоскости Гаусса

**Пояснение.** Плоскость Гаусса проходит через точку пересечения оптической оси и параксиального луча, идущего из осевой точки предмета. Позиция Height позволяет установить высоту крайнего луча над оптической осью. Высота крайнего луча измеряется в плоскости, касательной к вершине поверхности. Значение высоты, равное 0, соответствует точке пересечения луча с оптической осью. Позиция Pupil Zone позволяет выбрать координату крайнего луча на входном зрачке. Значение 0 соответствует параксиальному лучу. Реальному лучу соответствует

любое значение координаты от -1 до 1 для нормированного входного зрачка. С помощью высоты крайнего луча можно задавать осевые расстояния не только между последней поверхностью ОС и поверхностью изображения, но и между любыми последовательно расположенными поверхностями внутри ОС. Например, выбрав значение Height = 0, а Pupil Zone = 0,7, получим изображение в плоскости, где для зоны зрачка с координатой 0,7 поперечная aberrация равна нулю (плоскость наилучшего изображения).

После этого окно редактора конструктивных параметров должно выглядеть, как на рисунке 2.15.

Методы анализа ОС (определения ее парааксиальных характеристик, абберационного анализа и пр.) подробно рассмотрены в разделе 2.



The screenshot shows the 'Lens Data Editor' window with a table of lens parameters. The table has columns for Surf, Type, Comment, Radius, Thickness, Glass, and Semi-Diameter. The rows represent different surfaces of the lens system.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard		92.847	6.000	BK7	10.005
2	Standard		-30.716	3.000	F2	9.886
3	Standard		-78.197	97.375	M	9.859
IMA	Standard		Infinity	-		0.890

Рисунок 2.15 – Окно редактора конструктивных параметров

## 2.9. Пример №2. «Моделирование ОС широкоугольного фотообъектива»

В данном примере рассмотрены особенности моделирования широкоугольных систем, методы задания виньетирования.

Смоделируем в программе ZEMAX фотографический объектив, конструктивные параметры которого представлены в таблице 2.

Апертурная диафрагма расположена между 4<sup>й</sup> и 5<sup>й</sup> поверхностями на расстоянии 1,655 мм от 4<sup>й</sup> поверхности. Относительное отверстие ОС 1:2,8. Угловое поле  $2\omega = 76^\circ$ . Спектральный диапазон – видимый (линии F, d, C).



Таблица 2 – Конструктивные параметры фотообъектива

Радиусы, мм	Осевые расстояния, мм	Марки стекол (каталог HOYA)
12,66	0,7	LACL7
5,25	5,76	
8,25	0,94	BAFD5
-16,96	3,01	
-5,63	1,12	FDS3
22,73	0.26	
-20,98	0.73	TAF5
-6,47	0,4	
-174,82	0,87	TAC4
-8,39		

Шаг 1. Создадим новую ОС; заполним редактор конструктивных параметров. При моделировании этой ОС апертурная диафрагма задается в виде отдельной плоской оптической поверхности, расположенной в воздухе (см. рис. 2.17а). При указании материалов должно появиться сообщение: "Glass LACL7 could not be found in the current catalog. However, it was found in the HOYA catalog. Do you want to add this catalog to this lens?" («Стекло LACL7 не найдено в текущем каталоге. Однако оно найдено в каталоге HOYA. Подключить его к моделируемой ОС?») Следует согласиться, нажав «Да».

Для задания относительного отверстия 1:2.8 необходимо в окне General во вкладке Aperture выбрать тип апертуры Image Space F/# и указать значение 2.8. Задний отрезок определим аналогично тому, как сделано в предыдущем примере (с помощью Thickness solve).

Зададим три угловых поля: точку на оси, 25° и 38° (в меридиональном сечении).

Включим режим Ray Aiming.

При столь существенном угловом поле и относительном отверстии краевая толщина 4-й линзы получается отрицательная, что очень нефизично. Это иллюстрирует рисунок 2.16, полученный при нажатии на кнопку "L2D" на панели инструментов (или в меню Analysis → Layout → 2D Layout). Избежать этого можно, вручную уменьшив световой диаметр этой линзы.

Шаг 2. Зададим вручную диаметры 8-й и 9-й поверхностей равными 4.2 мм в соответствии с рисунке 2.17а.

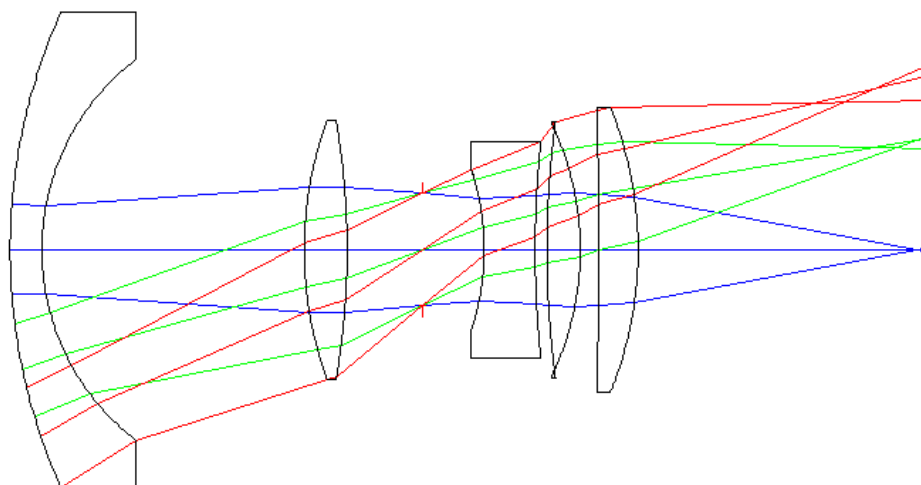


Рисунок 2.16 – Оптическая схема объектива

Surf:Type		Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	Infinity
1	Standard	12.660	0.700	LACL7	5.210	5.210
2	Standard	5.250	5.760		4.169	4.169
3	Standard	8.250	0.940	BAFD5	2.850	2.850
4	Standard	-16.960	1.655		2.783	2.783
ST0	Standard	Infinity	1.355		1.231	1.231
6	Standard	-5.630	1.120	FDS3	1.752	1.466
7	Standard	22.730	0.260		2.383	1.847
8*	Standard	20.980	0.730	TAF5	2.100 U	2.100 U
9*	Standard	-6.470	0.400		2.100 U	2.100 U
10	Standard	-174.820	0.870	TAC4	3.070	2.405
11	Standard	-8.390	6.463 M		3.123	2.521
IMA	Standard	Infinity	-		4.085	4.085

a

б

Рисунок 2.17 – Редактор конструктивных параметров до введения виньетирования (а); световые высоты на поверхностях после введения виньетирования (б)

Шаг 3. Ограничение световых диаметров приведет к уменьшению диаметров наклонных пучков – к виньетированию. Определим коэффициенты виньетирования наклонных пучков для разных угловых полей. Для этого в диалоговом окне “Fields” следует нажать кнопку «Set Vig» (рисунок 2.18). После этого произойдет автоматический пересчет световых диаметров всех остальных поверхностей, что станет заметно в редакторе конструктивных параметров (рисунок 1.18, б).

Field Data

Type:  Angle (Deg)     Object Height     Parax. Image Height     Real Image Height

Field Normalization: Radial

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> 2	0	25	1.0000	0.00000	-0.03565	0.00012	0.03565	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> 3	0	38	1.0000	0.00000	-0.33957	0.04729	0.33960	0.00000
<input type="checkbox"/> 4	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 11	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 12	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Рисунок 2.18 – Расчет коэффициентов виньетирования

Из рисунка 2.18 видно, что для края поля размер входного зрачка составляет  $1 - 0,3396 = 0,6604$  от диаметра зрачка для осевого пучка. Коэффициенты виньетирования в меридиональном (VCY) и сагиттальном (VCX) сечениях отличаются друг от друга, что говорит о несимметричности входного зрачка для этого пучка, а неравенство нулю коэффициента VDY – о смещении центра пучка относительно главного луча.

После задания виньетирования вид оптической системы изменится, как показано на рисунке 2.19. Очевидно, что качество изображения оставляет желать лучшего, однако об оценке качества будет сказано подробно в разделе 2.

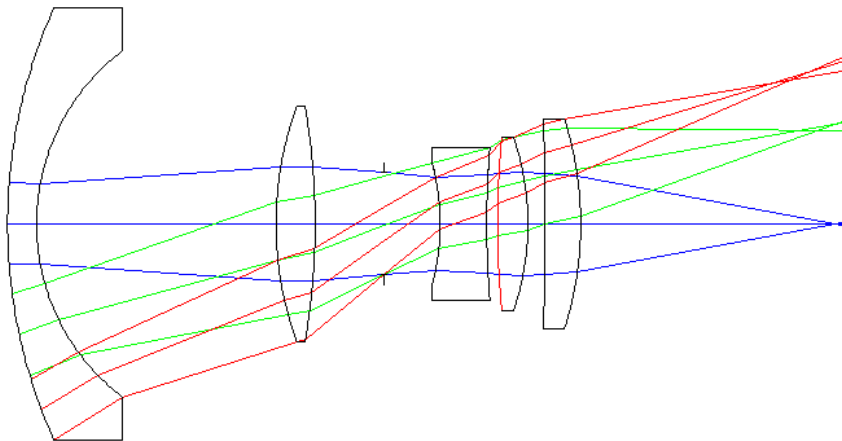


Рисунок 2.19– Оптическая схема объектива с виньетированием

### 3. Анализ ОС

#### 3.1. Определение основных характеристик ОС

Наиболее полно основные характеристики ОС представлены в разделе меню Reports → Prescription Data. Здесь можно видеть:

- сколько поверхностей содержит ОС,

- на какой поверхности расположена апертурная диафрагма, значения передней и задней апертур,
- где находятся входной и выходной зрачки ОС, каковы их диаметры,
- спектральный диапазон работы ОС, основную длину волны,
- фокусное расстояние, задний отрезок,
- поля зрения и коэффициенты виньетирования,
- конструктивные параметры ОС, в том числе – положение предмета и изображения, показатели преломления материалов на всех заданных длинах волн,
- кардинальные элементы ОС
- и множество других сведений.

Напомним, что положение зрачков и кардинальных элементов вычисляется в ZEMAX иначе, чем принято в России (см. раздел 1.2 «Правила знаков, обозначения и определения»).

### 3.2. Результаты трассировка луча через ОС

Результаты трассировки любого луча через ОС отображаются с помощью функции Ray Trace (Analysis→Calculations→Ray Trace или Ctrl+Y). В текстовом окне в таблицах приводятся координаты луча на каждой поверхности и углы, которые луч имеет после взаимодействия с каждой поверхностью. Могут отображаться тангенсы апертурных углов, либо направляющие косинусы. Координаты могут задаваться как в локальной СК, связанной с вершиной каждой поверхности, так и в глобальной.

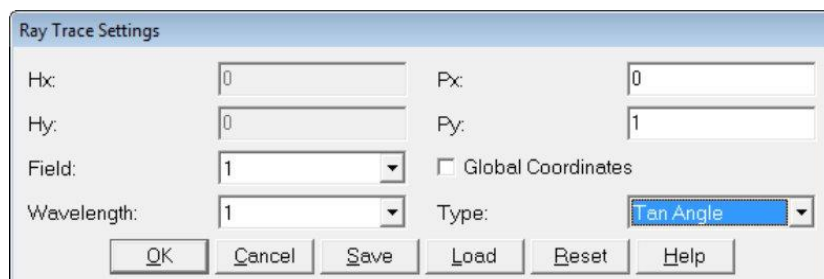
Значения координат лучей на поверхности могут быть использованы для вычисления aberrаций, однако для этого существуют другие – более простые – способы (см. следующий раздел). Вычисление же углов, необходимое, например, для составления оптического выпуска, доступно лишь с помощью функции Ray Trace. Напомним, что в таблицах оптического выпуска со значениями aberrаций помимо координат лучей во входном зрачке указываются значения тангенсов задних апертурных углов. Для их определения в настройках окна “Ray Tracing” следует:

- а) в строке “Type” указать “Tan Angle”,
- б) выбрать угловое поле из списка или вручную задать полевые координаты  $N_x$  и  $N_y$ ,
- в) указать относительные координаты луча на входном зрачке.

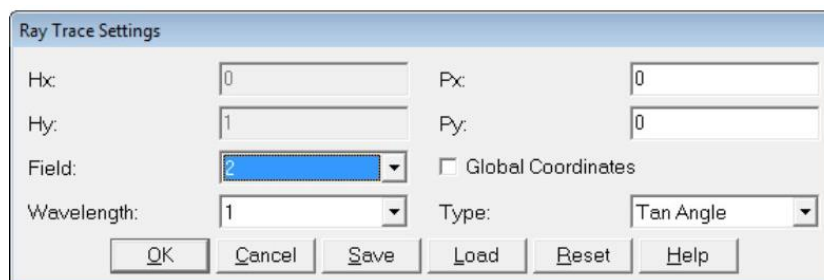
На рисунке 3.1а показан пример того, как должно выглядеть окно настроек, если необходимо рассчитать тангенс заднего апертурного угла крайнего луча осевого пучка; на рисунке 3.1б – главного луча наклонного пучка.

На рисунке 3.2 показано текстовое окно “Ray Tracing”, в котором представлены результаты расчета луча через оптическую систему. Значения координат луча на поверхностях ОС представлены в двух таблицах: “Real Ray Trace Data” и “Paraxial Ray Trace Data” (“Результаты трассировки реального луча” и “Результаты трассировки нулевого луча”). Напомним, что

параксиальные лучи распространяются бесконечно близко к оптической оси, на бесконечно малых высотах. А фиктивный луч, подчиняющийся законам параксиальной оптики, но распространяющийся на реальных высотах, в отечественной литературе называют нулевым лучом.



а



б

Рисунок 3.1 – настройки отображения результатов трассировки крайнего луча осевого пучка (а) и главного луча наклонного пучка (б)

Таким образом, результаты расчета реального луча, идущего через ОС, представлены в верхней таблице под заголовком "Real Ray Trace Data". Значение тангенса заднего апертурного  $\sigma'$  угла на рисунке 3.2 обведено красным. Напомним, что правила знаков для углов отличаются от принятых в России, все углы (и соответствующие им тангенсы) следует брать с противоположным знаком. Таким образом,  $\text{tg } \sigma' = -0.0844$ .

### 3.3. Анализ aberrаций ОС

Существуют несколько критериев качества ОС. Одним из них являются величины aberrаций – геометрических или волновых. Рассмотрим ниже, как определить по результатам расчета ОС в программе ZEMAX значения сферической aberrации (продольной и поперечной), aberrации широких наклонных пучков (в частности, меридиональной комы), aberrаций главных лучей (кривизны поля, астигматизма, дисторсии), хроматических aberrации (хроматизма положения, сферохроматизма и хроматизма увеличения), а также волновых aberrаций.

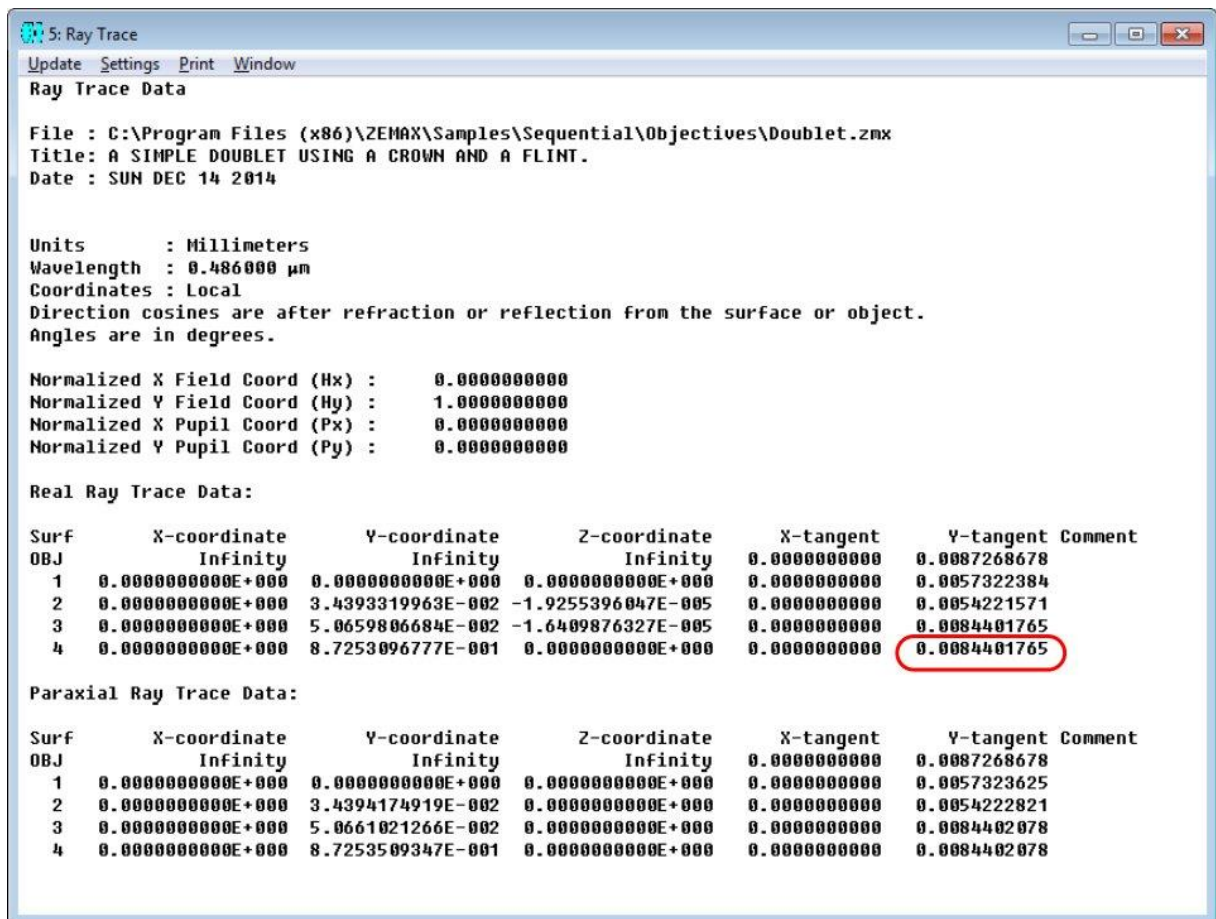


Рисунок 3.2 – Результаты трассировки луча через ОС

В качестве примеров здесь будут приведены графики aberrаций двухлинзового склеенного объектива, моделирование которого мы рассматривали в примере №1 (в разделе 2.8). Модель этого же объектива также присутствует среди примеров ОС ZEMAX (файл “doublet.zmx” в директории “ZEMAX\Samples\Sequential\Objectives”).

Важно помнить, что в большинстве случаев ZEMAX представляет значения aberrаций широких пучков в зависимости от *относительных* координат зрачка, тогда как при составлении оптического выпуска рекомендуется выражать координаты в плоскости зрачка в абсолютной мере (чаще всего, в миллиметрах). Поэтому, например, при составлении оптического выпуска для определения координат  $m$  в миллиметрах необходимо относительные координаты невиньетированного зрачка  $PU$  умножить на половину диаметра входного зрачка (он ОС указан, например, в Reports – Prescription Data).

### 3.3.1. Поперечные aberrации широких пучков

В пункте меню Analysis → Fans → Ray Aberration (или при нажатии на кнопку “Ray”) вызывается графическое окно, содержащее информацию о поперечных aberrациях широких пучков для всех угловых полей ОС. Так, например, на рисунке 3.3 показаны графики aberrаций ОС, для которой заданы два поля: точка на оси (0.0°) и поле в меридиональном сечении (0.5°). Для каждого из полей приведено по 2 графика, соответствующих меридиональному и сагиттальному сечениям. Величины

аббераций откладываются по осям EY для меридионального сечения и EX для сагиттального. Вдоль осей PY и PX откладываются относительные координаты на входном зрачке.

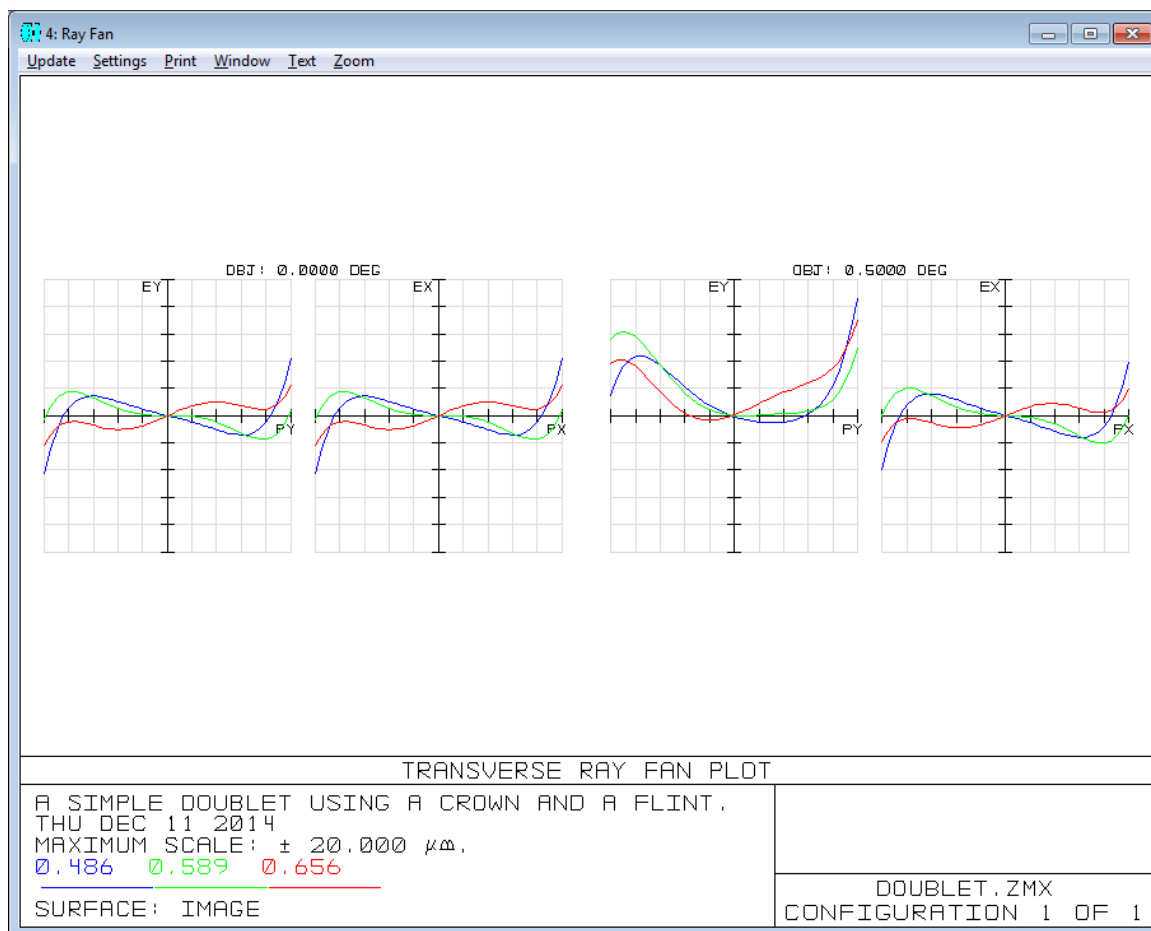
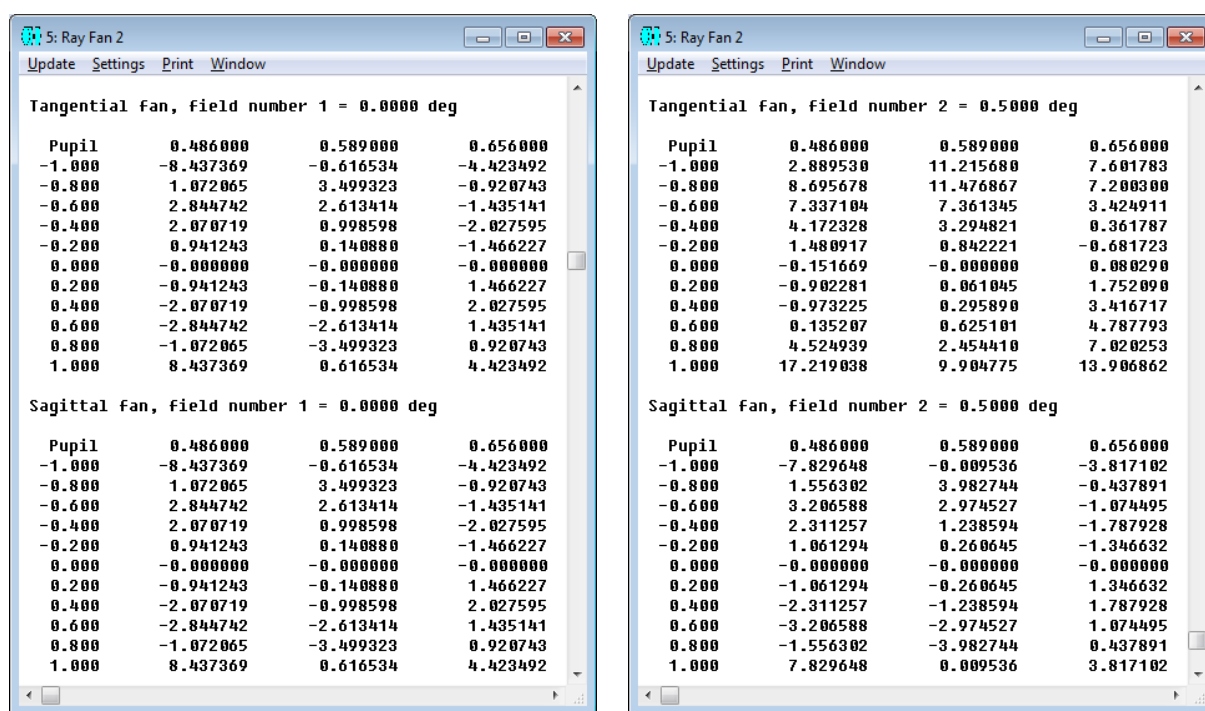


Рисунок 3.3 – Графики поперечных aberrаций широких пучков

Аберрация меридионального осевого пучка носит название сферической aberrации. Таким образом, на рисунке 3.3 крайний левый график – график **поперечной сферической aberrации**. Для центрированных ОС он симметричен относительно начала координат. Несимметричностью могут обладать лишь графики aberrаций наклонных пучков. Нарушение симметрии свидетельствует о наличии aberrации кома. Таким образом, **меридиональную кому** можно определить на рисунке 3.3 из третьего слева графика. Не верно, однако, называть этот график «графиком комы»; кому не в чистом виде присутствует на графике. Для графического определения комы, например, на краю зрачка следует соединить отрезком прямой крайние точки графика; меридиональная кома равна координате точки пересечения этого отрезка с осью EY.

Внизу окна под графиками в строке “MAXIMUM SCALE” указано число, соответствующее максимальному и минимальному значениям, отложенным вдоль осей aberrаций. В данном примере графики aberrаций приведены в пределах от -20 мкм до 20 мкм. В настройках этого окна (Settings) можно указать, для каких полей и длин волн отображать графики aberrаций, по скольким

точкам интерполировать графики, какую составляющую ( $\Delta y$  или  $\Delta x$ ) абберации выводить для того или иного сечения, на какой поверхности ОС анализировать абберации (по умолчанию – на поверхности изображения) и др. Для получения точных численных значений аббераций следует в меню графического окна нажать кнопку "Text". Появится текстовое окно, подобное показанному на рисунке 3.4, в котором в текстовом виде приведены значения аббераций в соответствии с настройками (т.е. для указанных полей зрения, длин волн и т.д.).



а

б

Рисунок 3.4 – Таблицы значения аббераций осевого (а) и наклонного (б) пучков

На рисунке 3.4а представлены значения аббераций  $\Delta y$  для точки на оси (field number 1 = 0.0°) для меридионального и сагиттального сечений. В первом столбце под словом Pupil приведены относительные зрачковые координаты, в остальных столбцах – величины аббераций. Длины волн, для которых эти абберации вычислены, приведены над соответствующим столбцом (в той же строке, что и слово Pupil). На рисунке 2.4б показаны значений поперечных аббераций широкого наклонного пучка.

По данным, приведенным на рисунке 3.4а определим, что значение сферической абберации на краю зрачка (при Pupil = 1) для основной длины волны (0.589 мкм) составляет 0.617 мкм. По рисунку 2.4б определим значения поперечных аббераций для основной длины волны для верхнего и нижнего краев зрачка:  $\Delta y'_в = 9.905$  мкм,  $\Delta y'_н = 11.216$  мкм. Меридиональная кома вычисляется как  $0.5 (\Delta y'_в + \Delta y'_н) = 10.561$  мкм.



### 3.3.2. Продольные aberrации широкого осевого пучка

График продольных aberrаций можно вызвать из пункта меню Analysis → Miscellaneous → Longitudinal Aberration. Пример его представлен на рисунке 2.5. Здесь изображены 3 кривые, соответствующие **продольным сферическим aberrациям** для трех длин волн. Продольные aberrации рассчитываются только для осевого пучка лучей, даже если таковой отсутствует среди заданных пользователем угловых полей. Вдоль оси абсцисс откладываются значения aberrаций, вдоль оси ординат – относительные зрачковые координаты.

Кривая aberrации для основной длины исходит из начала координат, т.к. анализ aberrаций проводится в плоскости Гаусса. Если анализировать aberrации в смещенной плоскости, то нижняя точка кривой aberrаций для главной длины волны будет смещена относительно начала координат на величину, равную смещению плоскости анализа изображения относительно плоскости Гаусса. Две другие кривые исходят из точек, не совпадающих друг с другом, что свидетельствует о наличии **хроматизма положения**. Эта aberrация определяется для параксиальной области. Несовпадение значений продольных сферических aberrаций для крайних длин волн вне параксиальной зоны (на зоне или на краю зрачка) свидетельствует о наличии **сферохроматизма**. По рисунку 3.5 видно, что кривые для крайних длин волн пересекаются на зоне зрачка, равной приблизительно 0,87 (напомним, что координаты зрачка здесь фигурируют в относительных единицах), что свидетельствует о равенстве нулю сферохроматизма на этой зоне зрачка. Значения продольных сферических aberrаций можно получить, нажав на кнопку "Text" в меню графического окна. Появится текстовое окно, подобное изображенному на рисунке 3.6.

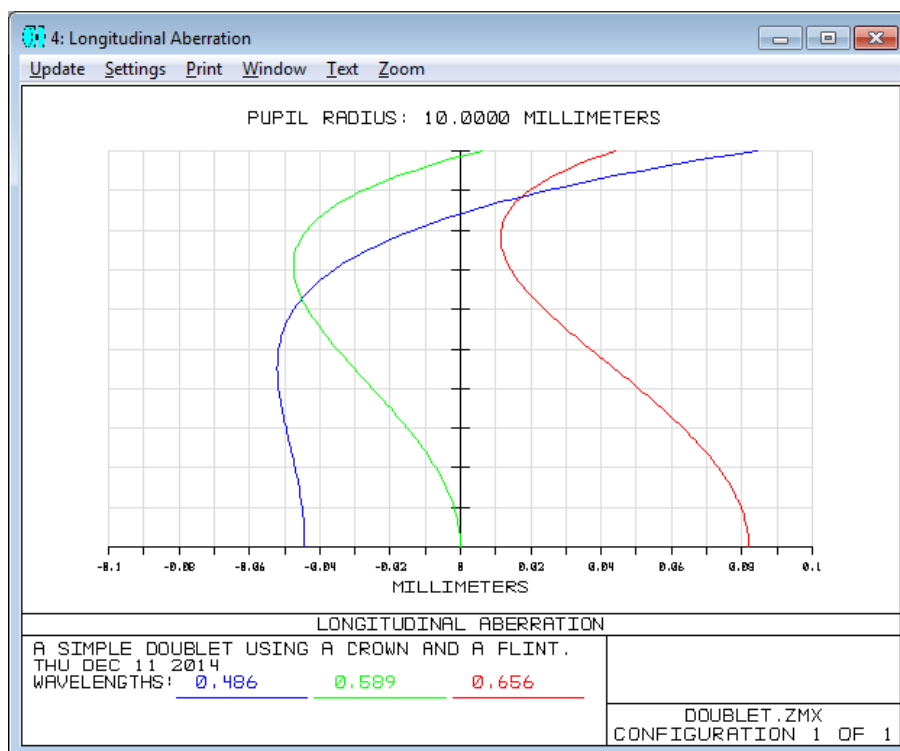


Рисунок 3.5 – Графики продольных aberrаций

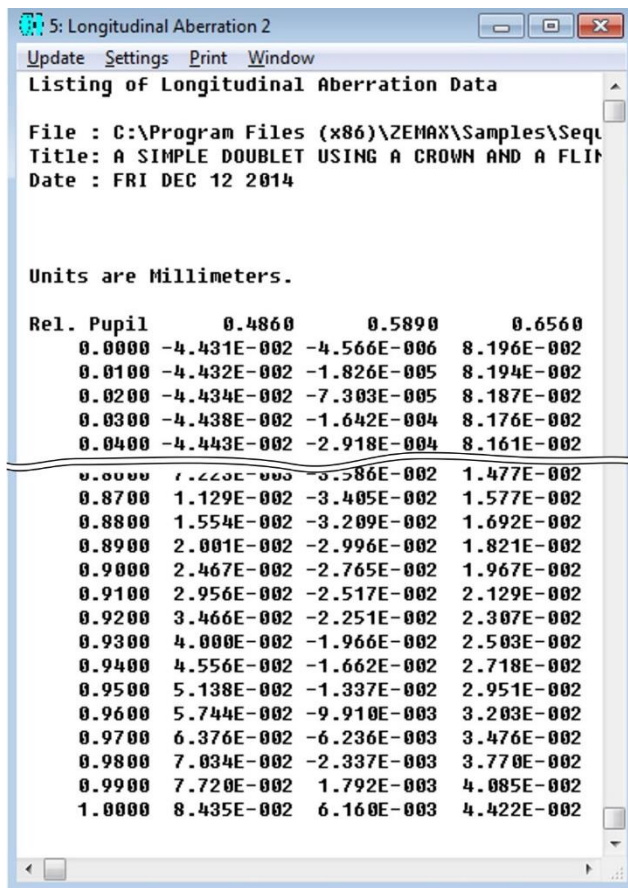


Рисунок 3.6 – Текстовое окно со значениями продольных aberrаций

По значениям из рисунка 3.6 определим, что:

- продольная сферическая aberrация для основной длины волны на краю зрачка практически исправлена и составляет 6.16 мкм;
- хроматизм положения равен  $\Delta s'_{\lambda_1\lambda_2} = \Delta s'_{\lambda_1} - \Delta s'_{\lambda_2} = -0.044 \text{ мм} - 0.082 \text{ мм} = -0.126 \text{ мм}$ ;
- сферохроматизм на краю зрачка составляет  $0.084 \text{ мм} - 0.044 \text{ мм} = 0.04 \text{ мм}$ .

### 3.3.3. Aberrации главных лучей

К aberrациям главных лучей (точнее, к aberrациям узких наклонных пучков) относятся: астигматизм, кривизна поверхности изображения и дисторсия. Значения их можно определить, зайдя в меню Analysis → Miscellaneous → Field Curv/Distortion. Появится окно, подобное тому, что на рисунке 3.7. Здесь для наглядности приведены aberrации лишь для основной длины волны. С помощью настроек окна можно выбирать интересующие длины волн или отобразить aberrации для всех длин волн.

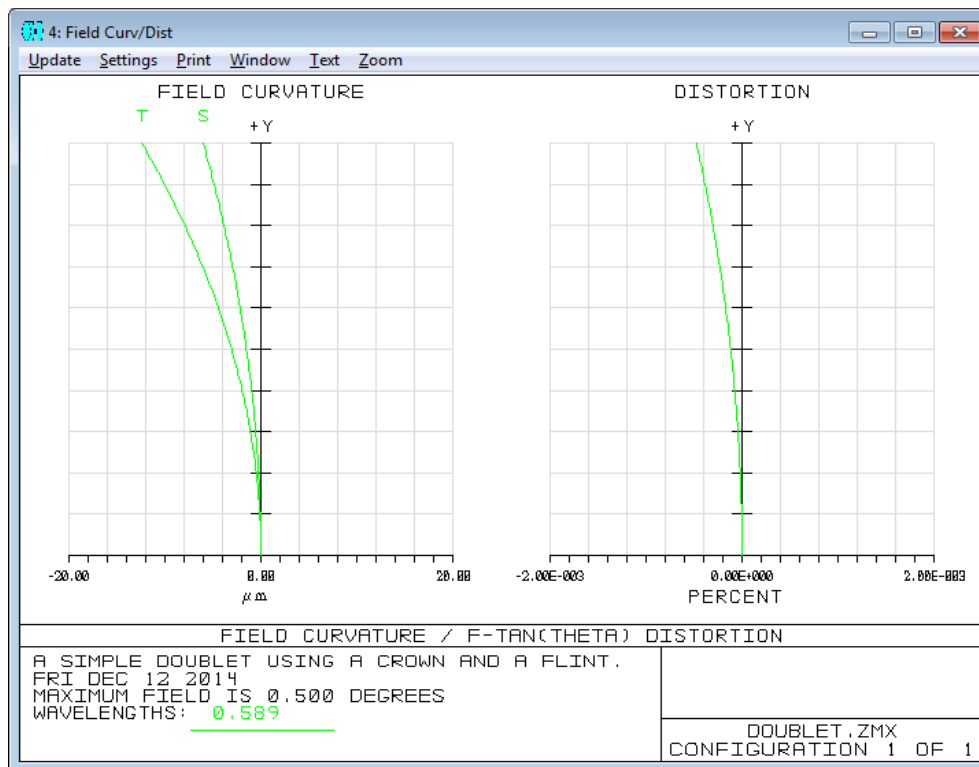


Рисунок 3.7 – Графики aberrаций главных лучей

На левом графике представлены зависимости астигматических отрезков от поля зрения ОС. Отрезок обозначен  $z'_s$  обозначен символом S, а  $z'_m$  – символом T. Разность между  $z'_s$  и  $z'_m$  называется **астигматизмом**, а среднее значение равно **кривизне поверхности изображения**. На графике справа отображена **дисторсия**. На обоих графиках вдоль оси абсцисс откладываются значения aberrаций, вдоль оси ординат – поля (в абсолютном измерении – в градусах, миллиметрах, ...).

Текстовые значения aberrаций представлены на рисунке 3.8. Здесь в первом столбце слева приведены значения поля (в данном случае углового, в градусах), в следующих двух столбцах – значения астигматических отрезков, в столбце Real Height приведены высоты главного луча в плоскости изображения, в столбце Ref. Height – высоты второго вспомогательного луча; различие между этими высотами, называемое дисторсией, выраженное в процентах – в столбце Distortion.

**Примечание.** В данном текстовом окне значения высот приводятся без учета знака, т.е. по модулю!

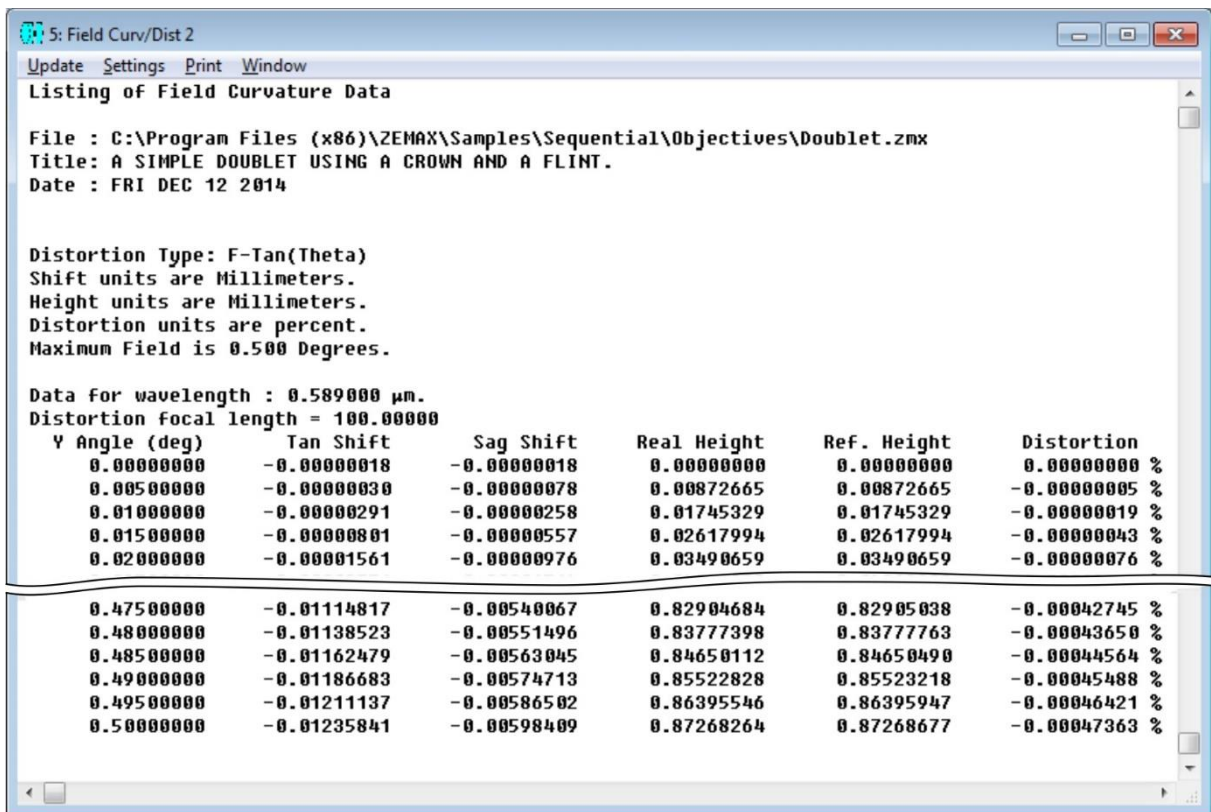


Рисунок 3.8 – Таблица значений aberrаций главных лучей

### 3.3.4. Хроматизм увеличения

Хроматизм увеличения можно определить из графика, представленного в Analysis  $\rightarrow$  Miscellaneous  $\rightarrow$  Lateral Color. Пример его показан на рисунке 3.9. По данному графику видно, что хроматизм увеличения не превосходит 2.5  $\mu\text{m}$ ; это значение меньше радиуса кружка Эйри, равного приблизительно 3.5  $\mu\text{m}$ . Точные значения можно определить, нажав кнопку "Text".

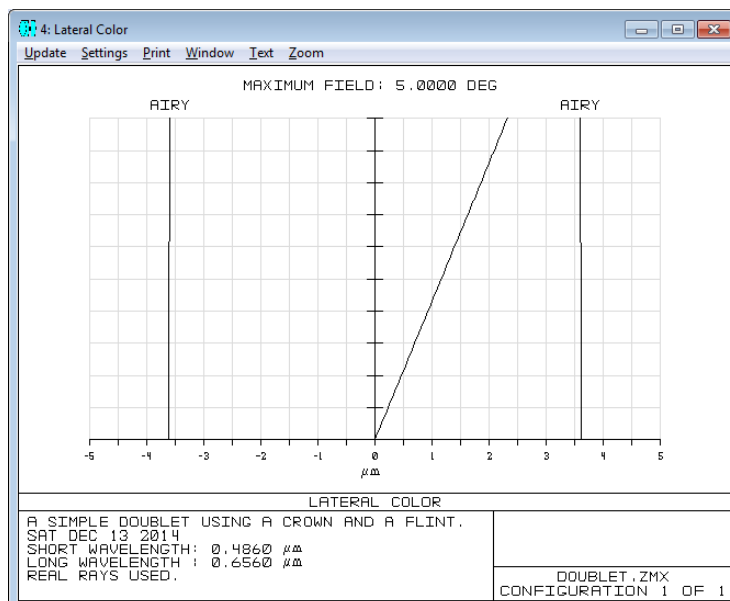


Рисунок 3.9 – График хроматизма увеличения

### 3.3.5. Волновые aberrации

Волновые aberrации представлены в пункте меню Analysis → Fans → Optical Path. Интерфейс графического и соответствующего текстового окон полностью аналогичен интерфейсу окон, в которых приводятся поперечные aberrации широких пучков. Графики волновых aberrаций рассматриваемой ОС показаны на рисунке 3.10.

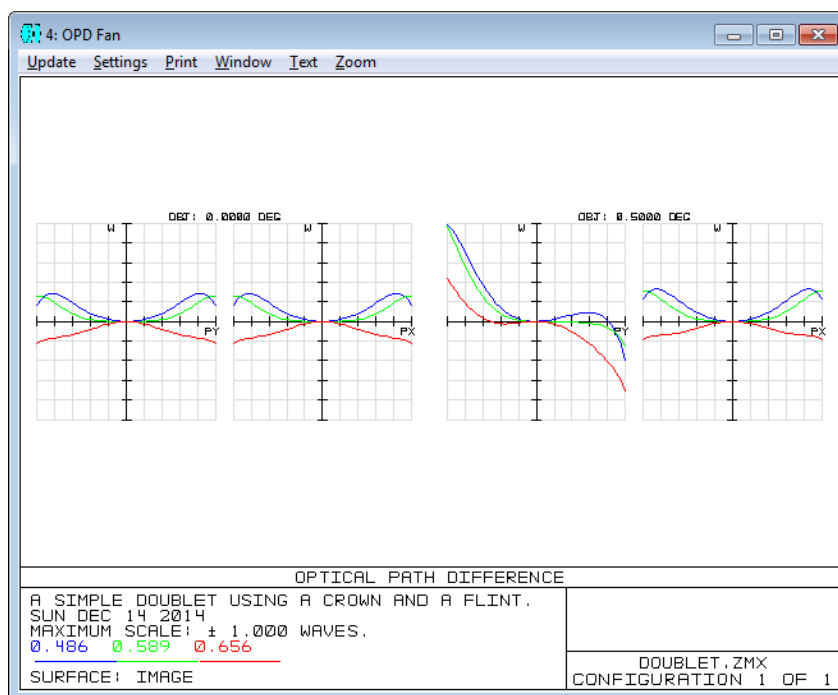


Рисунок 3.10 – Графики волновых aberrаций

**Важно!** Волновая aberrация в ZEMAX считается положительной, если реальный волновой фронт опережает сферу сравнения, тогда как в России принято наоборот. Т.е. при составлении оптического выпуска знаки волновых aberrаций следует менять на противоположные.

### 3.4. Замечания по составлению оптического выпуска

Оптический выпуск представляет собой документ, содержащий сводку результатов aberrационного расчета ОС. Форма и содержание оптического выпуска могут меняться в зависимости от типа ОС, ее назначения, критериев ее качества. Так, например, для фотообъектива приводятся значения всех геометрических aberrаций в линейной мере, для афокальной системы – aberrации в угловой или диоптрийной мере; в оптическом выпуске компенсатора для контроля формы асферического зеркала приводят геометрические и волновые aberrации для точки на оси, поскольку компенсационная система работает с точечным источником, расположенным на оси.

Составление оптического выпуска по результатам расчета ОС в программе ZEMAX является трудоемкой задачей, поскольку правила его оформления, принятые в России, отличаются от иностранных. Жестких правил на оформление оптического выпуска нет, но есть рекомендации, которых следует придерживаться.

Основное содержание оптического выпуска – это значения aberrаций ОС. В предыдущем разделе подробно описано, как их определить в ZEMAX. Повторим, что в большинстве случаев ZEMAX представляет значения aberrаций широких пучков в зависимости от *относительных* координат зрачка, тогда как при составлении оптического выпуска рекомендуется выражать координаты в плоскости зрачка в абсолютной мере (чаще всего, в миллиметрах). Поэтому для определения координат  $m$  необходимо относительные координаты невиньетированного зрачка  $PY$  умножить на половину диаметра входного зрачка (диаметр входного зрачка ОС указан, например, в Reports – Prescription Data).

Тангенсы апертурных углов, которые также необходимо указывать в таблицах выпуска, определяются по результатам трассировки соответствующих лучей (Analysis – Calculations – Ray Trace, см. раздел...). При заполнении таблиц с aberrациями широких наклонных пучков требуются значения величин  $\Delta tg\sigma'$ , представляющих собой разность  $\Delta tg\sigma' = tg\sigma' - tg\sigma'_0$ , где  $\sigma'$  – угол наклона луча, выходящего из ОС,  $\sigma'_0$  – угол наклона главного луча на выходе из ОС. Эти разности  $\Delta tg\sigma'$  для составления оптического выпуска приходится считать вручную.

Положение входного и выходного зрачков  $S_p$  и  $S'_p$  рассчитываются в ZEMAX только для осевого пучка. При наличии aberrаций в зрачках эти величины могут различаться для разных полей. Определить  $S_p$  и  $S'_p$  для разных полей без дополнительных вычислений невозможно. То же самое относится и к отступлению от условия изопланатизма.