

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

Т. Н. Хацевич

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебника для обучающихся по направлению подготовки
12.04.02 Опотехника (уровень магистратуры)

Новосибирск
СГУГиТ
2022

УДК 535
Х281

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент, МИИГАиК *А. С. Филонов*
кандидат технических наук, доцент, СГУГиТ *Д. М. Никулин*

Хацевич, Т. Н.

Х281 Компьютерные методы проектирования оптических систем : учебник / Т. Н. Хацевич. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – 156 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907513-21-1

Учебник подготовлен кандидатом технических наук, профессором Т. Н. Хацевич на кафедре фотоники и приборостроения СГУГиТ.

Рассматриваются общие вопросы компьютерных методов проектирования (расчета) оптических систем, основные этапы, алгоритм проектирования, подходы к выбору стартовых систем, оптимизации и анализу оптических систем. Учебник направлен на получение первичных компетенций по компьютерным методам проектирования типовых оптических систем. Рассмотрено применение компьютерных методов для проектирования объективов и окуляров приборов ночного видения, объективов тепловизионных приборов, сопрягаемых с неохлаждаемыми или охлаждаемыми приемниками излучений, окуляров, предназначенных для наблюдения изображений на микродисплеях. Многие примеры базируются на авторских разработках.

Учебник по дисциплине «Компьютерные методы проектирования оптических систем» предназначен для обучающихся по направлению подготовки 12.04.02 Оптотехника (уровень магистратуры), а также может быть использовано для обучающихся по направлению подготовки 12.03.02 Оптотехника (уровень бакалавриата).

Рекомендован к изданию кафедрой фотоники и приборостроения, Ученым советом Института оптики и технологий информационной безопасности СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 535

ISBN 978-5-907513-21-1

© СГУГиТ, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Роль оптимизации в оптическом проектировании	6
1.1. Методы оптического проектирования	6
1.2. Основные этапы разработки оптических систем	8
1.3. Создание целевой оптимизационной функции	12
1.4. Выполнение оптимизации.....	32
2. Проектирование оптических систем приборов ночного	
 видения.....	36
2.1. Особенности проектирования оптики приборов ночного	
видения	36
2.2. Критерии качества изображения объективов приборов	
ночного видения.....	41
2.3. Проектирование оптической системы объектива прибо-	
ров ночного видения.....	50
2.3.1. Варианты оптических систем объективов приборов	
ночного видения	50
2.3.2. Задание на проектирование оптической системы	
объектива.....	57
2.3.3. Выбор стартовой системы и ее оптимизация.....	58
2.3.4. Анализ полученной системы	65
2.4. Проектирование окуляров приборов ночного видения	69
2.4.1. Общие вопросы проектирования окуляров прибо-	
ров ночного видения	69
2.4.2. Варианты оптических систем окуляров приборов	
ночного видения	74
2.4.3. Пример компьютерного моделирования оптиче-	
ской системы окуляра приборов ночного видения.....	80

3. Проектирование оптических систем тепловизионных приборов.....	86
3.1. Особенности проектирования оптических систем объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми приемниками инфракрасного излучения	86
3.2. Проектирование оптической системы объектива тепловизионного прибора.....	94
3.2.1. Варианты оптических систем объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми приемниками излучений.....	94
3.2.2. Учебная научно-исследовательская работа как способ изучения законов прикладной оптики	103
3.2.3. Пример разработки оптической системы объектива тепловизионного прибора.....	106
3.2.4. Анализ полученной системы	110
3.3. Термоанализ оптической системы объектива тепловизионного прибора	117
3.4. Проектирование оптических систем объективов, сопрягаемых с охлаждаемыми приемниками инфракрасного излучения в тепловизионных приборах.....	124
3.5. Проектирование оптических систем окуляров для наблюдения изображений на микродисплеях	135
Заключение	142
Библиографический список.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая система является ключевым звеном современного оптического и оптико-электронного прибора. Для обеспечения конкурентных преимуществ проектируемого прибора по сравнению с существующими необходимо, чтобы его оптическая система была совершеннее, чем у имеющихся на рынке или предшествующих приборов. Комплексная оценка прибора включает большое число показателей и характеристик, значительная часть которых напрямую или косвенно определяется его оптической системой: увеличение, поле зрения, диаметры зрачков, удаление выходного зрачка, дальность распознавания, коэффициент пропускания, предел разрешения, масса, габаритные размеры и др.

Целью дисциплины «Компьютерные методы проектирования (расчета) оптических систем» является получение магистрантами компетенций, связанных с разработкой новых оптических систем оптико-электронных приборов двойного назначения: приборов ночного видения и тепловизионных приборов. Для их формирования необходимы знания по геометрической, прикладной, физической оптике, источникам и приемникам излучений, фотометрии, по оптическим и оптико-электронным приборам различного назначения, юстировке и технологии оптического производства. Предполагается, что обучающийся владеет интерфейсом программы по расчету оптических систем, умеет проводить расчеты параксиальных характеристик, знает оптическую суть аберраций и умеет проводить оценку аберраций простых оптических элементов и систем. Овладение магистрантами методами компьютерного проектирования оптических систем способствует более глубокому пониманию оплотехники, методологии проектирования оптических и оптико-электронных приборов, расширяет возможности выпускников в профессиональной деятельности.

1. РОЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ В ОПТИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

1.1. Методы оптического проектирования

В научно-технической литературе, в инженерной проектной деятельности используются различные синонимы: проектирование оптических систем, оптическое проектирование, разработка и расчет оптических систем, оптический дизайн, дизайн оптических систем. Несмотря на отличия терминологии, суть остается неизменной: проектирование оптических систем является ключевым этапом проектирования оптического или оптико-электронного прибора. В течение XX–XXI вв. в сфере инженерного проектирования оптических систем произошел переход от аналитических методов к компьютерным методам проектирования. Аналитические методы расчета оптических систем продолжают развиваться. В качестве примера можно привести исследования [1, 2]. Результаты теоретических методов используются для создания новых модулей в компьютерных программах для описания оптических поверхностей, элементов, материалов, разработки алгоритмов, баз данных и т. д.

Сегодня математическое (программное) обеспечение оптических расчетов представлено целым рядом компьютерных программ и зачастую превышает стоимость компьютеров. Практика инженерного оптического проектирования сложилась таким образом, что наиболее распространенной программой на отечественных предприятиях и организациях оптико-электронного приборостроения является Zemax (Zemax-OpticStudio). Соответственно эта программа широко используется в образовательных программах на профильных кафедрах (ИТМО, ИжГТУ, МИИГАиК, ТПУ и др.). Настоящий учебник также ориентируется на использование этой программы.

Целью компьютерного метода проектирования конкретной оптической системы является создание такой оптической системы, характеристики которой превышают существующие, либо в прагматичном смысле — удовлетворяют требованиям технического задания (ТЗ).

Компьютерные методы проектирования оптических систем позволяют выполнять все этапы и виды оптических расчетов:

- габаритный синтез (габаритный расчет, структурный синтез);
- определение конструктивных параметров отдельных элементов и системы в целом;
- оптимизацию конструктивных параметров;
- анализ изображения, формируемого оптической системой;
- светотехнические (энергетические) расчеты оптических систем;
- технологические расчеты (расчет допусков, оценку влияния допусков на качество изображения и технические характеристики, расчеты покрытий оптических поверхностей);
- юстировочные расчеты (расчеты юстировочных подвижек, определение компенсаторов);
- термооптический анализ и синтез оптических систем, свободных от термооптических аберраций;
- расчеты внутренних шумов (эффекты нарцисса, отражения от оптических деталей, оправ и т. п.);
- учет когерентности, поляризации и др.

Компьютерный расчет оптической системы является сложным процессом. Для одной задачи результаты могут быть получены почти сразу, для решения другой – потребоваться долгие дни и месяцы проведения расчетов, связанных с поиском и модификацией исходной оптической системы, изменением варьируемых параметров, ограничений, критериев характеристик, методик оптимизации и др. Согласно [3, с. 128], «...имеются математические основания полагать, что никакая обычная процедура оптимизации не может быть развита настолько, чтобы гарантировать всеобъемлющее решение конкретной задачи расчета объектива. Итак, расчет оптических систем по сути остается искусством». Эта же мысль повторяется в монографии [4, с. 106]: «Выбор или создание оптимальной оптической схемы все еще остается искусством». Такой взгляд обусловлен тем, что при проектировании оптических систем, включая и компьютерные методы, большая часть процедур проектирования является эвристическими, т. е. зависящими от решения и действий человека –

разработчика оптических систем, и только собственно оптимизация, выполняемая компьютерной программой после старта оптимизации, является детерминированной, осуществляется в соответствии с запрограммированными в программе методами поиска минимума целевой функции оптимизации [5, 6].

В инструкции для пользователя [7] указывается, что «процесс оптимизации неотделим от искусства проектирования современных схем, и только практика сделает конструктора мастером оптимизации. Пользователи, хорошо знающие алгоритмы оптимизации других оптических программ, вероятно, найдут, что Zemax в этом отношении очень прост в использовании, и при небольшой практике механизм использования интерфейса будет у вас только в подсознании, а вы сможете сконцентрировать свое внимание только на самой схеме. Если вы только начинаете осваивать компьютерную оптимизацию оптических схем, то нет лучшего пути для изучения этого процесса, чем практика».

При выполнении практических расчетов конкретных оптических систем в рамках изучения данной дисциплины в магистратуре очень полезным является возможность обсуждения с преподавателем как раз тех эвристических процедур, о которых уже упоминалось выше. Это позволит обучающемуся сформировать собственные приемы, алгоритмы, методики, способы, применение которых будет полезным при решении многих инженерных задач по разработке оптических систем в профессиональной деятельности.

1.2. Основные этапы разработки оптических систем

Все разработки оптических систем можно условно разделить на типовые, специальные и уникальные.

Разработка является типовой, если она имеет следующие свойства: все поверхности и элементы симметричны относительно оптической оси; объект и изображение лежат в фиксированных плоскостях, перпендикулярных оптической оси; все поверхности сферические; отсутствуют перемещающиеся (подвижные) элементы; имеется только один канал или режим работы оптической системы [6, с. 106].

Отступление от указанных свойств переводит разработку оптической системы из типовой в специальную. Примеры специальных разработок оптических систем: оптические системы со сменными характеристиками (панкратические, с дискретной сменой характеристик), оптические системы, разрабатываемые для различных температур эксплуатации, многоканальные и многоспектральные оптические системы; оптические системы, содержащие сканирующие элементы; оптические системы, содержащие призмы (призмы моделируются набором отражающих и преломляющих поверхностей, ориентированных соответствующим образом в пространстве); оптические системы, содержащие поверхности несферической формы, дифракционные элементы, среды с изменяющимся показателем преломления, волоконные элементы, растры и др.

Уникальные оптические системы применяются в уникальных дорогостоящих проектах, изготавливаются в единичных экземплярах, по специально разработанной технологии и т. п.

Начинать освоение компьютерных методов проектирования оптических систем рекомендуется с типовых разработок.

Типовое проектирование оптических систем включает: разработку оптической системы, термооптический анализ, расчет компенсаторов, расчет допусков на изготовление и юстировку, разработку технической документации на оптическую систему.

Ядром проектирования является разработка (расчет) оптической системы, включающая синтез, анализ и оптимизацию. В качестве примера на рис. 1 приведен алгоритм разработки оптической системы, взятый из монографии С. А. Родионова [5].

В прямоугольниках показаны детерминированные операции, выполняемые компьютерной программой по расчету оптических систем, в трапециях – эвристические операции, выполняемые разработчиком оптики. Ромбами обозначены эвристические решения о дальнейшем ходе проектирования, принимаемые разработчиком на основе оценки результатов операций, выполняемых компьютерной программой. Процесс проектирования выполняется циклично, т. е. содержит возвраты на начальные этапы с изменением и усложнением заданий на их выполнение.

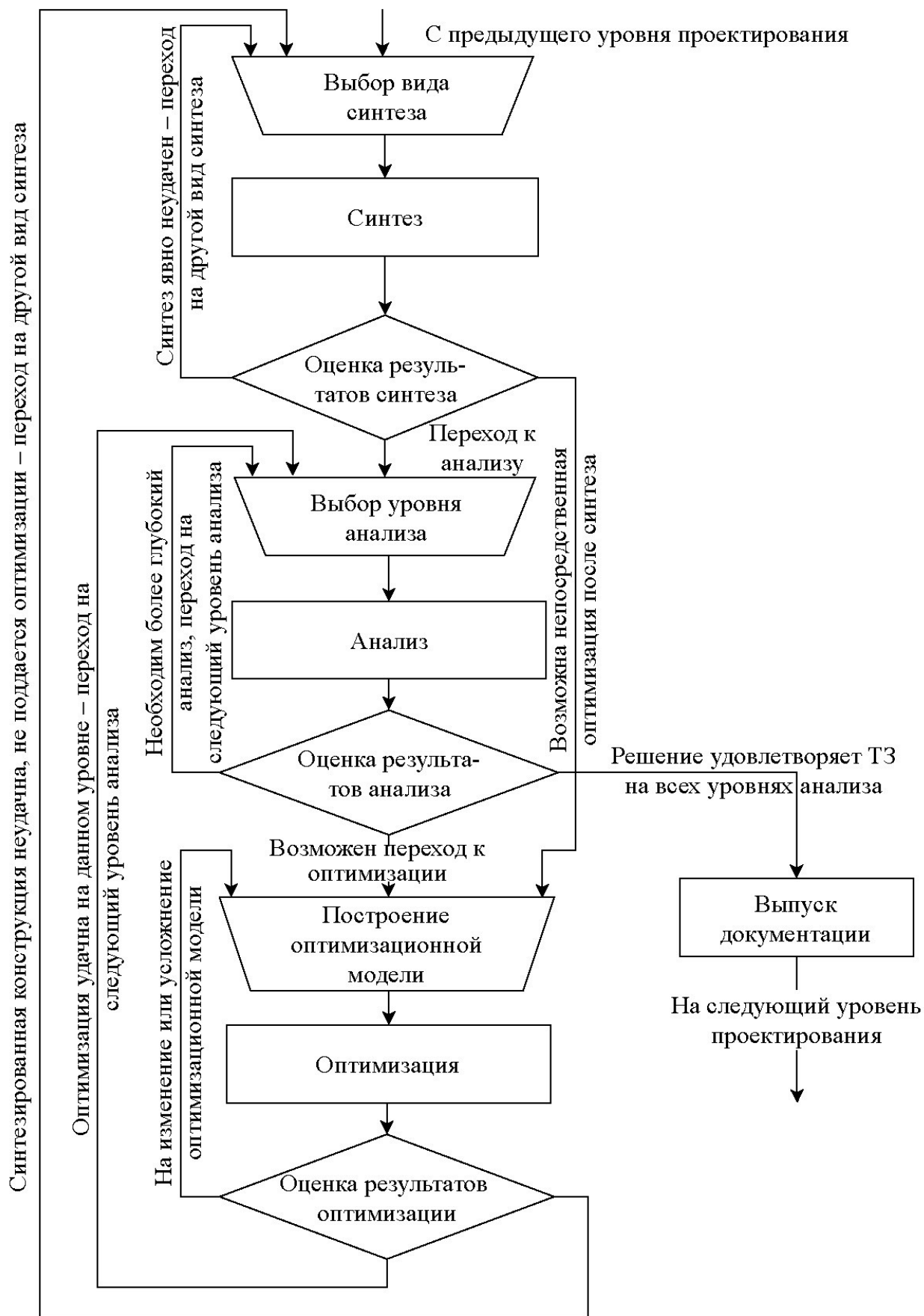


Рис. 1. Типовой алгоритм разработки оптической системы

В терминах и понятиях компьютерных программ по расчету оптических систем под синтезом понимается выбор или создание исходной (стартовой) системы. Основные способы создания стартовой системы:

- выбор из доступных разработчику баз данных (архивов);
- выбор из ранее разработанных самим разработчиком оптических систем;
- из теоретических соображений.

Ни одна из существующих компьютерных программ не позволяет однозначно определить оптимальную исходную систему [8].

Обычно выбранная система имеет худшие показатели, чем требуется разработать. Для использования в компьютерных методах проектирования стартовая система должна отвечать минимальному условию: через нее должна осуществляться трассировка лучей.

Под анализом понимается оценка характеристик оптической системы в соответствии с требованиями ТЗ по обеспечению масштабных показателей (фокусное расстояние, относительное отверстие, поле), массогабаритных показателей и оценка качества изображения, формируемого оптической системой, в соответствии с критериями, предъявляемыми к данного типу оптических систем.

Цикл оптимизация включает несколько шагов:

- определение и задание варьируемых (переменных) параметров;
- определение и задание ограничений на варьируемые параметры;
- создание целевой функции оптимизации;
- выбор типа оптимизации и ее старт.

По окончании цикла оптимизации проводится анализ полученной системы, затем корректировка первых трех шагов по заданию нового цикла оптимизации и его проведение.

Оптимизация является итерационным процессом. Если после проведения циклов оптимизации разработчик решает, что все возможности стартовой системы исчерпаны, то он проводит замену стартовой системы и начинает новый цикл оптимизации. В [7] имеется ремарка, образно характеризующая процесс оптимизации: «Опытный конструктор использует комбинацию интуиции, анализа и удачи в поиске новой, лучшей системы». Заканчивается процесс проектирования оптической системы после

того, как результаты анализа будут положительно оценены разработчиком. Таким образом, не только собственно оптимизация, но и проектирование компьютерными методами оптической системы в целом является итерационным процессом.

1.3. Создание целевой оптимизационной функции

Ключевой процедурой в оптимизации является создание целевой функции оптимизации и корректировка последней в процессе оптимизации. Именно на эти процедуры тратятся основные усилия (время, знания, опыт) разработчика в процессе оптимизации. Описание оптической системы как объекта оптимизации в [5] рассматривается как оптимизационная модель оптической системы.

В пакете прикладных программ [7] предусмотрены два алгоритма оптимизации: алгоритм оптимизации методом наименьших квадратов с активным демпфированием (Actively Damped Least Squares, DLS) и алгоритм оптимизации методом наискорейшего спуска (Orthogonal Descent). Алгоритмы минимизируют заданную целевую функцию оптимизации (Merit Function), содержащую взвешенные значения целевых параметров оптической системы. Целевые параметры называют операторами («operands»). В программе можно автоматически создавать различные целевые функции, каждая из которых удовлетворяет заданным критериям оптимизации; автоматически созданные целевые функции оптимизации могут быть дополнены и/или изменены пользователем с помощью редактора «Merit Function Editor, MTE». Процедура глобальной оптимизации предназначена для опытных пользователей и не используется в интерактивном режиме. Далее рассматриваются алгоритмы оптимизации, которые решают задачу поиска «локального» минимума заданной целевой функции, ориентируясь на начинающего пользователя.

Целевая функция определяется заданным набором операторов оптимизации, каждый из которых либо накладывает определенное ограничение на тот или иной параметр системы, либо определяет одну из ее целевых характеристик. В частности, операторы оптимизации представляют такие целевые характеристики системы, как качество изображения, фо-

кусное расстояние, увеличение и др. Численное значение целевой функции пропорционально корню квадратному из взвешенной суммы квадратов разностей между действительным и требуемым числовым значением каждого из заданных операторов. Целевая функция MF рассчитывается по следующей формуле:

$$MF = \sqrt{\frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i}}, \quad (1)$$

где W – абсолютное значение веса оператора; V – текущее значение оператора; T – целевое значение оператора; индекс i относится к номеру оператора в таблице оценочной функции.

Целевая функция определяется таким образом, что ее нулевое значение соответствует «идеальной» системе. Под идеальной системой здесь понимается такая система, в которой значения операторов равны их целевым значениям. Алгоритм оптимизации будет уменьшать числовое значение оценочной функции, насколько это возможно, так что, в конечном счете, значение целевой функции будет давать оценку приближения к тем целям, которые пользователь хочет достигнуть.

В качестве переменных параметров могут использоваться значения кривизны поверхностей, толщины линз и воздушных промежутков, марки стекол, значения конических постоянных и коэффициентов асферических поверхностей, дополнительные параметры для систем с изменяющейся конфигурацией и любые другие числовые данные.

Предусмотрено несколько типов автоматически создаваемых целевых функций оптимизации. Выбор целевой функции производится по четырем ключевым опциям: тип оптимизации, оптимизируемая характеристика системы, опорная точка, относительно которой рассматривается данная характеристика, и метод интегрирования.

Магистрант может выбрать один из двух типов оптимизации: RMS или PTV. Наиболее часто используется оптимизация по значениям RMS. RMS (Root-Mean-Square) – среднеквадратическое значение (СКЗ) – определяется как корень квадратный из среднего значения квадратов всех отдельных ошибок. Если для оптимизируемой системы значение RMS менее

важно, чем максимальный размах aberrаций, то выбирается тип PTV (Peak-To-Valley). Например, если необходимо сконцентрировать все лучи в пределах определенного размера площади детектора или оптического волокна. В таких случаях использование PTV при оптимизации может оказаться более эффективным, чем RMS.

При выборе оптимизируемой характеристики оптической системы на первоначальном этапе создания оптимизационной функции рекомендуется выбирать либо Wavefront (aberrации волнового фронта, выраженные в длинах волн), либо Spot Radius (поперечная aberrация лучей в плоскости изображения – радиус пятна рассеивания).

При выборе опорных точек оптимизации выбирается либо центр тяжести aberrаций (Centroid), либо координата главного луча (Chief). При выборе Chief вычисления RMS и PTV проводятся относительно положения главного луча для главной длины волны. Именно таким образом традиционно вычислялись значения aberrаций, так как они выполняются более просто.

При выборе Centroid значения RMS и PTV вычисляются относительно центра тяжести aberrаций для всех лучей, исходящих от данной точки поля. Использование в качестве опорной точки центра тяжести данных считается более предпочтительным, особенно при оптимизации по ошибкам волнового фронта. Вычисления относительно центра тяжести могут быть полезными для систем, в которых присутствует кома, так как эта aberrация смещает центр тяжести в сторону от положения главного луча.

Числовые значения целевых функций имеют физический смысл. Так, например, значение целевой функции «RMS-Wavefront-Centroid» представляет собой СКЗ ошибок волнового фронта, выраженное в длинах волн. Если значение целевой функции «RMS-Spot Radius-Chief» равно 0,11, то это значит, что СКЗ размера пятна рассеяния равно 0,11 в линейных единицах, установленных для текущей системы; если единицами измерения являются миллиметры, то это соответствует 110 мкм. Если оптимизация производится для нескольких точек поля зрения и/или нескольких длин волн, то числовое значение целевой функции равно средневзвешенному значению СКЗ для заданных точек поля и длин волн.

Использование целевой функции «RMS-Spot Radius» может приводить к другому оптимальному решению, чем при использовании оценочной функции «RMS-Wavefront». Основная причина, по которой получается это различие, заключается в том, что лучевые aberrации пропорциональны производным волновых aberrаций. Поэтому нельзя ожидать, что минимум одной функции будет соответствовать минимуму другой функции. Главное правило для успешного использования этих функций заключается в следующем: если система близка к дифракционному пределу (например, РТВ ошибка волнового фронта меньше двух длин волн), то рекомендуется использовать оптимизацию по СКЗ ошибок волнового фронта. В других случаях рекомендуется использовать оптимизацию по СКЗ радиуса пятна рассеяния.

Отмечается, что целевые функции, в которых в качестве опорной точки используется центр тяжести пятна рассеяния, превосходят по своей эффективности целевые функции, в которых в качестве опорной используется точка пересечения главного луча с плоскостью изображения. Большинство измеряемых дифракционных характеристик оптической системы, таких как частотно-контрастная характеристика (ЧКХ, МПФ, МТФ) или размер кружка с заданной концентрацией энергии, улучшаются с уменьшением СКЗ ошибок волнового фронта, отнесенных к центру тяжести изображения. Однако всегда полезно провести переоптимизацию окончательной системы с разными оценочными функциями для проверки, какая функция приводит к лучшим характеристикам для данной системы. Например, оптимизация по СКЗ ошибкам волнового фронта относительно центра тяжести часто приводит к более высоким значениям ЧКХ на низких пространственных частотах и к меньшим значениям ЧКХ на средних пространственных частотах, чем при оптимизации по СКЗ относительно главного луча. Числовые значения целевых функций по ошибкам РТВ пропорциональны (но не равны) действительным значениям полного размаха aberrаций. С уменьшением значения целевой функции РТВ aberrации также будут минимизироваться.

При выборе метода интегрирования по площади зрачка на начальном этапе освоения оптимизации рекомендуется использовать метод гауссовой квадратуры (Gaussian quadrature, GQ). В отличие от метода прямоугольной

матрицы (Rectangular array, RA), для большинства практических случаев GQ алгоритм является более предпочтительным. Он использует тщательно выбранный и взвешенный ряд лучей для точного вычисления RMS или PTV ошибки по области однородно освещенного входного зрачка. Взвешивание всех лучей производится в соответствии с «весами», заданными для всех длин волн и всех точек поля в соответствующих установочных окнах, а также посредством алгоритма, заложенного в GQ целевую функцию. Недостатком GQ алгоритма является только то, что он предполагает круглую (в общем случае, эллиптическую) форму входного зрачка. Для оптических систем с другой формой входного зрачка этот алгоритм работает не очень точно.

Алгоритм RA основан на трассировании через оптическую систему лучей, проходящих через узлы наложенной на входной зрачок прямоугольной сетки («Grid»). Преимуществом алгоритма RA является его способность точного учета в целевой функции эффектов виньетирования. Это полезно в таких системах, как телескопы с большим центральным виньетированием и объективы, в которых намеренно виньетируют лучи с большими аберрациями. К недостаткам алгоритма RA относятся меньшая скорость и меньшая точность вычислений. Обычно для достижения заданной степени точности необходимо трассировать большее количество лучей, чем при использовании GQ алгоритма.

При использовании GQ алгоритма (и только для этого алгоритма) необходимо задать значение параметра «Rings», определяющего количество окружностей на поверхности зрачка, через которые будут проходить трассируемые лучи. Этот параметр определяет количество лучей, трассируемых от каждой точки поля для каждой длины волны. Для точки поля на оси (для систем, обладающих вращательной симметрией) количество трассируемых лучей равно количеству заданных окружностей. Для всех других точек поля в осесимметричных системах количество трассируемых лучей на каждую окружность равно половине от заданного значения «Arms». По умолчанию значение параметра «Arms» устанавливается равным 6 и, следовательно, для внеосевых точек поля количество трассируемых лучей на одну окружность равно 3. Число «Arms» определяет количество лучей, трассируемых через радиальные линии зрачка. По умолчанию

устанавливается шесть равнорасположенных по углу радиальных линий (три для систем с вращательной симметрией). Это значение может быть установлено 8, 10 или 12. Для большинства обычных оптических систем достаточно 6 радиальных линий. Рекомендуется использовать значения, установленные по умолчанию. Необходимо принимать во внимание, что трассирование большего, чем требуется, количества лучей не поможет найти лучшее решение задачи.

При автоматическом задании целевой функции можно ввести в нее операторы, ограничивающие диапазон изменений толщин «стеклянных» поверхностей и/или воздушных промежутков. Для этого нужно только выбрать опции «Glass» и/или «Air». В таком случае в целевую функцию будут включены операторы MNCG, MXCG и MNEG, ограничивающие минимальную центральную толщину, максимальную центральную толщину и минимальную краевую толщину «стеклянных» поверхностей, соответственно, и операторы MNCA, MXCA и MNEA, ограничивающие минимальную центральную толщину, максимальную центральную толщину и минимальную краевую толщину воздушных промежутков, соответственно. Эта опция предназначена для задания самых простых ограничений. Для более сложных схем, включающих в себя зеркальные поверхности, поверхности типа «coordinate break», а также для систем с изменяемой конфигурацией пользователь должен сам включить в таблицу целевой функции ряд дополнительных операторов ограничения (например, для каждой поверхности в отдельности).

Опция «Start at» используется для того, чтобы указать, с какой строки в таблице редактора целевой функции должна стартовать создаваемая автоматически целевая функция. Указание номера стартовой строки необходимо в тех случаях, когда первые строки таблицы заняты собственным списком операторов.

Опция «Assume Axial Symmetry» используется для того, чтобы при создании и вычислении целевой функции учитывалась осесимметричность системы. При задании осевой симметрии целевая функция оптимизации строится таким образом, чтобы при оптимизации системы требовалась трассировка наименьшего количества лучей; при этом процесс оптимизации значительно ускорится без потери точности вычислений.

Целевая функция оптимизации, созданная автоматически, может быть модифицирована магистрантом. Новые операторы могут быть добавлены в таблицу или стерты из нее с помощью клавиш Insert и Delete.

При модификации функции оптимизации очень важно задать для каждого оператора цель и весовой коэффициент. Значение каждого оператора вычисляется автоматически при обновлении таблицы оценочной функции.

Цель (target) – это желаемое значение параметра, который выражается данным оператором. Разница между целевым значением и значением оператора возводится в квадрат, а суммирование этих значений для всех операторов дает значение оценочной функции. Численные значения цели и оператора сами по себе для оптимизации не важны; для оптимизации важна только разность между ними. Чем больше эта разность, тем больше вклад этого оператора в значение оценочной функции.

Значение (value) – это текущее значение оператора. Само по себе это значение не используется в процессе оптимизации. Используется только разность между текущим значением оператора и заданным его целевым значением.

Вес (weight) – это относительная характеристика для данного параметра. Численное значение весового коэффициента может быть любым числом, положительным или отрицательным. Однако оптимизатор будет работать по-разному, когда вес оператора задан положительным, отрицательным числом или нулевым.

Если вес оператора больше нуля, то разность между текущим значением оператора и его целевым значением трактуется как «отклонение от нормы», которая должна быть минимизирована вместе со всей оценочной функцией. Для большинства операторов должны быть заданы веса с положительными значениями.

Если вес оператора задан отрицательным числом, то ZEMAX трактует это число как множитель Лагранжа. Множители Лагранжа форсируют работу алгоритма оптимизации в направлении поиска решения, которое точно соответствовало бы заданному ограничению, не считаясь с действием других операторов. Это бывает полезным, например, для точного удовлетворения требования к значениям фокусного расстояния или увеличе-

ния. В каком-то смысле, это подобно установке для данного оператора «бесконечно» большого веса, однако таким образом обеспечивается более стабильное численное решение. Так как между переменными величинами и заданными целями оператора, вообще говоря, имеется нелинейное соотношение, то невозможно достичь точного целевого значения оператора за один цикл оптимизации; однако за несколько циклов оптимизации обычно достигается сходимость решения для «лагранжевых» целей с очень высокой точностью, если, конечно, решение существует. Однако возможно, что заданные лагранжевые цели не будут достигнуты при заданном наборе переменных величин, особенно в случаях, когда задано несколько лагранжевых целей. Для вычисления значения всей оценочной функции использует абсолютные значения весов. Для получения наилучшего результата рекомендуется осторожно подходить к использованию лагранжевых множителей. Наилучшая оптимизация и адекватная точность обычно достигаются просто с помощью увеличения весов тех операторов, для которых нужно получить точные (или близкие к точным) значения. Лагранжевые множители не должны использоваться с операторами ограничения, такими как STGT, так как для операторов этого типа не всегда можно вычислить соответствующие производные.

Если вес оператора равен нулю, то алгоритм оптимизации вычисляет значение этого оператора, но игнорирует его при вычислении значения оценочной функции. Это бывает очень полезно, когда значение оператора само по себе не является важным, но используется где-либо в другом месте в оценочной функции, например, для вычисления значения какого-либо другого оператора. Это также полезно, когда нужно просто контролировать или осуществлять мониторинг значения какого-либо параметра.

Новый оператор вводится в таблицу функции оптимизации путем набора (печати) его имени в первую колонку таблицы и последующего заполнения остальных полей в этой строке. В таблице имеется восемь полей, которые могут потребоваться для доопределения оператора: Int1, Int2, Hx, Hy, Px, Py, target (цель) и weight (вес). Величины Int – целочисленные параметры, значения которых зависят от типа определяемого оператора.

Общее количество операторов оптимизации, которые могут использоваться для создания функции оптимизации, составляет несколько сотен.

Освоить компьютерное проектирование можно только заинтересованной самостоятельной работой. Все операторы можно условно разделить по категориям, некоторые из них приведены в табл. 1.

Таблица 1

Операторы оптимизации

Категория	Операторы
Оптические свойства первого порядка	AMAG, ENPP, EFFL, EFLX, EFLY, EPDI, EXPD, EXPP, ISFN, LINV, OBSN, PIMH, PMAG, POWF, POWP, POWR, SFNO, TFNO, WFNO
Аберрации	ABCD, ANAC, ANAR, ANAX, ANAY, ANCX, ANCY, ASTI, AXCL, BIOC, BIOD, BSER, COMA, DIMX, DISA, DISC, DISG, DIST, FCGS, FCGT, FCUR, LACL, LONA, OPDC, OPDM, OPDX, OSCD, PETC, PETZ, RSCE, RSCH, RSRE, RSRH, RWCE, RWCH, RWRE, RWRH, SPCH, SPHA, TRAC, TRAD, TRAE, TRAI, TRAR, TRAX, TRAY, TRCX, TRCY, ZERN
MTF data Данные МПФ	GMTA, GMTS, GMTT, MSWA, MSWS, MSWT, MTFA, MTFS, MTFT, MTHA, MTHS, MTHT
PSF/Strehl Ratio data Данные ФРТ/Число Штреля	STRH
Encircled energy Концентрация энергии	DENC, DENF, ERFP, GENC, GENF, XENC, XENF
Conraints on lens data Ограничения на параметры оптической системы /элементов	COGT, COLT, COVA, CTGT, CTLT, CTVA, CVGT, CVLT, CVVA, DMGT, DMLT, DMVA, ETGT, ETLT, ETVA, FTGT, FTLT, MNCA, MNCG, MNCT, MNCV, MNEA, MNEG, MNET, MNPD, MXCA, MXCG, MXCT, MXCV, MXEA, MXEG, MXET, MNSD, MXSD, TGTH, TTGT, TTHI, TTLT, TTVA, XNEA, XNET, XNEG, XNEA, XXEA, XXEG, XXET, ZTHI
Constraints on lens properties Ограничения на свойства оптической системы / элементов	CVOL, MNDT, MXDT, SAGX, SAGY, SSAG, STHI, TMAS, TOTR, VOLU, NORX, NORY, NORZ, NORD
Constraints on parameter data Ограничения на параметры	PMGT, PMLT, PMVA
Constraints on extra data Ограничения на дополнительные данные	XDGT, XDLT, XDVA

Категория	Операторы
Constraints on glass data Ограничения на данные стекол	GCOS, GTCE, INDX, MNAB, MNIN, MNPД, MXAB, MXIN, MXPД, RGLA
Constraints on paraxial ray data Ограничения на данные для параксиального луча	PANA, PANB, PANC, PARA, PARB, PARC, PARR, PARX, PARY, PARZ, PATX, PATY, YNIP
Constraints on real ray data Ограничения на данные для реального луча	CENX, CENY, CNAX, CMAY, CNPX, CNPY, DXDX, DXDY, DYDX, DYDY, HHCN, IMAE, OPTH, PLEN, RAED, RAEN, RAGA, RAGB, RAGC, RAGX, RAGY, RAGZ, RAID, RAIN, RANG, REAA, REAB, REAC, REAR, REAX, REAY, REAZ, RENA, RENB, RENC, RETX, RETY
Constraints on element positions Ограничения на положение элементов	GLCA, GLCB, GLCC, GLCR, GLCX, GLCY, GLCZ
Changing system data Изменение параметров системы	CONF, IMSF, PRIM, SVIG, WLEN, CVIG, FDMO, FDRE
General math operands Основные математические операторы	ABSO, ACOS, ASIN, ATAN, CONS, COSI, DIFF, DIVB, DIVI, EQUA, LOGE, LOGT, MAXX, MINN, OPGT, OPLT, OPVA, OSUM, PROB, PROD, QSUM, RECI, SQRT, SUMM, SINE, TANG
Multi-configuration (zoom) Data Параметры системы с изменяющейся конфигурацией	CONF, MCOL, MCOG, MCOV, ZTHI
Thermal Coefficient of Expansion Data Ограничения на коэффициент теплового расширения	TCGT, TCLT, TCVA

Описание и способы задания каждого из операторов приведены в инструкции для пользователя и обсуждаются на практических занятиях по учебной дисциплине «Компьютерные методы проектирования оптических систем». В табл. 2 приведено более ста отобранных операторов, которые могут потребоваться для выполнения практических заданий по данной учебной дисциплине.

Таблица 2

Обозначение и описание операторов оптимизации

Номер	Оператор	Описание
Основные оптические характеристики		
1	AMAG	Угловое увеличение
2	ENPP	Расстояние до входного зрачка от первой поверхности
3	EFFL	Эффективное фокусное расстояние системы.
4	EFLY	Эффективное фокусное расстояние в локальной Y -плоскости для выбранной части оптической системы (от Surf1 до Surf2) для главной длины волны
5	EPDI	Диаметр входного зрачка в линейных единицах
6	EXPD	Диаметр выходного зрачка
7	EXPP	Расстояние до выходного зрачка от плоскости изображения в линейных единицах
8	ISFN	Параксиальное F -число (диафрагменное число) в пространстве изображений для системы, работающей с бесконечного расстояния
9	ISNA	Параксиальная числовая апертура в пространстве изображений для системы, работающей с конечного расстояния
10	LINV	Значение инварианта Лагранжа
11	OBSN	Числовая апертура в пространстве предметов
12	PIMH	Параксиальная высота изображения в параксиальной плоскости изображений
13	PMAG	Параксиальное увеличение
14	POWR	Оптическая сила поверхности (в обратных единицах измерения)
15	WFNO	Рабочее F -число ($F/\#$)
Аберрации		
16	ANAC	Угловые аберрации в радиальном направлении, измеренные в пространстве изображений относительно центроида для указанной длины волны
17	ASTI	Астигматизм третьего порядка, вычисленный по коэффициентам Зейделя, вычисляется в длинах волн
18	AXCL	Хроматизм положения: в линейных единицах для фокальных систем и в диоптриях для афокальных систем
19	COMA	Кома третьего порядка, вычисляется по коэффициентам Зейделя, приводится в длинах волн
20	SPHA	Сферическая аберрации в длинах волн, вносимая поверхностью Surf на длине волны Wave. Если Surf = 0, вычисляется сферическая аберрация всей системы

Номер	Оператор	Описание
21	LONA	Продольная абберрация (для фокальных систем – в линейных единицах, для афокальных систем – в диоптриях)
22	DISG	Дисторсия (в процентах или абсолютном выражении)
23	DIST	Дисторсия третьего порядка
24	DIMX	Этот оператор подобен оператору DIST, за исключением того, что он устанавливает верхний предел на абсолютное значение дисторсии
25	DISC	«Калиброванная» (F -Theta) дисторсия
26	FCGS	Сагиттальная кривизна поля
27	FCGT	Тангенциальная кривизна поля
28	FCUR	Кривизна поля третьего порядка, вычисляемая по коэффициентам Зейделя
29	PETC	Кривизна Петцваля в обратных единицах измерения
30	PETZ	Радиус поверхности Петцваля
31	LACL	Хроматизм увеличения
32	OPDC	Оптическая разность хода (в длинах волн) между заданным и главным лучами на указанной длине волны
33	OPDM	Оптическая разность хода (OPD) между заданным лучом и средним значением OPD для всех лучей в зрачке на указанной длине волны
34	OPDX	Оптическая разность хода в пространстве изображений в радиальном направлении относительно центроида изображения
35	RSCE	СКЗ радиуса пятна рассеяния относительно центра тяжести изображения; в используемых единицах измерения. Для вычисления этого оператора используется метод гауссовой квадратуры, который дает точные результаты для систем с невиньетируемыми круглыми зрачками
36	RSCH	СКЗ радиуса пятна рассеяния относительно главного луча; в используемых единицах измерения. Для вычисления этого оператора используется метод гауссовой квадратуры, который дает точные результаты для систем с невиньетируемыми круглыми зрачками
37	RSRE	СКЗ радиуса пятна рассеяния относительно центра тяжести изображения; в установленных единицах измерения. Этот оператор подобен оператору RSCE, за исключением того, что при вычислении оператора используется не метод гауссовой квадратуры, а прямоугольная сетка лучей. Этот оператор всегда учитывает виньетирование лучей

Номер	Оператор	Описание
38	RSRH	Оператор подобен RSRE, за исключением того, что вычисления проводятся относительно главного луча, а не центроида изображения. Оператор всегда учитывает виньетирование лучей
39	RWCE	СКЗ ошибки волнового фронта (в длинах волн) относительно центроида изображения. Этот оператор полезен для минимизации изменений волнового фронта, которые пропорциональны числу Штреля и площади под кривой МПФ. Для вычисления этого оператора используется метод гауссовой квадратуры, который дает точные результаты для систем с невиньетируемыми круглыми зрачками
40	RWCH	СКЗ ошибки волнового фронта (в длинах волн) относительно главного луча. Для вычисления этого оператора используется метод гауссовой квадратуры, который дает точные результаты для систем с невиньетируемыми круглыми зрачками
41	RWRE	СКЗ ошибки волнового фронта (в длинах волн) относительно центроида изображения. Для вычисления оператора используется не метод гауссовой квадратуры, а прямоугольная сетка лучей. Этот оператор всегда учитывает виньетирование лучей
42	RWRH	СКЗ ошибки волнового фронта (в длинах волн) относительно главного луча. Для вычисления оператора используется не метод гауссовой квадратуры, а прямоугольная сетка лучей. Этот оператор всегда учитывает виньетирование лучей
43	TRAR	Поперечная аберрация, измеренная в радиальном направлении в плоскости изображения на длине волны Wave относительно главного луча
44	TRAD	X-компонента TRAR. Этот оператор имеет те же ограничения, что и TRAC
45	TRAE	Y-компонента TRAR. Этот оператор имеет те же ограничения, что и TRAC. См. TRAC
46	TRAI	Радиус поперечной аберрации на поверхности Surf на длине волны Wave, измеренный относительно главного луча. Этот оператор подобен TRAR, за исключением того, что вычисления могут быть проведены для любой поверхности, а не только для поверхности изображения
47	TRAC	Поперечные аберрации на длине волны Wave, измеренные в пространстве изображений в радиальном направлении относительно центроида изображения. В отличие от большинства других операторов, правильная работа этого оператора критически зависит от местоположения других операторов TRAC в таблице целевой функции. TRAC операторы должны группироваться по полям и длинам волн.

Номер	Оператор	Описание
		ZEMAX трассирует сразу все TRAC лучи, относящиеся к данному полю, и использует полученные данные для вычисления положения центроида изображения. Затем положение каждого луча соотносится с вычисленным положением центра тяжести. Этот оператор должен вводиться в таблицу оценочной функции только посредством операции Default Merit Function; не рекомендуется его введение непосредственно пользователем
48	TRAX	Поперечная aberrация на длине волны Wave, измеренная в направлении оси X в плоскости изображения относительно главного луча
49	TRAY	Поперечная aberrация на длине волны Wave, измеренная в направлении оси Y в плоскости изображения относительно главного луча
50	TRCX	Поперечная aberrация, измеренная в направлении оси X в плоскости изображения относительно центроида изображения
51	TRCY	Поперечная aberrация, измеренная в направлении оси Y в плоскости изображения относительно центроида изображения
MTF data. Данные МПФ (ЧКХ). Encircled energy. Концентрация энергии		
52	GMTA	Среднее значение геометрической МПФ для сагиттальной и меридиональной плоскостей
53	GMTS	Значение геометрической МПФ в сагиттальной плоскости. Детали см. в описании оператора GMTA
54	GMTT	Значение геометрической МПФ в меридиональной плоскости. Детали см. в описании оператора GMTA
55	MTFA	Среднее значение ЧКХ для меридионального и сагиттального сечений
56	MTFS	Вычисляет модуляционную передаточную функцию в сагиттальной плоскости. См. описание оператора MTFA
57	MTFT	Вычисляет модуляционную передаточную функцию в тангенциальной плоскости. См. описание оператора MTFA
58	DENC	Оператор вычисляет радиус кружка (или полуширину щели по X или Y , или размер квадратной области), в пределах которого/ой концентрируется заданная доля (Frac) энергии дифракционного пятна для указанного поля
59	DENF	Оператор вычисляет долю энергии дифракционного пятна, сконцентрированную в заданной области (на расстоянии Dist от опорной точки): в кружке заданного радиуса, в щели с заданной полушириной по X или Y , в квадратной области

Номер	Оператор	Описание
60	GENC	Геометрическое распределение энергии. Этот оператор вычисляет размер кружка (или полуширину щели по X или Y , или размер квадратной области), в пределах которого/ой концентрируется заданная доля (Frac) энергии
61	XENC	Оператор вычисляет радиус (в мкм) кружка, в котором концентрируется заданное количество энергии от протяженного источника. Вычисления производятся на основе текущих установок для программы «Geometric Encircled Energy». Поэтому перед использованием этого оператора сначала сделайте необходимые установки в этой программе и запишите их, нажав в установочном окне на клавишу «Save». Изменения установок, определяющих форму области, производятся посредством параметра Type: 1 – для кружка, 2 – только по оси X , 3 – только по оси Y , 4 – для квадрата, 5 – для x -распределения и 6 – для y -распределения
62	XENF	Оператор вычисляет количество энергии, концентрирующейся от протяженного источника в заданной области: в кружке, квадрате, только по оси X и только по оси Y . Размер области задается расстоянием ее границы от опорной точки
Операторы, используемые для задания ограничений		
Ограничения на данные для параксиального и реального лучей		
63	RAGA	Направляющий косинус заданного луча относительно оси X на поверхности Surf для длины волны Wave для заданной поверхности в глобальной системе координат
64	RAGB	Направляющий косинус заданного луча относительно оси Y
65	RAGC	Направляющий косинус заданного луча относительно оси Z
66	RAGX	X -координата заданного луча в глобальной системе координат в используемых единицах измерения
67	RAGY	Y -координата
68	RAGZ	Z -координата
69	RAID	Угол падения
70	RAIN	Косинус угла падения
71	RANG	Значение угла в радианах между заданным лучом и локальной осью Z на указанной поверхности для указанной длины волны
72	REAA	Направляющий косинус реального луча относительно оси X после преломления на указанной поверхности для указанной длины волны
73	REAB	Направляющий косинус реального луча относительно оси Y после преломления на указанной поверхности для указанной длины волны

Номер	Оператор	Описание
74	REAC	Направляющий косинус реального луча относительно оси Z после преломления на указанной поверхности для указанной длины волны
75	REAR	Радиальная координата реального луча на указанной поверхности для указанной длины волны
76	REAX	X -координата реального луча на указанной поверхности для указанной длины волны
77	REAY	Y -координата реального луча на указанной поверхности для указанной длины волны
78	REAZ	Z -координата реального луча на указанной поверхности для указанной длины волны
79	RAED	Значение угла (в градусах) между нормалью к поверхности и направлением реального луча после его преломления или отражения (угол преломления / отражения) на указанной поверхности и для указанной длины волны
80	RAEN	Значение косинуса угла между нормалью к поверхности и направлением реального луча после его преломления или отражения (косинус угла преломления / отражения) на указанной поверхности для указанной длины волны
81	YNIP	Параметр YNI для параксиальной области
Ограничения на свойства оптической системы / элементов		
82	CTGT	Оператор ограничивает минимальное значение центральной толщины поверхности
83	CTLT	Оператор ограничивает максимальное значение центральной толщины указанной поверхности
84	CTVA	Оператор устанавливает требуемое значение центральной толщины указанной поверхности
85	CVGT	Оператор ограничивает минимальное значение кривизны поверхности
86	CVLT	Оператор ограничивает максимальное значение кривизны поверхности
87	CVVA	Оператор задает требование к значению кривизны поверхности
88	DMGT	Оператор ограничивает минимальное значение диаметра указанной поверхности
89	DMLT	Оператор ограничивает максимальное значение диаметра указанной поверхности
90	DMVA	Оператор устанавливает требуемое значение диаметра указанной поверхности

Номер	Оператор	Описание
91	ETGT	Оператор ограничивает минимальную краевую толщину указанной поверхности
92	ETLT	Оператор ограничивает максимальную краевую толщину указанной поверхности
93	ETVA	Оператор устанавливает заданное значение краевой толщины поверхности
94	MNAB	Оператор ограничивает минимальное значение числа Аббе для заданной группы поверхностей
95	MNCA	Этот оператор ограничивает минимальное значение толщин воздушных промежутков между элементами для заданной группы поверхностей
96	MNCG	Оператор ограничивает минимальную толщину стеклянных элементов для заданной группы поверхностей: центральные толщины для стеклянных поверхностей ($n > 1$) должны быть больше заданного значения
97	MNCT	Оператор ограничивает минимальное значение всех толщин для заданной группы поверхностей: центральные толщины должны быть больше заданного значения
98	MNCV	Оператор ограничивает минимальное значение кривизны у заданной группы поверхностей: кривизна поверхностей должна быть больше заданного значения
99	MXCA	Оператор ограничивает максимальное значение (центральной) толщины воздушных промежутков между элементами в заданной области поверхностей: толщины должны быть меньше заданного значения
100	MXCG	Оператор ограничивает максимальную центральную толщину стеклянных ($n > 1$) поверхностей заданного ряда поверхностей: центральные толщины стекол должны быть меньше установленного значения
101	MXCT	Оператор ограничивает максимальную толщину всех поверхностей для заданного ряда поверхностей: центральные толщины поверхностей должны быть меньше установленного значения
102	MXCV	Оператор ограничивает максимальную кривизну поверхностей: кривизна поверхностей должна быть меньше заданного значения
103	MXEA	Оператор ограничивает максимальную краевую толщину воздушных промежутков между элементами в заданной области поверхностей: толщины должны быть меньше заданного значения

Номер	Оператор	Описание
104	MNEG	Оператор ограничивает минимальную толщину на краю стеклянных ($n > 1$) элементов для заданной группы поверхностей: краевые толщины стеклянных элементов должны быть больше заданного значения
105	MXEG	Оператор ограничивает максимальную краевую толщину стекол (материалов) в заданной области поверхностей
106	OPGT	Оператор используется для ограничения минимального значения какого-либо другого оператора
107	OPLT	Оператор используется для ограничения максимального значения какого-либо другого оператора
108	TTGT	Оператор ограничивает полную (включая прогибы передней и задней поверхностей) минимальную толщину поверхности: полная толщина поверхности должна быть больше заданного значения
109	TTHI	Суммарная толщина между указанными поверхностями
110	TTLT	Оператор ограничивает максимальную суммарную толщину между указанными поверхностями
111	TTVA	Значение полной суммарной толщины между указанными поверхностями
Ограничения на параметры оптической системы /элементов		
112	MNDT	Оператор ограничивает минимальное значение отношения диаметров поверхностей к центральным толщинам для заданной группы поверхностей
113	MXDT	Оператор ограничивает максимальное значение отношения диаметров поверхностей к центральным толщинам
114	SAGX	Прогиб поверхности в плоскости XZ на расстоянии полудиаметра
115	SAGY	Прогиб поверхности в плоскости YZ на расстоянии полудиаметра
116	SSAG	Значение прогиба поверхности в точке с координатами X и Y
117	TGTH	Сумма толщин стеклянных поверхностей для указанных поверхностей (это сумма включает в себя толщину последней указанной поверхности; то есть это не расстояние между двумя поверхностями)
118	TMAS	Полная масса стекол в пределах указанной области поверхностей
119	TOTR	Полная длина оптической системы
120	VOLU	Объем элемента (элементов) в кубических сантиметрах. Этот оператор работает только для круглых элементов с плоскими или сферическими поверхностями

Номер	Оператор	Описание
121	GCOS	Параметр принимает значение относительной стоимости стекла, используемого для поверхности Surf, в соответствии с данными, указанными каталогах стекол.
122	PMGT	Оператор ограничивает минимальное значение указанного параметра Param для указанной поверхности. Параметры имеют различный смысл для разных типов поверхностей
123	PMLT	Оператор ограничивает максимальное значение параметра Param для указанной поверхности. Параметры имеют различный смысл для разных типов поверхностей
124	PMVA	Оператор требует, чтобы значение параметра Param для указанной поверхности было равно заданному
125	ENDX	Оператор служит для ограничения вычисляемой области целевой функции: все последующие операторы игнорируются
126	GOTO	Переход вычислений к указанному номеру оператора
127	CONF	Номер конфигурации
128	PROD	Оператор, вычисляющий произведение двух указанных операторов
129	DIFF	Оператор вычисляет разность значений двух других указанных операторов
130	DIVI	Оператор вычисляет отношение двух указанных операторов
131	OPTH	Длина оптического хода. Это расстояние (в установленных единицах измерения), которое проходит заданный луч от объекта (если объект находится на конечном расстоянии) до указанной поверхности на указанной длине волны; если объект удален на бесконечно большое расстояние
132	RGLA	Оператор ограничивает отклонение показателя преломления, числа Аббе и частной дисперсии: значения этих величин должны соответствовать реальным маркам стекол, содержащимся в одном из текущих (загруженных) каталогов
133	TCGT	Оператор ограничения: значение коэффициента теплового расширения (TCE) для указанной поверхности должно быть больше заданного
134	TCLT	Оператор ограничения: значение коэффициента теплового расширения (TCE) для указанной поверхности должна быть меньше заданного
135	TCVA	Оператор ограничения: значение коэффициента теплового расширения (TCE) для указанной поверхности должна быть равна заданному

Номер	Оператор	Описание
136	XNEA	Минимальная краевая толщина воздушных промежутков для указанной области поверхностей. Этот оператор контролирует краевую толщину в ряде точек по периметру поверхностей и обеспечивает, чтобы для всех точек краевая толщина была не менее заданного значения
137	XNEG	Минимальная краевая толщина стеклянных ($n > 1$) элементов для указанных поверхностей. Этот оператор контролирует краевую толщину в ряде точек по периметру поверхностей и обеспечивает, чтобы для всех точек краевая толщина была не меньше заданного размера
138	XNET	Минимальная краевая толщина для указанных поверхностей. Этот оператор контролирует краевую толщину в ряде точек по периметру всех указанных поверхностей (как стекол, так и воздушных промежутков) и обеспечивает, чтобы для всех точек значение краевой толщины было не меньше заданного
139	XXEA	Максимальная краевая толщина воздушных промежутков между заданными поверхностями
140	XXEG	Максимальная краевая толщина для стеклянных элементов между заданными поверхностями
141	XXET	Максимальная краевая толщина для указанных поверхностей

Математические операторы вместе с параметрическими операторами могут быть использованы для создания сложных (комплексных) операторов оптимизации.

Вклад (контрибуция) K каждого оператора в целевую функцию (в процентах) вычисляется по формуле

$$K = \frac{100W_i(V_i - T_i)^2}{\sum W_i(V_i - T_i)^2}, \quad (2)$$

где индекс i указывает, что суммирование производится по всем операторам, а K вычисляется в процентах.

Анализ значений контрибуций позволяет определить операторы, которые вносят наибольший или наименьший вклад в текущее значение оценочной функции, и используется при корректировке весовых коэффициентов операторов в целевой функции оптимизации.

1.4. Выполнение оптимизации

Выполнение оптимизации может проводиться в различных режимах: автоматически (до наступления некоторого порога, при котором характеристики системы дальше перестают существенно улучшаться); по выбранному количеству циклов оптимизации (1, 5, 10, 50); с бесконечно большим числом циклов оптимизации (вплоть до прерывания процесса путем нажатия на клавишу «Terminate»).

При выполнении расчетов в рамках учебной дисциплины рекомендуется использовать автоматический режим. Время, требуемое на выполнение оптимизации, сильно варьируется в зависимости от числа переменных параметров, сложности системы, числа установок solves, числа введенных операторов и быстродействия компьютера. Solves – это специальные функции, которые позволяют быстро отъюстировать значения параметров. Они могут применяться к кривизне поверхности, толщине, материалам, значениям полудиаметров, значению конической постоянной и к параметрическим данным. В начале процесса оптимизации заново вычисляется целевая функция системы (Merit function). Если какой-либо из операторов не может быть вычислен, то процесс оптимизации не может начаться и на экране появляется сообщение об ошибке. Операторы не могут быть вычислены, если они требуют трассирования лучей, которые идут мимо поверхностей, или которые претерпевают полное внутреннее отражение на поверхностях. Если появляется сообщение о такой ошибке, то обычной причиной является невозможность трассировки лучей через систему. Для преодоления указанной проблемы рекомендуется внести корректировки в исходную оптическую систему или в оценочную функцию.

Использование операторов MTF (таких, как MTFT, MTFS и MTFA) дает возможность прямой оптимизации модуля передаточной функции (MTF), т. е. коэффициента передачи модуляции на различных пространственных частотах. Это очень мощное программное средство, но использование этих операторов требует определенного внимания со стороны пользователя. Для систем, характеристики которых далеки от дифракционного предела, эквивалентными операторами служат операторы

геометрической МПФ: GMTT, GMTS и GMТА. Эти операторы рекомендуется использовать для систем, aberrации которых не превышают от двух до пяти значений основной длины волны. При использовании операторов MTFT и MTFS для одного и того же поля и одной и той же длины волны рекомендуется размещать эти операторы в таблице редактора оценочной функции в соседних строках; в противном случае MTF вычисляется дважды.

Операторы MTF вычисляют общую дифракционную или геометрическую модуляционную передаточную функцию точно такого же вида, как они представляются на графиках, доступ к которым открывается через меню Анализ. Поэтому для таких оптических систем, для которых график MTF будет давать неправдоподобные результаты (из-за низкой точности, обусловленной чрезмерными aberrациями), такие же неточные результаты будут использоваться и при оптимизации. Например, нецелесообразно оптимизировать схему по MTF, стартуя с плоскопараллельной пластинки. Необходимо учитывать, что процесс оптимизация по MTF идет значительно медленнее, чем оптимизация по СКЗ размера пятна рассеяния или оптимизация по СКЗ ошибки волнового фронта, – скорость уменьшается от 5 до 50 раз.

Оптимизации стекол имеет ряд особенностей. Прямая оптимизация с подбором характеристик стекол является трудным и непредсказуемым процессом, так как не существует стекол с непрерывно изменяющимися характеристиками. Существует два способа для решения этой проблемы: с использованием моделей стекол и с использованием замены стекол. Второй способ является предпочтительным и рекомендуется использовать в рамках выполнения практических заданий по учебной дисциплине (при необходимости).

Замена стекол – это последовательный перебор различных марок стекол и переоптимизация системы (с каждым новым стеклом) с целью подбора наиболее подходящего стекла. Смена стекол может быть произведена вручную, а затем с помощью реоптимизации системы можно увидеть, какое стекло дает наилучшее решение. Можно также всю эту процедуру произвести в автоматическом режиме, используя один из режимов глобальной оптимизации: Hammer-оптимизацию. При Hammer-

оптимизации используются только реальные материалы, имеющиеся в каталогах стекол, и в этом смысле это наилучший метод по подбору материалов.

Оптимизация zoom- и мультиконфигурационных систем во многом подобна оптимизации типовых оптических систем (с неизменной конфигурацией), но требует включения в оптимизационную функцию операторов для каждой из конфигураций.

Для уменьшения времени на оптимизацию рекомендуется ограничивать число используемых полей зрения и длин волн. На стадии предварительной разработки системы редко требуется трассировать все лучи для всех длин волн. Тот же эффект в смысле результата оптимизации может быть достигнут при удалении некоторых из этих лучей. Также разумно использовать на ранней стадии небольшое количество полей, например три поля зрения. Имеется несколько других приемов для улучшения работы программы. Рекомендуется избегать установки операторов ограничения на переменные до тех пор, пока в процессе оптимизации сохраняется правдоподобная система. Операторы ограничения добавляют вычислительные трудности. Рекомендуется, когда это возможно, использовать функции «solves» вместо точно определенных операторов. Например, использовать функцию, воздействующую на кривизну поверхности для контроля фокусного расстояния, вместо оператора фокусного расстояния.

Когда целевая функция принимает наименьшее из всех возможных значений для данной системы, то говорят, что достигнут «глобальный» оптимум, и такая система по определению является наилучшей из возможных. Однако пока не известен такой алгоритм оптимизации, который мог бы во всех случаях находить глобальный оптимум, – кроме алгоритма «прямого поиска»: говоря другими словами, необходимо опробовать все бесконечное множество возможных решений, чтобы увидеть наилучшее. Как отмечено в инструкции для пользователей [7], «искусство проектирования оптических схем с помощью компьютера состоит из двух главных компонентов. Во-первых, конструктор должен быть способен определить более или менее подходящую стартовую схему и, во-вторых, он должен играть роль контролера во время процесса оптимизации. Хороший кон-

тролер знает, когда и как вернуться обратно и направить работу программы в более подходящем направлении».

В ходе оптимизации возможны ситуации, когда процесс разработки заходит в тупик, а оптическая система не соответствует требованиям. Преодоление подобных затруднений является главной задачей разработчика оптических систем, а в образовательном аспекте – главным инструментом для формирования профессиональных компетенций магистранта по компьютерным методам проектирования оптических систем.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

2.1. Особенности проектирования оптики приборов ночного видения

Разработчик оптической системы должен хорошо представлять условия работы оптической системы в изделии, приборе, технической системе, комплексе. Поэтому в учебной программе магистратуры, наряду с дисциплиной по проектированию (расчету) оптических систем, предусмотрены дисциплины, направленные на комплексное изучение приборов ночного видения (ПНВ), тепловизионных приборов и др. Некоторые важные с точки зрения проектирования оптических систем аспекты ПНВ рассматриваются ниже.

Приборы ночного видения, пройдя более чем полувековой путь развития и совершенствования, занимают устойчивые позиции в сфере современного оптико-электронного приборостроения, выступая как в качестве самостоятельных приборов, так и в составе многоканальных комплексов [4, 9–15].

В настоящее время многие крупнейшие отечественные предприятия, занимающиеся проектированием и производством оптических и оптико-электронных приборов, имеют в номенклатуре выпускаемой продукции по несколько моделей ПНВ различного назначения, например [16].

Современный прибор ночного видения является классическим примером оптико-электронного прибора, эффективность которого в значительной степени определяется согласованностью характеристик электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и оптической системы прибора.

Большое количество предлагаемых моделей ПНВ обусловлено многообразием применений и задач, решаемых с помощью этого класса приборов: наблюдение и прицеливание для всех видов вооружений [17], гражданские применения, связанные с необходимостью наблюдения при

низких уровнях освещенности наблюдаемой сцены (медицина, биология, охота и пр.) [18].

Каждый разработчик и производитель новой модели ПНВ стремится найти оптимальное сочетание характеристик оптических систем, характеристик ЭОП, конструктивного исполнения и дизайна с целью достижения максимальной эффективности по решаемой задаче и создания конкурентоспособного изделия. Это привело к разнообразию элементной базы, включая оптические системы объективов.

Для создания ПНВ, обеспечивающего наилучшее решение задачи наблюдения объектов при ночной освещенности, необходимо, чтобы в нем между объективом и ЭОП имело место геометрическое, спектральное, энергетическое, абберрационное согласование.

Геометрическое согласование характеристик объектива и ЭОП предполагает соответствие углового поля в пространстве предметов, фокусного расстояния объектива и размера фотокатода ЭОП.

Большинство современных ЭОП имеют рабочий диаметр фотокатода 17,5 или 25 мм [19, 9]. Между угловым полем в пространстве предметов и фокусным расстоянием объектива существует простая зависимость. В табл. 3 для угловых полей от 3 до 60° приведены номинальные значения фокусных расстояний объективов (столбцы 2 и 5) для рабочих диаметров фотокатодов ЭОП 17,5 и 25 мм. Если объектив имеет дисторсию, то для обеспечения указанного в столбце 1 значения углового поля фокусное расстояние объектива должно иметь значение, отличное от номинального. Приняв допустимое значение дисторсии в диапазоне от минус 5 до плюс 5 %, в столбцах 3, 4 и 6, 7 приведены границы диапазонов фокусных расстояний.

Спектральное согласование предполагает, что разработка объектива выполнена с учетом характеристик спектральной чувствительности фотокатода ЭОП. Графики спектральной чувствительности фотокатодов ЭОП второго и третьего поколений приведены во многих источниках (например [9, 20, 21]). Известно, что длина волны, соответствующая максимуму спектрального излучения небесного свода, попадает в спектральный диапазон чувствительности фотокатода GaAs (поколения 3 и 3+). Кроме того, в спектральном диапазоне от 0,6 до 0,9 мкм контраст между природными

фонами и искусственно созданными объектами возрастает по сравнению с контрастом в видимом диапазоне. Выше перечисленные причины вкупе с более высокой чувствительностью ЭОП поколения 3 обеспечивают в ПНВ бóльшие дальности наблюдения.

Таблица 3

Фокусные расстояния объективов в зависимости от угловых полей

Рабочий диаметр фотокатода, мм	17,5			25		
2ω, градус	Номинальное значение фокусного расстояния, мм	Диапазон значений фокусных расстояний с учетом дисторсии, мм		Номинальное значение фокусного расстояния, мм	Диапазон значений фокусных расстояний с учетом дисторсии, мм	
1	2	3	4	5	6	7
3	334,2	318,2	351,7	477,4	454,6	502,5
5	200,4	190,9	211,0	286,3	272,7	301,4
10	100,0	95,3	105,3	142,9	136,1	150,4
15	66,5	63,3	70,0	94,9	90,4	99,9
20	49,6	47,3	52,2	70,9	67,5	74,6
25	39,5	37,6	41,5	56,4	53,7	59,4
30	32,7	31,1	34,4	46,7	44,4	49,1
35	27,8	26,4	29,2	39,6	37,8	41,7
40	24,0	22,9	25,3	34,3	32,7	36,2
45	21,1	20,1	22,2	30,2	28,7	31,8
50	18,8	17,9	19,8	26,8	25,5	28,2
55	16,8	16,0	17,7	24,0	22,9	25,3
60	15,2	14,4	16,0	21,7	20,6	22,8

При расчете объектива ПНВ спектральный диапазон задается набором дискретных длин волн. Определение количества длин волн и задание весовых коэффициентов для каждой длины волны при расчете качества изображения, формируемого объективом, должно адекватно соответствовать спектральной эффективности излучения, попадающего на фотокатод. Последняя, в свою очередь, определяется на основе перемножения кривых

спектральной чувствительности фотокатода, спектрального пропускания объектива, спектрального пропускания слоя атмосферы, расположенного между объектом и объективом прибора, и спектральной характеристики излучения, исходящего от объекта.

При инженерно-технических расчетах практическим правилом проверки адекватности модели может явиться следующий прием: если при изменении набора длин волн и их весовых коэффициентов имеется высокая корреляция в результатах оценки качества изображения, формируемого оптической системой, то модель спектрального согласования выбрана правильно.

Энергетическое согласование предполагает, что физическая светосила объектива такова, что обеспечивает дальность наблюдения, вычисленную по критерию Джонсона. Как известно, применение критерия Джонсона [4] и его модификаций [22] позволяет провести с определенной вероятностью расчет дальности решения различных задач наблюдения (обнаружения, распознавания, идентификации и др.) с помощью оптико-электронных приборов. Однако приборная реализация полученных в соответствии с критерием Джонсона значений дальности решения зрительных задач возможна только в том случае, если облученность изображения объекта, спроецированного объективом на фотокатод ЭОП, будет обеспечивать отношение «сигнал / шум» выше минимального значения, приводимого в характеристиках ЭОП. Поэтому при разработке объективов ПНВ перво-степенное внимание уделяется выбору относительного отверстия объектива и его коэффициенту пропускания излучения рабочего спектрального диапазона.

Анализируя тенденции совершенствования оптических систем объективов, основываясь на патентной литературе, отмечается, что разработчики новых объективов ПНВ наиболее часто в качестве недостатков объективов-аналогов выбирают следующие: низкое относительное отверстие, малое поле зрения, большие масса и длина вдоль оптической оси, появление терморасфокусировки в рабочем диапазоне температур эксплуатации, большое виньетирование наклонных пучков, а также низкое качество изображения, не позволяющее в полной мере реализовать возможности современных ЭОП по пределу разрешения [23–27].

В качестве технического результата при создании новых оптических систем объективов ПНВ наиболее часто авторы изобретений заявляют: повышение относительного отверстия, углового поля, обеспечения термостабильности системы, уменьшение массы, длины, повышение качества изображения, формируемого объективом.

Магистранту, приступающему к разработке оптики ПНВ, рекомендуется ориентироваться на простейшую схему оптики наблюдательного ПНВ, приведенную на рис. 2, включающую объектив 1, инвертирующий ЭОП 2, окуляр 3, блок питания и управления ЭОП 4.

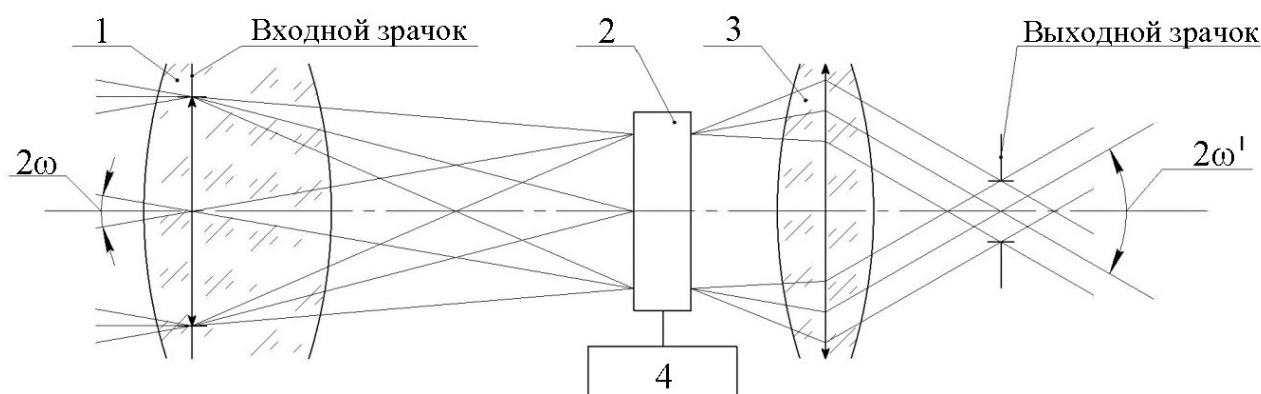


Рис. 2. Схематическое представление ПНВ:

1 – объектив; 2 – инвертирующий ЭОП; 3 – окуляр; 4 – блок питания и управления ЭОП

Исходя из принципа работы ЭОП, магистрант должен понимать, что между пространством предметов и пространством изображений в оптической системе ПНВ отсутствует геометрическая, лучевая связь, т. е. лучи, попавшие в объектив прибора, заканчиваются на фотокатоде ЭОП, а с экрана ЭОП начинаются «новые» лучи. Поэтому входной зрачок прибора (объектива) и выходной зрачок прибора оптически не сопряжены. С точки зрения проектирования оптики ПНВ это означает, что разработка оптики объектива и окуляра осуществляется независимо. Иными словами, не происходит взаимной компенсации aberrаций объектива и окуляра. Последнее утверждение имеет исключение только применительно к дисторсии.

2.2. Критерии качества изображения объективов приборов ночного видения

Оценка качества изображения вновь созданного объектива обычно проводится путем сравнения с наиболее близким по устройству оптической схемы объективом, принятому за прототип. Вопрос о том, насколько качество изображения нового объектива соответствует ЭОП, для применения с которым объектив предназначен, обычно не анализируется.

Вопрос о критериях качества применительно к оптическим системам различных типов является одним из важнейших. В подразделе 1.1 отмечалось, что процесс создания новой оптической системы включает большое число эвристических процедур, и «по сути дела остается искусством» [3]. Это подтверждается еще и тем, что не существует единого критерия, пригодного для оценки качества изображения оптических систем различных типов.

Наиболее известны критерии оценки качества изображения по значениям остаточных аберраций оптических систем, работающих с глазом: телескопических систем наблюдательных приборов (биноклей, зрительных труб, прицелов и др.), оптических систем микроскопов [28], астрономических объективов [29], а также киносъемочных объективов [30, 31], фотообъективов [32]. Что касается группы объективов ПНВ, то для нее числовые значения критериев качества изображения в литературе не сформулированы. Действительно, широко известно, что для оценки качества изображений объективов ПНВ используется частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), но при каких значениях ЧКХ качество изображения, формируемое объективом ПНВ, можно признать «отличным», «хорошим» или «удовлетворительным» не сообщается. Далее предлагается авторский подход к обоснованию рейтинговой системы по указанному критерию [33].

В качестве характеристики по пространственному разрешению производители ЭОП обычно указывают предел разрешения. Значения предела разрешения для ЭОП поколений 2+ и 3, серийно выпускаемых АО «Катод» [19], приведены в табл. 4. В краткой характеристике ЭОП приведены сведения об инвертировании (оборачивании) изображения, наличии волоконно-оптического элемента (ВОЭ) и конструктивном исполнении выхода последнего или об отсутствии ВОЭ (стеклянный вход/выход). Также при-

ведены сведения о рабочем диаметре фотокатода, типе фотокатода и пределе разрешения ЭОП, соответствующего параметрам Ф, С, А, Б или В.

Таблица 4

Предел разрешения ЭОП

Тип ЭОП / Поколение / Краткая характеристика	Рабочий диаметр фотокатода, мм	Тип фотока- тода	Предел разрешения N , лин/мм для параметра				
			Ф	С	А	Б	В
ЭПМ132Г Поколение 2+ / инвертирующий, ВОЭ с плоским или вогнутым вы- ходом; неинвертирующий, ВОЭ с плоским или вогнутым выходом; стеклянный вход/выход	17,5	S-25	–	64	57	51	45
ЭПМ120Г Поколение 2+ / инвертирующий, ВОЭ с плоским выходом; неин- вертирующий, ВОЭ с плоским вы- ходом; стеклянный вход/выход	25	S-25	–	64	57	51	–
ЭПМ102Г, ЭПМ101Г / Поколение 3 / инвертирующий, ВОЭ с плоским или вогнутым вы- ходом; неинвертирующий, ВОЭ с плоским или вогнутым выходом; стеклянный вход/выход	17,5	GaAs	68	64	60	57	–

Значения предела разрешения лежат в диапазоне от 68 до 51 лин/мм в зависимости от параметров Ф, С, А, Б или В, при этом для поколения 2+ наибольший предел разрешения составляет 64 лин/мм (параметр С), для поколения 3 – 68 лин/мм (параметр Ф).

Приведенные в табл. 4 параметры характеризуют типовой (серийный) уровень выпускаемых ЭОП. В [9, с. 201] отмечается, что американские производители прекратили совершенствование ЭОП 2+ поколения еще в конце 1980-х гг. и основное внимание уделяют совершенствованию ЭОП 3 и 3+ поколений. Предел разрешения, соответствующий современному уровню ЭОП 3 поколения, составляет 84 лин/мм, а ЭОП 3+ поколения – 90 лин/мм.

В соответствии с [34], под пределом разрешения N ЭОП понимается наибольшее число штрихов в одном миллиметре изображения миры на

входе ЭОП, которые на выходе различаются отдельно по четырем направлениям при оптимальных для глаза условиях наблюдения (яркости экрана и увеличении окулярной оптики).

В работе [18, с. 221] для ЧКХ ЭОП предложено выражение, полученное в результате аппроксимации экспериментальных данных по измерению ЧКХ:

$$T(\omega) = \exp\left(-\frac{\omega^2}{4a^2}\right), \quad (3)$$

где $T(\omega)$ – коэффициент передачи контраста; $\omega = 2\pi\nu$ – пространственная частота ν , умноженная на 2π [19, с. 65]; a – параметр, зависящий от характеристик ЭОП.

Выражение (3), записанное как функция от пространственной частоты ν , имеет вид

$$T(\nu) = \exp\left(-\frac{\pi^2\nu^2}{a^2}\right) \quad (4)$$

и будет использовано далее для расчета ЧКХ ЭОП. В [35] приведено выражение для ЧКХ, более точно описывающее характер ЧКХ на низких и средних пространственных частотах для ЭОП поколения 3 и 3+.

Для вычисления параметра a по значению предела разрешения N примем коэффициент передачи контраста равным пороговому контрасту $K_{\text{пор}}$ глаза наблюдателя. В [35] указано, что при коммерческих (производственных) измерениях контраст составляет от 5 до 10 %, хотя пороговое значение контраста может достигать 1 %. В [9, с. 211] отмечается, что при измерениях предела разрешения контраст миры на экране ЭОП составляет от 3 до 5 %. Далее для расчетов значение порогового контраста принято равным 4 %. В табл. 5 приведены значения параметра a ЭОП, соответствующего параметрам Ф, С, А, Б и В [19], а также пределам разрешения 84 и 90 лин/мм, вычисленные как

$$a = \frac{\pi N}{\sqrt{-\ln K_{\text{пор}}}}. \quad (5)$$

Значение параметра a для различных ЭОП

Поколение ЭОП	Значение параметра a , лин/мм в формуле (2)						
	для серийных ЭОП с различными параметрами [12]					для предела разрешения ЭОП [1], лин/мм	
	Ф	С	А	Б	В	84	90
2+	–	112,07	99,81	89,30	78,80		
3	119,07	112,07	105,06	99,81	–	147,09	
3+						147,09	157,59

На рис. 3 приведены смоделированные в соответствии с формулой (2) графики ЧКХ ЭОП, имеющих пределы разрешения 68, 64, 60, 57, 51, 45 (Ф, С, А, Б, В [19]), 84 и 90 лин/мм. Пунктирной линией показан уровень порогового контраста $K_{\text{пор}}$, по которому определяется предел разрешения N для каждого из ЭОП.

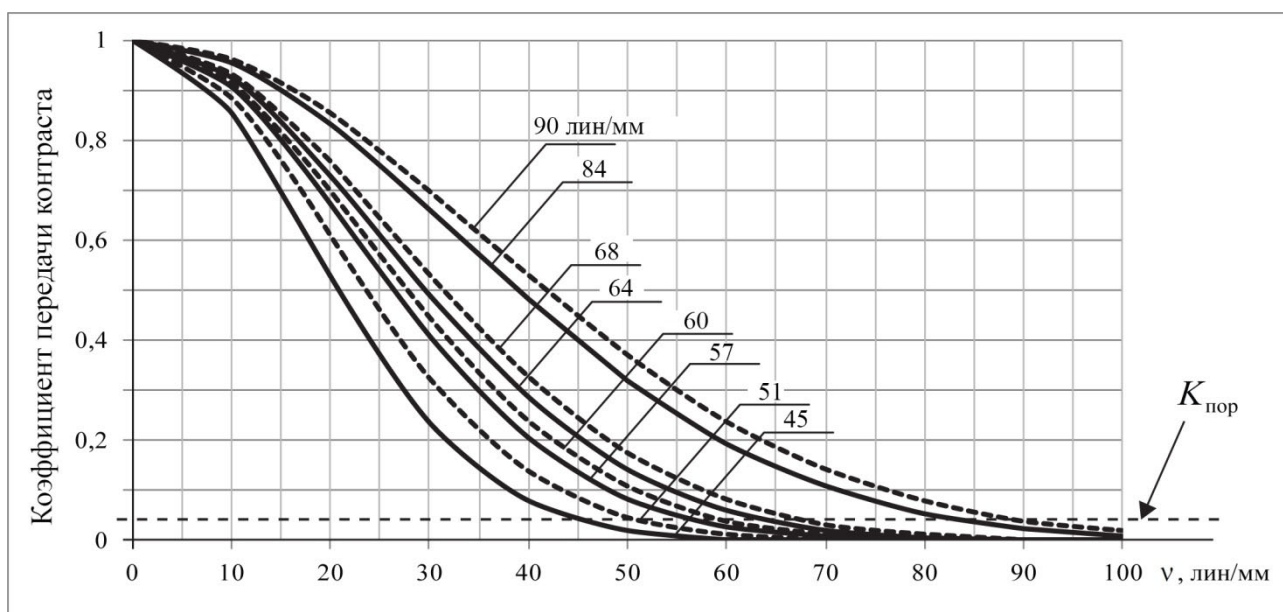


Рис. 3. Графики ЧКХ ЭОП, рассчитанные по формуле (2), для различных значений пределов разрешения

На основе свойства мультипликативности выражение для ЧКХ ПНВ записывается как произведение ЧКХ его составляющих

$$T(v)_{\text{ПНВ}} = T(v)_{\text{ЭОП}} \cdot T(v)_{\text{ОБ}} \cdot T(v)_{\text{ОК}}, \quad (6)$$

где $T(v)_{\text{ПНВ}}$ – ЧКХ ПНВ; $T(v)_{\text{ЭОП}}$ – ЧКХ ЭОП; $T(v)_{\text{ОБ}}$ – ЧКХ объектива;
 $T(v)_{\text{ОК}}$ – ЧКХ окулярной части ПНВ.

Для обоснования требований к объективу ПНВ далее рассматривается составляющая $T(v)_{\text{ЭОП+ОБ}}$, выделенная из выражения (6), характеризующая совместное влияние ЭОП и объектива на ЧКХ ПНВ

$$T(v)_{\text{ЭОП+ОБ}} = T(v)_{\text{ЭОП}} \cdot T(v)_{\text{ОБ}}. \quad (7)$$

Определим значения ЧКХ, которым должен обладать объектив, чтобы при использовании его совместно с ЭОП, имеющим предел разрешения N , предел разрешения системы «ЭОП + объектив» составил kN (здесь k меньше 1). Графики, приведенные на рис. 4, иллюстрируют способ вычисления требуемого значения ЧКХ объектива на его наибольшей рабочей пространственной частоте. На графиках рис. 4 учтено, что определение предела разрешения проводится по мере абсолютного контраста, при этом значения контраста изображения и коэффициента передачи контраста становятся равными.

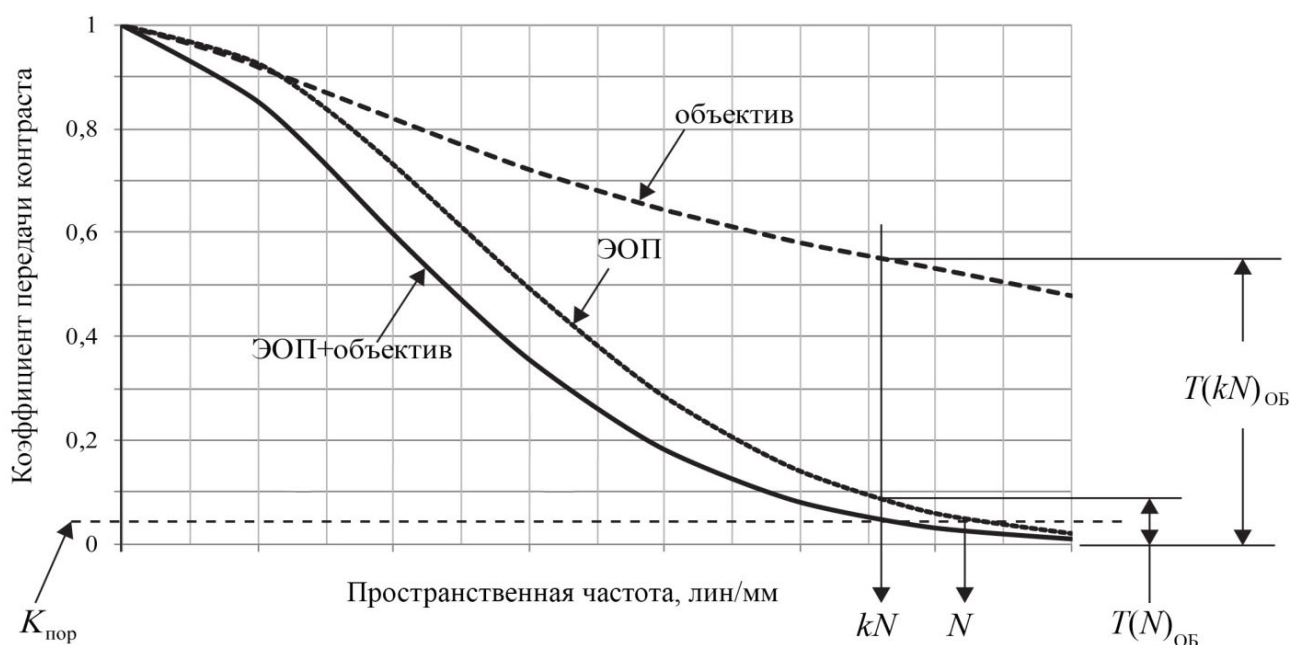


Рис. 4. Способ вычисления значения ЧКХ объектива на наибольшей рабочей пространственной частоте

Условие, при котором коэффициент передачи контраста на пространственной частоте kN для системы «объектив + ЭОП» будет равен пороговому контрасту, будет иметь вид

$$K_{\text{пор}} = T(kN)_{\text{ЭОП+ОБ}} = T(kN)_{\text{ЭОП}} \cdot T(kN)_{\text{ОБ}}. \quad (8)$$

Принимая во внимание (4), из (8) получим выражение для расчета коэффициента передачи контраста объектива на пространственной частоте kN

$$T(kN)_{\text{ОБ}} = K_{\text{пор}} \exp\left(\frac{\pi kN}{a}\right)^2. \quad (9)$$

В табл. 6 приведены расчетные значения $T(kN)_{\text{ОБ}}$ для различных N и k .

Таблица 6

Результаты расчета по формуле (9)

N , лин/мм	k	kN , лин/мм	$T(kN)_{\text{ОБ}}$
90	0,9	81,0	0,54
	0,8	72,0	0,31
	0,7	63,0	0,19
84	0,9	75,6	0,54
	0,8	67,2	0,31
	0,7	58,8	0,19
72	0,9	64,8	0,54
	0,8	57,6	0,31
	0,7	50,4	0,19
68	0,9	61,2	0,54
	0,8	54,4	0,31
	0,7	47,6	0,19
64	0,9	57,6	0,54
	0,8	51,2	0,31
	0,7	44,8	0,19
60	0,9	54,0	0,54
	0,8	48,0	0,31
	0,7	42,0	0,19
57	0,9	51,3	0,54
	0,8	45,6	0,31
	0,7	39,9	0,19
51	0,9	45,9	0,54
	0,8	40,8	0,31
	0,7	35,7	0,19
45	0,9	40,5	0,54
	0,8	36,0	0,31
	0,7	31,5	0,19

Анализ результатов, приведенных в табл. 6, наглядно показывает, что требуемое значение коэффициента передачи контраста объектива для пространственной частоты, составляющей k -ю часть от предела разрешения N ЭОП, не зависит от N , т. е. принимает для ЭОП с любым значением предела разрешения для равных k одинаковые значения. Действительно, преобразование (9) с учетом (5) приводит к виду

$$T(kN)_{\text{ОБ}} = K_{\text{пор}} \exp(-k^2 \cdot \ln K_{\text{пор}}),$$

который подтверждает зависимость требований к объективу только от принятого снижения разрешения системы «ЭОП + объектив»: для снижения предела разрешения не более чем на 10 % ($k = 0,9$) по сравнению с пределом разрешения ЭОП, требуется объектив, обеспечивающий на пространственной частоте kN коэффициент передачи контраста не менее 0,54; для снижения предела разрешения не более чем на 20 % ($k = 0,8$) требуется объектив, обеспечивающий на пространственной частоте kN коэффициент передачи контраста не менее 0,31; для снижения предела разрешения не более чем на 30 % ($k = 0,7$) требуется объектив, обеспечивающий на пространственной частоте kN коэффициент передачи контраста не менее 0,19.

Полученный вывод положен в основу предлагаемого критерия качества изображения объектива по пространственному разрешению (рис. 5): если предел разрешения в системе «объектив + ЭОП» снизился не более чем на 10 % по сравнению с пределом разрешения ЭОП, то качество изображения считается «отличным»; если снижение – от 10 до 20 %, то качество изображения считается «хорошим»; если снижение – от 20 до 30 %, то качество изображения считается «удовлетворительным»; если снижение – более 30 %, то объектив имеет недопустимо низкое качество изображения.

Дополнительно к приведенным на рис. 5 критериям рекомендуется добавить требование к дисторсии: для объективов ПНВ с отличным качеством по пределу разрешения – менее 1 %; с хорошим качеством – менее 5 %; с удовлетворительным качеством – не более 8 %.

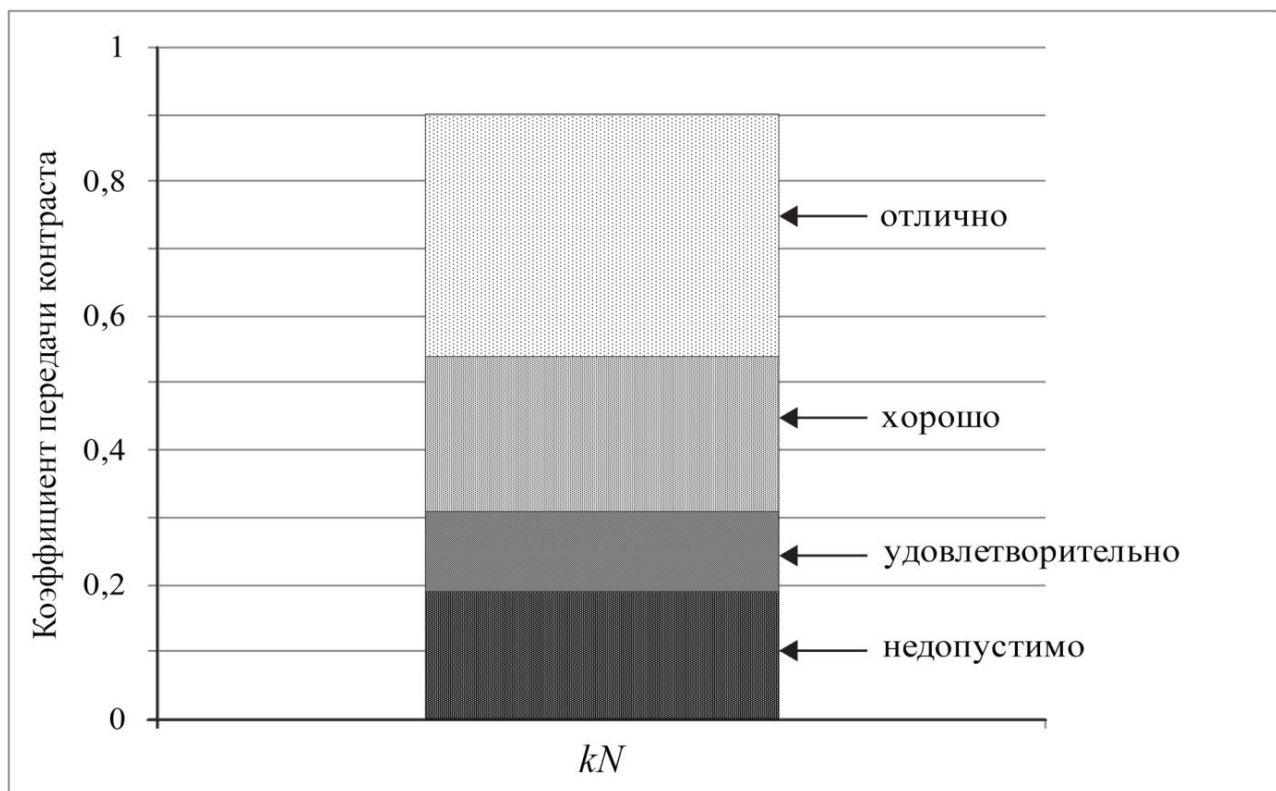


Рис. 5. Критерий оценки качества изображения объектива ПНВ по значению коэффициента передаче контраста на пространственной частоте kN :

$k \geq 0,9$ («отлично»); $0,8 \leq k < 0,9$ («хорошо»); $0,7 \leq k < 0,8$ («удовлетворительно»); $k < 0,7$ («недопустимо»)

В качестве иллюстрации приводится оценка качества изображения объектива ПНВ, имеющего фокусное расстояние 80 мм, относительное отверстие 1 : 1,5 [36], предназначенного для работы совместно с ЭОП 3 поколения, имеющего предел разрешения 64 лин/мм (типа ЭПМ102Г, параметр С [19]). На рис. 6 приведены сечения ЧКХ объектива по полю изображения в плоскости фотокатода ЭОП для трех пространственных частот: частота 1 – 10 лин/мм; частота 2 – 20 лин/мм; частота 3 – 57,6 лин/мм. Значение последней пространственной частоты выбрано как 0,9 от предела разрешения ЭОП. В центре поля зрения коэффициент передачи контраста для частоты 10 лин/мм составляет 0,90; для частоты 20 лин/мм – 0,80; для частоты 57,3 лин/мм – 0,54.

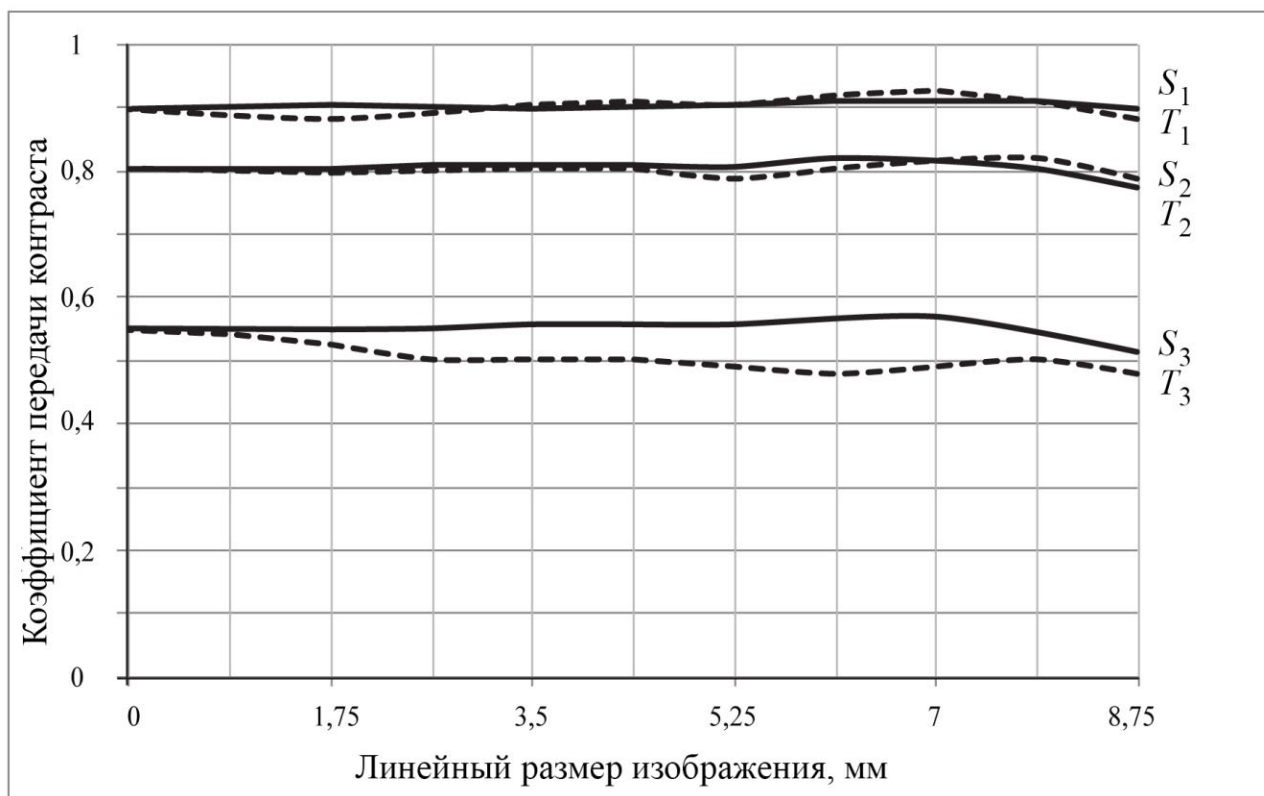


Рис. 6. Сечения ЧКХ по полю изображения:

S – сагиттальное; T – меридиональное сечения. Индексы соответствуют номеру пространственной частоты: 1 – 10 лин/мм; 2 – 20 лин/мм; 3 – 57,6 лин/мм

Графики, представленные на рис. 6, демонстрируют практически одинаковое качество изображения по всему полю изображения. Дисторсия объектива на краю поля составляет 1,2 %.

Согласно предлагаемому критерию качество объектива можно оценить как отличное. Действительно, по результату перемножения ЧКХ ЭОП и ЧКХ объектива, графически проиллюстрированному на рис. 7, предел разрешения системы «объектив + ЭОП» равен 57,6 лин/мм, что составляет 0,9 от предела разрешения ЭОП и соответствует оценке «отлично».

Таким образом, использование указанного критерия позволяет объективно подойти к оценке эффективности применения конкретного объектива при создании нового или модернизации существующего ПНВ.

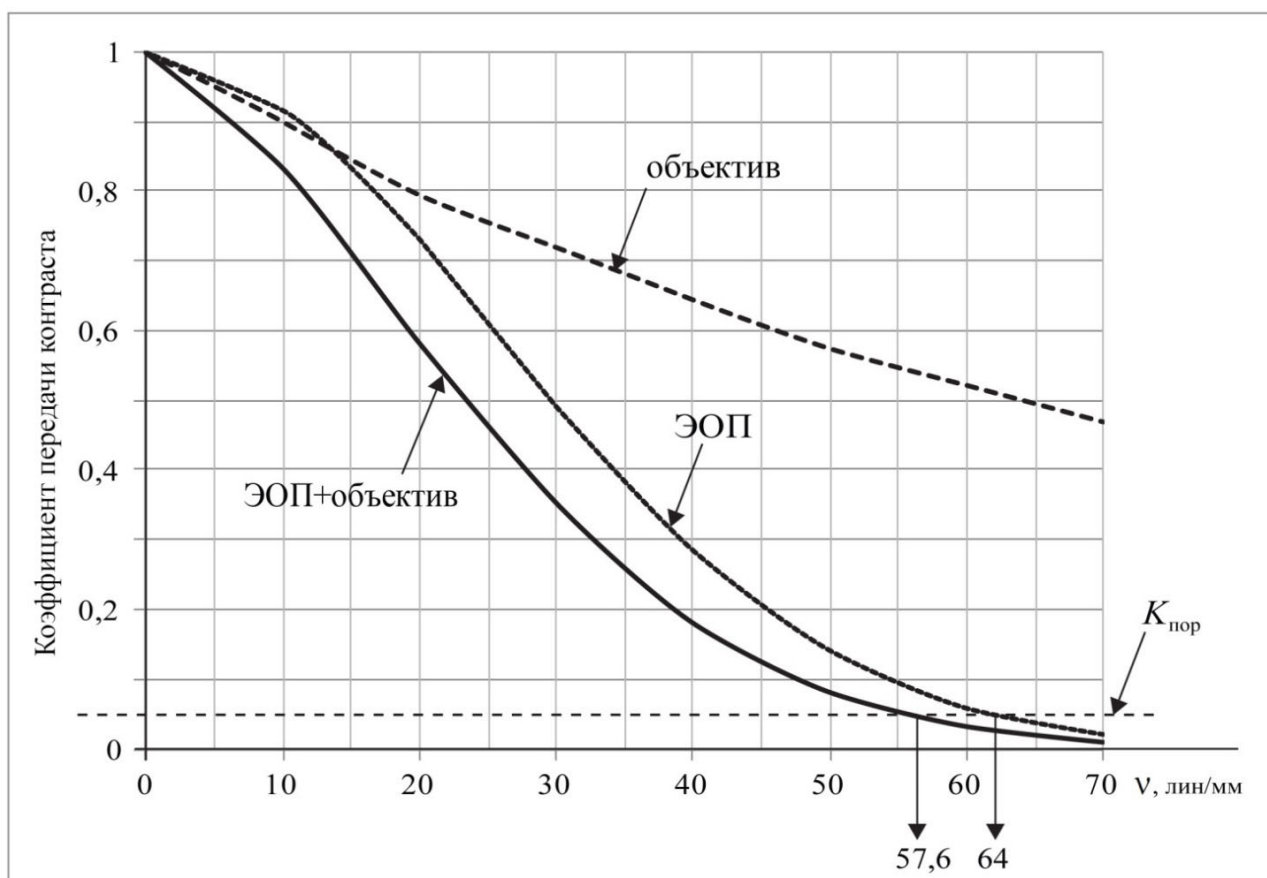


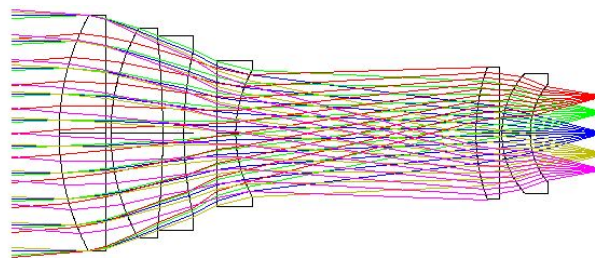
Рис. 7. Определение предела разрешения системы «объектив + ЭОП» в рассмотренном примере

2.3. Проектирование оптической системы объектива приборов ночного видения

2.3.1. Варианты оптических систем объективов приборов ночного видения

Учитывая отсутствие у магистранта собственных наработок, ему в помощь для выбора стартовой системы далее приводятся десять вариантов оптических систем объективов ПНВ, отобранных из патентных и научно-технических источников и специально для данного учебника представленных в виде копий окон редактора оптической системы (рис. 8–17).

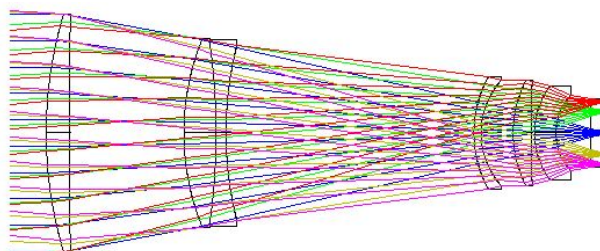
Фокусное расстояние 100 мм
 Угловое поле 9°
 Относительное отверстие 1:2
 Спектральный диапазон 0,6–0,9 мкм
 Основная длина волны 0,78 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1 Стандартная	бесконечность	10.000000		26.283009
* Стандартная	52.720000	10.000000	TK21	25.001949 U
3* Стандартная	бесконечность	1.000000		24.339014 U
4* Стандартная	44.980000	11.000000	TK21	22.247309 U
5* Стандартная	-183.650000	4.500000	TF5	20.657601 U
6* Стандартная	77.980000	7.000000		17.788056 U
7* Стандартная	бесконечность	4.000000	TF5	15.405478 U
8* Стандартная	27.350000	51.000000		13.454500 U
9* Стандартная	42.070000	5.000000	TK21	14.000000 U
10* Стандартная	бесконечность	0.500000		13.814180 U
11* Стандартная	18.967000	6.000000	TK21	12.737789 U
12* Стандартная	16.293000	15.620063		10.526493 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		7.824365

Рис. 8. Объектив ПНВ [37]

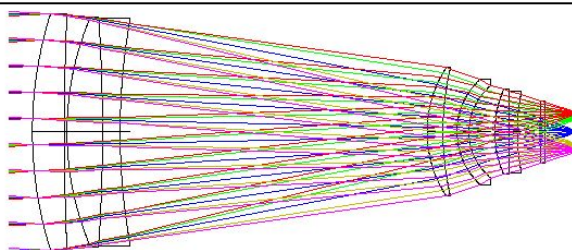
Фокусное расстояние 116 мм
 Тип ЭОП: ЭПМ44Г
 Диаметр фотокатода 18 мм
 Диаметр входного зрачка 66,6 мм
 Спектральный диапазон 0,6–0,9 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
* Стандартная	115.880000	6.500000	TK21	33.300000
2* Стандартная	2051.000000	32.100000		33.081183
3* Стандартная	70.310000	9.000000	CTK3	26.500000 U
4* Стандартная	-187.070000	2.800000	TF10	26.141128
5* Стандартная	100.690000	69.500000		24.727579
6* Стандартная	32.542000	2.000000	K8	15.633508
7* Стандартная	22.230000	9.000000		14.697985
8* Стандартная	32.542000	5.000000	TK21	14.871742
9* Стандартная	304.800000	1.000000		14.550803
10* Стандартная	22.230000	6.000000	TF10	13.172969
11* Стандартная	15.488000	9.575700	V	10.488398
12* Стандартная	бесконечность	5.500000	LK3	9.578523
IMA Стандартная	бесконечность	-		8.969415

Рис. 9. Объектив ПНВ [38, с. 320]

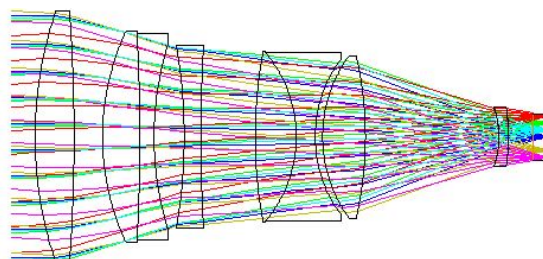
Фокусное расстояние 301 мм
 Угловое поле 6°
 Относительное отверстие 1:1,5
 Спектральный диапазон 0,589–0,9 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1 Стандартная	бесконечность	20.000000		101.855173
* Стандартная	332.400000	27.000000	LZ_K8	100.000001
3* Стандартная	2208.000000	2.300000		99.014145
4 Стандартная	246.600000	30.100000	LZ_K8	97.310295
5* Стандартная	-1412.500000	14.900000	LZ_TF10	95.962940
6* Стандартная	537.000000	260.000000		91.912425
7* Стандартная	98.860000	13.400000	LZ_K8	54.193190
8* Стандартная	234.400000	12.000000		53.179933
9* Стандартная	60.810000	10.000000	LZ_TF10	44.538393
10* Стандартная	50.350000	22.000000		38.955880
11* Стандартная	90.990000	12.000000	LZ_K8	35.998982
12* Стандартная	9290.000000	7.000000	LZ_TF10	34.503533
13 Стандартная	168.000000	20.000000		31.811899
14* Стандартная	бесконечность	3.800000	LZ_K8	26.176034
15* Стандартная	бесконечность	28.414375 М		25.363776
IMA Стандартная	бесконечность	-		15.921923

Рис. 10. Объектив ПНВ [25, с. 259]

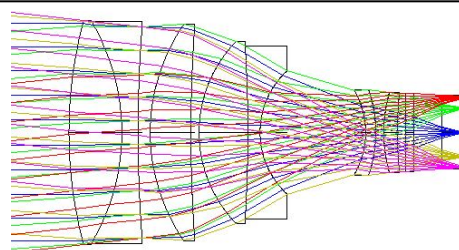
Фокусное расстояние 168 мм
 Диаметр входного зрачка 102 мм
 Тип фотокатода ЭОП: GaAs
 Диаметр фотокатода ЭОП 18 мм
 Спектральный диапазон 0,546–0,9 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1* Стандартная	163.680000	16.400000	TK21	52.979680 U
2* Стандартная	-746.400000	12.000000		52.440656 U
* Стандартная	104.230000	15.700000	TK21	44.608058 U
4* Стандартная	-809.100000	6.000000	TF5	43.459813 U
5* Стандартная	132.130000	12.700000		39.614433 U
6* Стандартная	-223.900000	7.000000	TF5	38.452431 U
7* Стандартная	623.700000	22.900000		38.153413 U
8* Стандартная	194.540000	17.300000	BK10	35.764560 U
9* Стандартная	-55.340000	8.000000	OF6	35.574436 U
10* Стандартная	55.340000	3.100000		33.194050 U
11* Стандартная	57.810000	18.000000	TK21	34.168239 U
12* Стандартная	-151.690000	56.240000		33.943800 U
13* Стандартная	-37.840000	4.000000	K8	12.602014 U
14* Стандартная	-80.100000	10.208000		12.243596 U
15* Стандартная	бесконечность	7.600000	K8	9.695540 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		9.042832

Рис. 11. Объектив ПНВ [39]

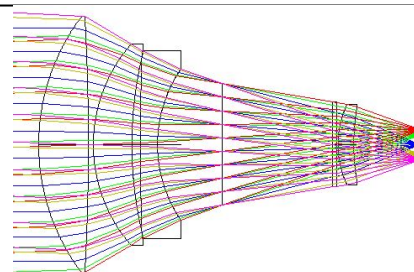
Фокусное расстояние 80 мм
Относительное отверстие 1:1,5
Спектральный диапазон соответствует
ЭПМ52Г, ЭПМ53
Диаметр фотокатода 18 мм
А.д. – поверхность 3



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ	Стандартная	бесконечность		бесконечность
1*	Стандартная	105.930000	TK21	27.463994
2*	Стандартная	-53.210000	TBF25	27.132446
*	Стандартная	341.485000		25.874627
4*	Стандартная	46.453000	TK21	26.448107
5*	Стандартная	366.850000		25.845344
6*	Стандартная	31.820000	CTK9	22.384097
7*	Стандартная	-341.485000	TF4	21.151860
8*	Стандартная	20.510000		15.144321
9*	Стандартная	-20.510000	TK21	10.196260
10*	Стандартная	-31.998000		10.419485
11*	Стандартная	36.320000	TF10	9.855544
12*	Стандартная	86.698000		9.646427
13*	Стандартная	бесконечность	CTK9	9.554200
14*	Стандартная	бесконечность		9.481308
15*	Стандартная	бесконечность	LK3	9.045944
IMA	Стандартная	бесконечность	-	8.807558

Рис. 12. Объектив ПНВ [40]

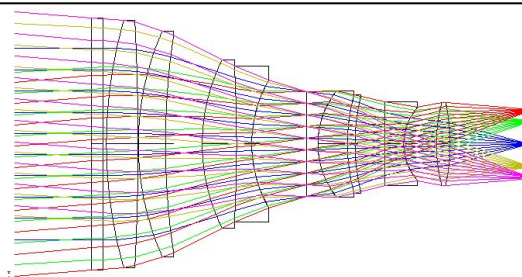
Фокусное расстояние 180 мм
Относительное отверстие от 1:1,3 до 1:1,5
Спектральный диапазон 0,52–0,92 мкм
Основная длина волны 0,656 мкм



Тип поверхности	Радиус		Толщина		Стекло	Полудиаметр
OBJ	Стандартная	бесконечность	бесконечность			бесконечность
1*	Стандартная	бесконечность	20.000000			77.591092
2*	Стандартная	124.740000	29.000000		TK16	75.393952
3*	Стандартная	-1355.20000	2.900000			74.923705
4*	Стандартная	90.360000	22.500000		СТК3	59.170104
5*	Стандартная	228.000000	4.950000			54.401946
6*	Стандартная	1592.200000	10.000000		TF10	55.183553
7*	Стандартная	79.070000	37.500000			44.182642
*	Стандартная	бесконечность	64.800000			35.650000
9*	Стандартная	бесконечность	2.000000		K8	24.864092
10*	Стандартная	бесконечность	1.000000			24.646742
11*	Стандартная	55.210000	9.200000		СТК3	23.598521
12*	Стандартная	128.230000	38.501284		M	21.952353
13*	Стандартная	бесконечность	-0.065000			8.934787
IMA	Стандартная	бесконечность	-			8.904406

Рис. 13. Объектив ПНВ [41, с. 188]

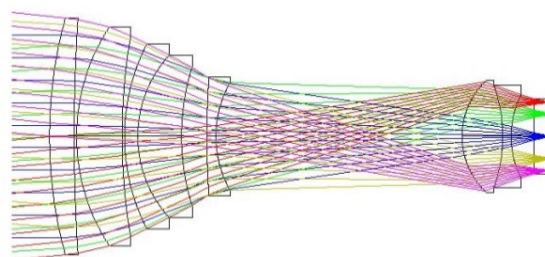
Фокусное расстояние 100 мм
 Диаметр фотокатода ЭОП 17,5 мм
 Тип фотокатода: GaAs
 Относительное отверстие 1 : 2
 Спектральный диапазон 0,6–0,9 мкм



Тип поверхности	Комментарий	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ	Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1*	Стандартная	бесконечность	3.000000	1.52, 64.2 V	33.078346
2*	Стандартная	бесконечность	1.000000		32.910366
3*	Стандартная	ZBAF3 117.220000	8.300000	1.66, 51.2 V	32.436891
4*	Стандартная	-636.800000	0.100000		31.958606
5*	Стандартная	ZK9 73.000000	7.120000	1.62, 60.4 V	29.684230
6*	Стандартная	193.020000	9.660000		28.613336
7*	Стандартная	QK3 49.320000	9.020000	1.49, 70.0 V	22.055626
8*	Стандартная	ZF6 -384.000000	4.000000	1.76, 27.5 V	20.386646
9*	Стандартная	33.717000	14.360000		16.721355
*	Стандартная	бесконечность	3.030000		13.777274
11*	Стандартная	K10 22.280000	7.770000	1.52, 59.0 V	14.010846
12*	Стандартная	QK3 48.750000	2.010000	1.49, 70.0 V	12.918016
13*	Стандартная	53.740000	7.770000		12.501468
14*	Стандартная	QK3 1235.900000	5.000000	1.49, 70.0 V	10.987544
15*	Стандартная	14.452000	8.600000		9.600204
16*	Стандартная	QF3 43.136000	3.580000	1.58, 41.5 V	10.837905
17*	Стандартная	-51.500000	21.200000 V		10.864453
IMA	Стандартная	бесконечность	-		9.028629

Рис. 14. Объектив ПНВ [42]

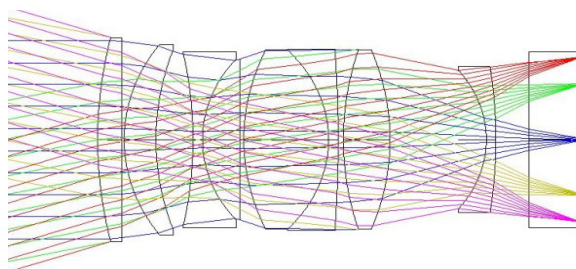
Фокусное расстояние 100 мм
 Угловое поле 11,4°
 Относительное отверстие 1 : 1,85
 Спектральный диапазон 0,6–0,9 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1*	119.310000	6.570000	1.62, 63.4 V	31.802653
2*	485.620000	0.650000		31.260336
3*	52.817000	12.130000	1.62, 63.4	29.292428
4*	156.400000	0.650000		27.121154
5*	53.877000	3.520000	1.80, 25.5	24.806486
6*	32.007000	11.670000	1.70, 55.5	21.679298
7*	61.614000	6.780000		18.599428
*	243.470000	2.410000	1.59, 35.5	15.687231
9*	29.356000	65.600000		14.438848
10*	20.254000	10.850000	1.77, 49.6	15.000000 U
11*	-40.175000	2.260000	1.69, 31.2	13.801513
12*	24.872000	6.150000 V		11.051661
13*	бесконечность	5.090000	1.50, 65.1	9.984755
IMA	бесконечность	-		9.085099

Рис. 15. Объектив ПНВ [43, пример 1]

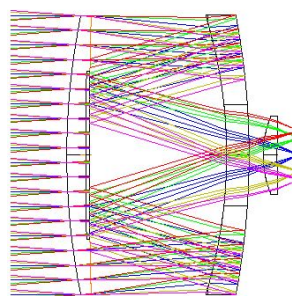
Фокусное расстояние 27 мм
 Угловое поле 40°
 Диаметр фотокатода 18 мм
 Относительное отверстие:
 регулируемое от 1 : 1,2 и менее
 Спектральный диапазон 0,6–0,9 мкм
 Основная длина волны 0,7 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1* Стандартная	50.000000	2.300000	1.70, 48.5	11.000000 U
2* Стандартная	бесконечность	0.200000		11.000000 U
3* Стандартная	17.500000	3.000000	1.72, 50.4	10.300000 U
4* Стандартная	29.700000	3.500000		9.800000 U
5* Стандартная	-47.900000	0.900000	1.65, 33.8	9.500000 U
6* Стандартная	13.500000	3.500000		8.700000 U
* Стандартная	бесконечность	0.400000		8.700000 U
8* Стандартная	23.700000	8.000000	1.74, 44.9	9.700000 U
9* Стандартная	-14.000000	0.900000	1.80, 25.5	9.700000 U
10* Стандартная	-160.200000	0.500000		9.800000 U
11* Стандартная	34.000000	4.400000	1.72, 50.4	9.700000 U
12* Стандартная	-27.500000	9.100000		9.700000 U
13* Стандартная	-11.900000	0.900000	1.52, 64.2	7.500000 U
14* Стандартная	-55.600000	3.100000		7.900000 U
15* Стандартная	бесконечность	5.300000	1.49, 70.4	9.500000 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		9.158565

Рис. 16. Объектив ПНВ [44]

Фокусное расстояние 119,4 мм
 Диаметр фотокатода 17,5 мм
 Диаметр входного зрачка 100/60
 Спектральный диапазон 0,546–0,9 мкм
 Геометрическое относительное отверстие 1 : 1,2
 Эффективное относительное отверстие 1 : 1,5



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
* Стандартная	250.000000	8.000000	LZ_K8	50.000000 U
2* Стандартная	1812.460000	49.000000		50.000000 U
3* Стандартная	-170.220000	8.000000	LZ_K8	49.218585
4* Стандартная	-266.680000	-8.000000	MIRROR	50.160440
5* Стандартная	-170.220000	-49.000000		47.210773
6* Стандартная	1812.460000	49.000000	MIRROR	30.000000 U
7* Стандартная	-170.220000	8.000000	LZ_K8	18.127836
8* Стандартная	-266.680000	5.000000		16.622181
9* Стандартная	36.000000	5.000000	LZ_K8	13.999920
10* Стандартная	469.900000	8.018905 M		13.176798
11* Стандартная	бесконечность	-0.040000		8.838878
IMA Стандартная	бесконечность	-		8.846157

Рис. 17. Объектив ПНВ [45]

Ход осевых и наклонных пучков лучей в оптических схемах, приведенных на рис. 8–17, свидетельствует о том, что в ряде оптических схем имеет место виньетирование наклонных пучков. Виньетирование позволяет исключить из наклонных пучков лучи, приводящие к большим значениям поперечных аберраций, и повысить качество изображения по полю, несколько снизить массу линз объектива и улучшить их дизайн и технологичность. Однако одновременно наличие виньетирования приводит к падению освещенности к краю поля зрения. Поэтому подходить к введению виньетирования в объективах ПНВ рекомендуется как к компромиссному приему на основе комплексного анализа технических характеристик разрабатываемой оптической системы.

При анализе оптических систем, информация о которых содержится в литературных и патентных источниках, необходимо принимать во внимание, что задание оптических свойств материалов линз не марками стекол, а только показателями преломления и коэффициентами средней дисперсии (как, например, в объективах, приведенных на рис. 14–16), не гарантирует при проверочном расчете достижение заявленных авторами показателей качества, а дает только представление о дизайне оптической системы и характеризует заявленные авторами соотношения между оптическими силами компонентов и пр. Вместе с тем такие системы вполне могут служить стартовыми для типовых разработок оптических систем в учебных целях.

Некоторая дополнительная информация по оптическим схемам:

- объектив [39] рассчитан для спектральной чувствительности фотокатода ЭОП третьего поколения;
- объектив [44] предназначен для ПНВ нулевого поколения, имеющих фотокатод сферической формы. Апертурная диафрагма находится на пятой поверхности по ходу лучей;
- в объективе [45] приняты следующие коэффициенты спектральной эффективности: для длины волны 0,546 мкм – 0,8; для длины волны 0,656 мкм – 1; для длины волны 0,900 мкм – 0,1;
- в объективе [43] апертурная диафрагма находится на восьмой поверхности.

2.3.2. Задание на проектирование оптической системы объектива

В качестве примера предлагается рассмотреть следующее задание на проектирование оптической системы объектива ПНВ:

- угловое поле в пространстве предметов 12 градусов;
- относительное отверстие 1 : 1,6;
- объектив предназначен для использования с ЭОП третьего поколения, имеющим предел разрешения 64 лин/мм;
- оптическая схема объектива должна обеспечивать снижение предела разрешения системы «объектив + ЭОП» не более 10 % от предела разрешения ЭОП для центра поля зрения.

При диаметре фотокатода 17,5 мм для обеспечения требуемого углового поля фокусное расстояние объектива должно составлять 80 мм.

Для спектрального согласования разрабатываемого объектива с ЭОП необходимо учитывать спектральную характеристику фотокатода ЭОП. Для удобства пользования, применительно к учебным расчетам объективов ПНВ, на рис. 18 приведены обобщенные графики относительной спектральной чувствительности фотокатодов S-20, S-25, Super S-25 и фотокатодов на основе GaAs [9, 25, 46–48]. В [9] информация о спектральной чувствительности фотокатодов на основе GaAs приведена в нормированной табличной форме. График GaAs на рис. 18 показан в соответствии с [9]. При этом графики на рис. 18 специально показаны таким образом, что для каждого из них максимальное значение относительной спектральной чувствительности равно единице. Такой вид удобен для их использования при расчете объективов, так как позволяет определить относительные коэффициенты эффективности для расчетных длин волн при расчете объектива для конкретного типа фотокатода ЭОП.

На этапе предварительных расчетов объектива для ЭОП с фотокатодом на основе GaAs можно принять коэффициенты эффективности для расчетных длин волн равными единице. На этапе заключительных расчетов можно задать следующие коэффициенты спектральной эффективности: для 0,81 мкм – 1, для 0,6 мкм – 0,78; для 0,7 мкм – 0,91; для 0,85 мкм – 0,9; для 0,9 мкм – 0,1.

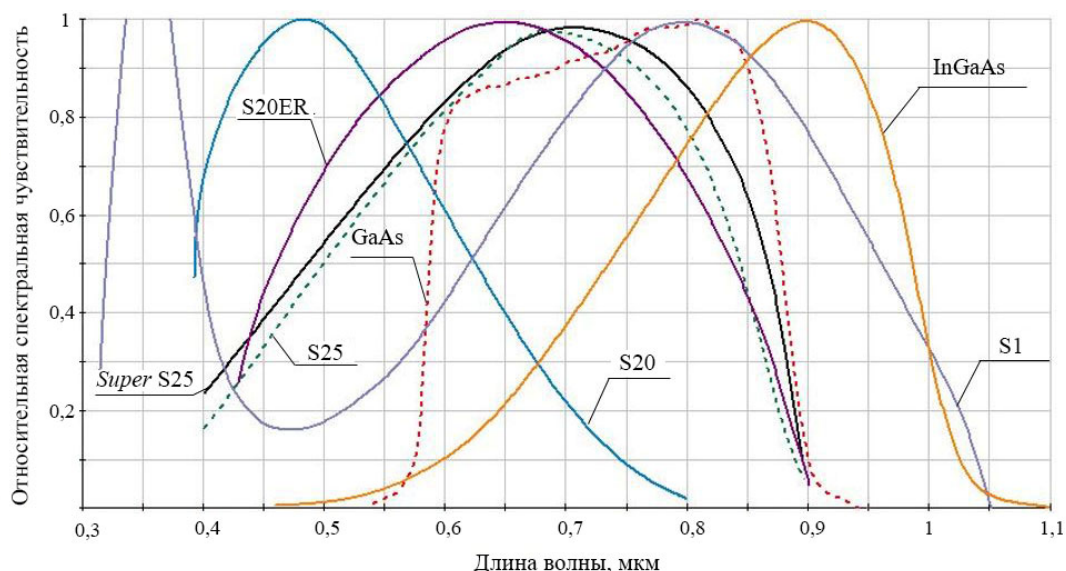


Рис. 18. Типичные спектральные характеристики фотокатодов ЭОП

2.3.3. Выбор стартовой системы и ее оптимизация

За исходную стартовую систему принимается оптическая система объектива, приведенная на рис. 8, и проводится ее анализ. В результате анализа устанавливается, что исходная оптическая система при относительном отверстии 1 : 2 и угловом поле 9° имеет размер изображения 15,7 мм, дисторсию минус 1 %, значение ЧКХ на пространственной частоте 50 лин/мм, равное 0,4, для центра поля зрения. При этом ЧКХ для всех точек изображения близки друг к другу (рис. 19).

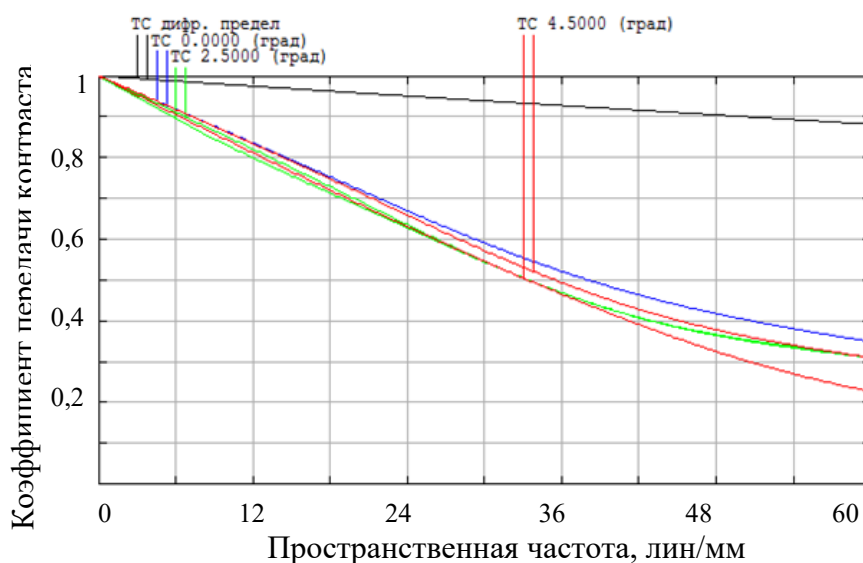


Рис. 19. ЧКХ стартовой системы при относительном отверстии 1 : 2

Очевидно, что по сравнению со стартовой системой требуется получить систему с увеличенным относительным отверстием и угловым полем. Для магистрантов, начинающих разработку объектива ПНВ, процесс компьютерного проектирования новой оптической схемы, удовлетворяющей требованиям ТЗ, можно представить в виде трех основных этапов (табл. 7).

Таблица 7

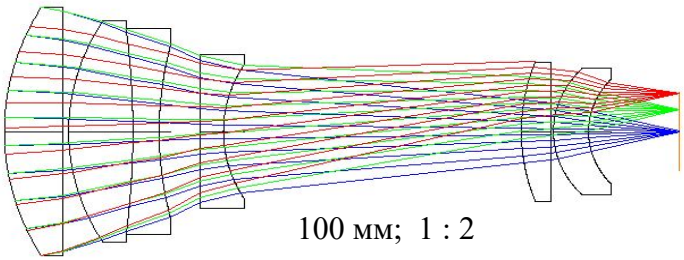
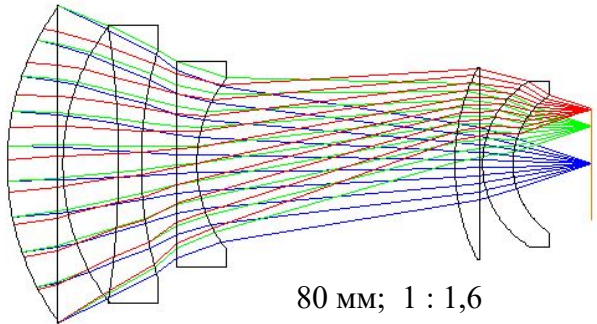
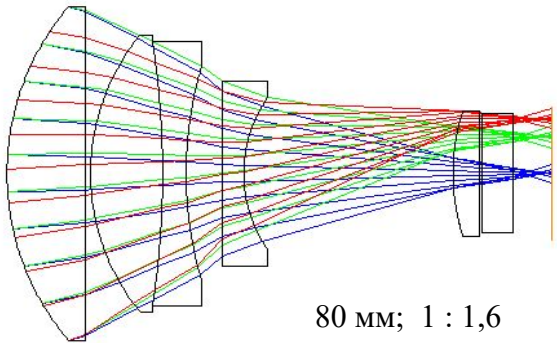
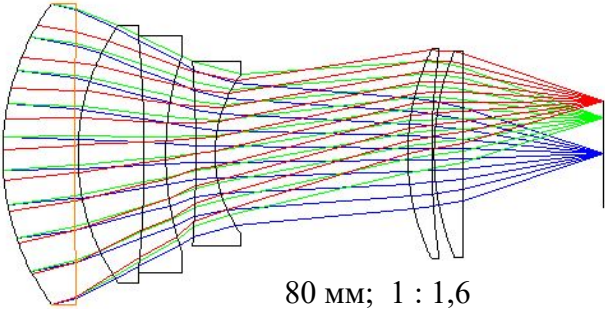
Три основных этапа оптического проектирования

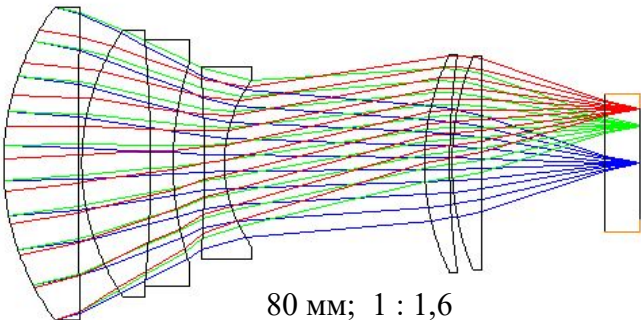
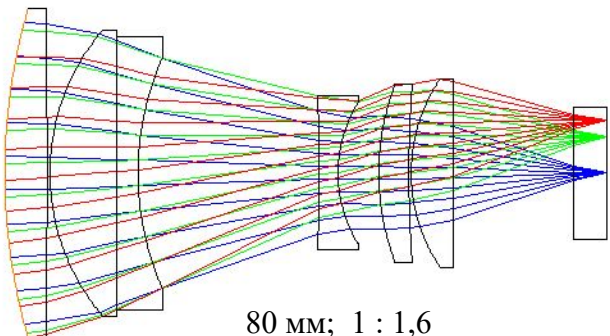
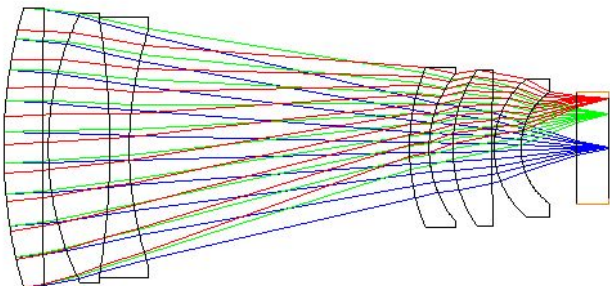
Этап	Вариативные параметры	Ограничения	Целевая функция оптимизации	Оптимизация	Анализ
Этап 1: стартовая система и ее модификация	Масштабирование на требуемое фокусное расстояние, корректровка относительного отверстия, диаметра входного зрачка, поля, изменение толщин линз (опционально)				Геометрические aberrации, геометрические пятна рассеяния в изображении точки, ЧКХ
Этап 2: минимизация геометрических aberrаций (итерационно)	Вначале: радиусы преломляющих поверхностей, затем – толщины линз и воздушных промежутков. Замена марок стекол (опционально)	На толщины линз по оси и краю, на толщины воздушных промежутков, на общую длину (опционально)	Автоматическое задание целевой функции оптимизации, включение небольшого числа дополнительных операторов, например, EFFL, TOTR и др. (см. подраздел 1.3). Итерационно: изменение весовых коэффициентов, подключение дополнительных операторов, например AXCL, DIST и др. (опционально)	Вначале: ограниченное количество циклов оптимизации, затем автоматически	Сферическая aberrация, хроматизм положения, хроматизм увеличения, кома, астигматизм, кривизна изображения, дисторсия, геометрические пятна рассеяния в изображении точки
Этап 3: достижение интегральных показателей качества (итерационно)	Радиусы преломляющих поверхностей, толщины воздушных промежутков, толщины по краю линз (опционально)	На толщину линз по краю, на общую длину и совмещение плоскости изображения со второй поверхностью подложки фотокатода	Введение операторов GMTT, GMTS, GMTA, MTFT, MTFS, MTFA, (опционально) для рабочих пространственных частот. Корректировка весовых коэффициентов	Автоматически	ЧКХ (MTF, МПФ), дисторсия, плоскость наилучшей установки

Табл. 8 демонстрирует изменение дизайна оптической системы в ходе компьютерного проектирования на различных этапах проектирования. На практических занятиях по дисциплине проводится подробное обсуждение процесса компьютерного проектирования оптической системы.

Таблица 8

Пример разработки объектива по ТЗ

Этап проектирования	Итерация	Дизайн оптической системы
Этап 1: исходная система и ее модификация	<i>a</i>	 100 мм; 1 : 2
	<i>б</i>	 80 мм; 1 : 1,6
	<i>в</i>	 80 мм; 1 : 1,6
Этап 2: минимизация геометрических аберраций и изменение дизайна линз	<i>г</i>	 80 мм; 1 : 1,6

Этап проектирования	Итерация	Дизайн оптической системы
	<i>д</i>	 80 мм; 1 : 1,6
	<i>е</i>	 80 мм; 1 : 1,6
Этап 3: достижение интегральных показателей качества	<i>ж</i>	 80 мм; 1 : 1,6

На этапе 1 проводится работа со стартовой системой. В рассматриваемом примере стартовая оптическая система (табл. 8, итерация *а*) масштабируется на фокусное расстояние 80 мм, увеличивается ее относительное отверстие до 1 : 1,6, размер изображения задается равным половине диаметра фотокатода. В результате в исходной системе нарушается баланс aberrаций, линзы приобретают острые края, падает качество изображения, изменяется фокусное расстояние (табл. 8, итерация *б*). При этом размеры геометрических пятен рассеяния увеличиваются в несколько раз (в 2–5 раз), но физически система становится не реализуемой из-за острых краев линз. Поэтому далее проводятся увеличение толщины линз, замена последнего мениска

плоскопараллельной пластинкой из-за крутых радиусов мениска. Кроме того, чтобы увеличить задний фокальный отрезок, проводят изменение воздушного промежутка 7 (номера воздушных промежутков здесь и далее указаны в соответствии с нумерацией, соответствующей рис. 8). При этом среднеквадратические значения геометрических пятен рассеяния резко возрастают до 1 000 мкм и более (табл. 8, итерация в).

На этапе 2 проектирования выбирают вариативные параметры, определяют ограничения, составляют целевую функцию оптимизации, проводят оптимизацию и анализ полученных систем. Вначале в качестве вариативных параметров используют только радиусы кривизны преломляющих поверхностей и задний фокальный отрезок (см. табл. 8, этап 2). В рассматриваемом примере использовалось автоматическое формирование целевой функции оптимизации, в качестве типа оптимизации был выбран максимальный размах аберраций (PTV), в качестве оптимизируемой характеристики оптической системы – радиус пятна рассеивания, в качестве опорных точек оптимизации – центр тяжести аберраций. В качестве дополнительного оператора используется фокусное расстояние объектива (EFL). При оптимизации использован алгоритм оптимизации по умолчанию: алгоритм оптимизации методом наименьших квадратов с активным демпфированием (DLS). После проведения пробной оптимизации с количеством циклов, равным пяти, и контролем результатов пробной оптимизации была использована оптимизация с автоматически определяемым количеством циклов. В результате RMS для выбранных точек поля уменьшено до 0,025 мкм, дизайн оптической системы иллюстрируется схемой итерации з) в табл. 8.

На этом этапе в систему вводится плоскопараллельная пластинка, толщина которой соответствует толщине подложки фотокатода, корректируется расстояние до подложки фотокатода таким образом, чтобы плоскость изображения совпадала со второй поверхностью подложки. Для этого изменяется расстояние 7 (табл. 8, итерация д).

Далее итерационно продолжается оптимизация оптической системы. Расширяется количество переменных параметров, в их число включаются воздушные промежутки 5, 7 и 11, при этом толщину 13 ограничивают значением 0. При необходимости устанавливается ограничение

на минимальное значение толщины 11: например, указав, что оно не должно быть менее 10 мм. В ходе итераций изменяются толщины линз для исключения острых краев и толстых линз, либо ставится условие на толщину по краю линзы (например, толщина должна составлять 2 мм или не менее 2 мм).

Этап 2 проектирования можно проводить, приняв для всех длин волн спектрального рабочего диапазона коэффициенты эффективности (веса), равные единице. Количество длин волн можно ограничить числом три. По мере уменьшения геометрических aberrаций и получения приемлемого дизайна оптической системы можно внести изменения в веса для различных длин волн в соответствии со спектральной эффективностью.

В [38, с. 325] таким образом подчеркивается необходимость учета спектральной чувствительности приемника излучений при расчете объективов: «Практика показывает, что не существует универсальной оптической системы, которую можно было бы рассчитать для применения с любым типом фотоприемника, для любых условий и на "все времена". Любое изменение исходных данных делает, казалось бы, универсальную оптическую систему неоптимальной, а иногда и совершенно не выполняющей свою основную задачу – обеспечение высокого качества оптического изображения». Поэтому при разработке оптической системы рекомендуется тщательно подходить к вопросу спектрального согласования оптической системы и приемника изображения.

В результате этапа 2 в рассматриваемом примере получена система, показанная в табл. 8, итерация *e*. При ее анализе выявлено, что RMS геометрических aberrаций для различных точек поля составили от 0,012 до 0,020 мм.

В ходе выполнения оптимизации и анализа полученных оптических систем возникает вопрос о переходе от оптимизации по геометрическим aberrациям к оптимизации по интегральным показателям (переход к этапу 3). Универсального правила для любого типа оптических систем не существует. Применительно к рассматриваемой оптической системе объектива ПНВ можно рекомендовать следующее правило: переход к оптимизации по интегральным показателям качества изображения лучше осуществлять тогда, когда значения поперечных геометрических aberrаций

становятся сопоставимы с уровнем, необходимым для обеспечения требуемого разрешения оптической системы (или превышают его не более чем в два – пять раз). Как провести оценку этого уровня? Самый простой способ: проанализировать значения поперечных aberrаций в известных оптических системах ПНВ. Например, RMS поперечных геометрических aberrаций стартовой системы лежат в диапазоне от 0,011 до 0,015 мм. Вторым способ основан на оценке требуемого размера пятна рассеяния по формуле Волосова [49, с. 107]: $\delta = 2\sqrt{k(1-T)} / \pi v'$, где δ – размеры пятна рассеяния; k – коэффициент, зависящий от распределения освещенности в пятне рассеяния (2 – при равномерном распределении освещенности; 3 – при линейном снижении освещенности от центра к краю); T – требуемое значение коэффициента передачи контраста на пространственной частоте v' . Для исходных данных: $T = 0,5$ и $v' = 57,6$ лин/мм расчет по формуле Волосова дает значения δ в диапазоне от 0,011 до 0,014 мм. Поэтому достижение RMS геометрических aberrаций менее 0,02 мм (см. табл. 8, итерация *е*) соответствует переходу на оптимизацию по интегральным показателям качества.

На этапе 3 проектирования рекомендуется включить в оптимизационную функцию операторы, контролирующие ЧКХ (МТФ). Для рассматриваемой системы были использованы операторы геометрической ЧКХ: значения коэффициентов передачи контраста в меридиональном и сагитальном сечениях (GMTT, GMTS) для трех полей: точка на оси (поле 1), поля 2 и 3, соответствующие радиальным координатам изображения, равным 6 и 8,75 мм. Группы операторов GMTT, GMTS задавались для двух пространственных частот: 30 и 50 лин/мм. Целевое значение операторов GMTT, GMTS принималось равным 1. Весовые коэффициенты назначались в диапазоне от 1 (EFFL) до 50 (GMTT, GMTS). В результате оптимизации на этапе 3 получена оптическая система, представленная в табл. 8, итерация *ж*. Ее анализ приводится далее в подразделе 2.3.4.

Очевидно, что создавая свои оценочные функции оптимизации, регулируя ход оптимизации (количество циклов, алгоритм оптимизации и пр.), магистрант будет получать системы с отличающимися конструктивными параметрами и качеством изображения. Главная задача – обеспечить в по-

лученной системе выполнения желаемых (требуемых) характеристик. Поэтому то обстоятельство, что в результате оптимизации с помощью модифицированных оценочных функций магистрант получит несколько вариантов оптических систем объектива, является очень полезным. Анализ, который проводит магистрант после каждого этапа оптимизации, является важнейшей эвристической процедурой, необходимой для выбора наилучшего варианта.

2.3.4. Анализ полученной системы

Оптическая система, схема которой приведена в табл. 8, итерация *жс*, имеет следующие конструктивные параметры (рис. 20).

Тип поверхности	Комментарий	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр	К
OBJ	Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность	
*	Стандартная	90.368585 V	7.000000	TK21	25.007076	
2*	Стандартная	1628.779550 V	1.000000		24.760067	
3*	Стандартная	53.578827 V	11.000000	TK21	24.096634	
4*	Стандартная	-145.625106 V	3.500000	TF5	23.234567	
5*	Стандартная	66.556026 V	49.790110 V		21.203839	
6*	Стандартная	35.781337 V	3.500000	TF5	14.376789	
7*	Стандартная	20.899007 V	4.937902 V		13.201094	
8*	Стандартная	25.103457 V	7.000000	TK21	14.000000	U
9*	Стандартная	348.021012 V	0.400000		13.698802	
10*	Стандартная	16.119790 V	4.800000	TK21	12.364994	
11*	Стандартная	12.232037 V	10.276904 V		10.039658	
12*	Стандартная	бесконечность	5.600000	LZ_K8	10.000000	U
13*	Стандартная	бесконечность	0.000000		10.000000	U
IMA	Стандартная	бесконечность	-		8.913838	

Эффективное фокусное расстояние:	80.02264
Заднее фокальное расстояние:	0.07687972
Полная длина:	108.8049
Ф/число в пространстве изображений:	1.6
Параксиальное рабочее F/число:	1.6
Рабочее F/число:	1.597353
Числовая апертура в пространстве изображений:	0.298275
Ч.А. в пространстве объектов:	2.500708e-009
Радиус апертурной диафрагмы системы:	25.00708
Высота параксиального изображения:	8.75
Параксиальное увеличение:	0
Диаметр входного зрачка:	50.01415
Положение входного зрачка:	0

Рис. 20. Конструктивные параметры и характеристики разработанной оптической системы объектива ПНВ

Оптическая схема состоит из шести линз, две из которых склеены. Линзы объединены в два положительных блока: первый (одиночная линза и склеенная линза) и второй (три одиночных линзы). При этом относительная оптическая сила первого блока линз составляет 0,72; второго – 0,55. Фокусное расстояние объектива равно 80 мм, диаметр входного зрачка 50 мм, относительное отверстие 1 : 1,6, линейный размер изображения 17,5 мм; угловое поле в пространстве предметов 12,29°, масса оптических деталей по световым диаметрам составляет 187 г, длина оптической системы от первой поверхности до внешней поверхности подложки фотокатода составляет 103,2 мм.

На рис. 21 приведены некоторые фрагменты программных окон, используемых для анализа качества изображения. Так, среднеквадратичные размеры радиусов геометрических пятен рассеяния составляют менее 0,010 мм. Расчеты выполнялись с учетом спектральной эффективности рабочих длин волн, соответствующих спектральной чувствительности фотокатода ЭОП третьего поколения. Оптическая система обладает положительной дисторсией, значение которой на краю поле менее 2 %. Графики ЧКХ приведены для точки на оси и точек изображения с радиальными координатами 6 и 8,85 мм. Графики демонстрируют практически одинаковое качество изображения в центре и по полю фотокатода (близкие значения коэффициентов передачи контраста для одинаковых пространственных частот).

Проведем оценку коэффициентов передачи контраста для пространственной частоты, составляющей 0,9 от предела разрешения ЭОП, т. е. для 57,6 лин/мм: для точки на оси он составит 0,55, для остальных точек поля коэффициенты находятся в диапазоне от 0,55 до 0,48.

Таким образом, согласно критериям, приведенным в подразделе 2.2, можно утверждать, что разработанный объектив обеспечивает отличное качество изображения в центре поля зрения и хорошее по полю.

В ходе анализа учитываются не только показатели качества изображения, формируемого оптической системой, но и массогабаритные показатели, стоимость материалов для изготовления оптических элементов, свойства материалов (механические, теплотехнические и пр.), технологичность исполнения отдельных элементов и т. д.

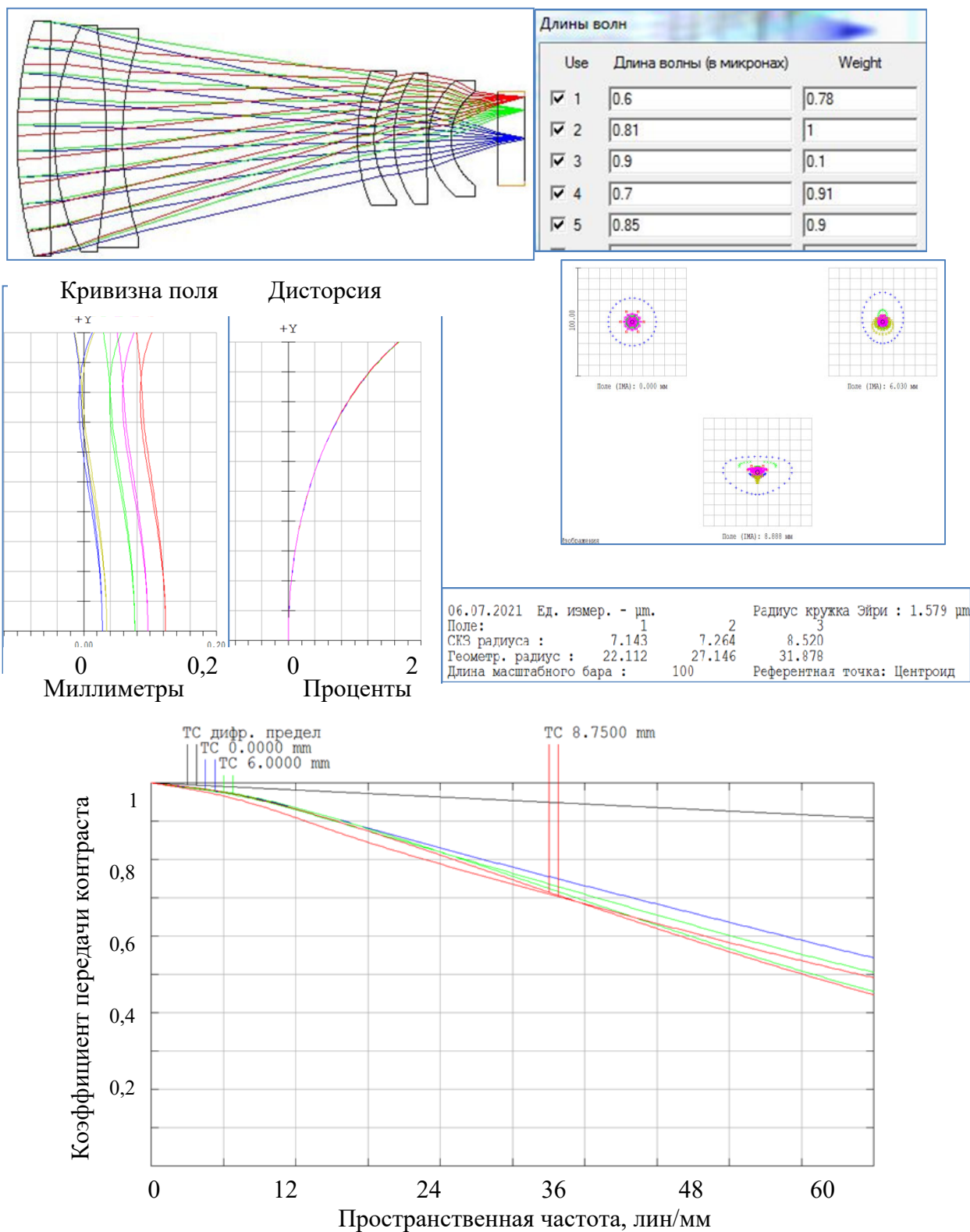


Рис. 21. Фрагменты некоторых программных окон, используемых для анализа оптической системы

Для облегчения выполнения практического задания по учебной дисциплине рекомендуется по указанию преподавателя выбрать ограниченное число показателей качества изображения, основным из которых является коэффициент передачи контраста на предельной рабочей пространственной частоте. Магистранту рекомендуется выполнить процедуру перемножения ЧКХ объектива и ЧКХ ЭОП и определить, насколько снижается предел разрешения системы «объектив + ЭОП» по сравнению с пределом разрешения ЭОП, и дать оценку качества изображения, формируемого разработанным объективом, в соответствии с критериями, приведенными в подразделе 2.2.

Кроме того, полезным является провести проверочные расчеты полученного варианта объектива по влиянию смещения плоскости фотокатода ЭОП на качество изображения, определить положение плоскости наилучшего изображения по сравнению с плоскостью параксиального изображения, проанализировать и определить глубину резкости, оценить влияние подложки фотокатода на ЧКХ. Кроме того, рекомендуется расчетным путем оценить гиперфокальное расстояние, а также необходимую подвижку объектива при фокусировке на близкорасположенные объекты. Далее рекомендуется, зная предел разрешения системы «объектив+ЭОП», рассчитать предельный угол разрешения в пространстве предметов.

Например, если предел разрешения системы «объектив + ЭОП» получился равным ν , то предельный угол разрешения φ в пространстве предметов объектива можно рассчитать как $\varphi = 1/\nu f'$. В частности, для $\nu = 57,6$ лин/мм и $f' = 80$ мм, получается $\varphi = 2,17 \cdot 10^{-4}$ рад = $0,72'$.

Вышеперечисленные вопросы обсуждаются на практических занятиях по учебной дисциплине и направлены на формирование профессиональных компетенций по компьютерным методам проектирования оптических систем, используя путь от частного к общему, от конкретного примера к пониманию обучающимися общей совокупности расчетных приемов и методов, используемых при проектировании оптических систем ПНВ.

2.4. Проектирование окуляров приборов ночного видения

2.4.1. Общие вопросы проектирования окуляров приборов ночного видения

При проектировании оптических систем окуляров ПНВ необходимо обеспечить требуемые увеличение и поле зрения окуляра, удаление выходного зрачка и качественное изображение. Предметом для окуляра является экран ЭОП. Для расчета окуляра необходимо знать форму, диаметр экрана и спектральную характеристику излучения экрана ЭОП.

В ЭОП первых поколений электронно-оптическое увеличение ЭОП составляло от 1 до 0,47 крат, и соответственно диаметр экрана ЭОП мог быть менее диаметра фотокатода. Современные ЭОП имеют увеличение, равное единице, и значения диаметров экрана и фотокатода равны [19, 9]. При этом экраны ЭОП могут иметь сферическую или плоскую форму. Как уже отмечалось, изображение на экране ЭОП может быть прямым по сравнению с изображением на фотокатоде, либо в ЭОПе может осуществляться полное оборачивание изображения. В последнем случае окуляр представляет собой лупу для рассматривания изображения на экране ЭОП. Именно на примере таких, наиболее простых окуляров, рекомендуется начинать изучение особенностей компьютерных методов проектирования окуляров ПНВ. На рис. 22 приведены спектральные характеристики различных типов люминофоров, используемых в ЭОП [48]. По оси ординат использован логарифмический масштаб.

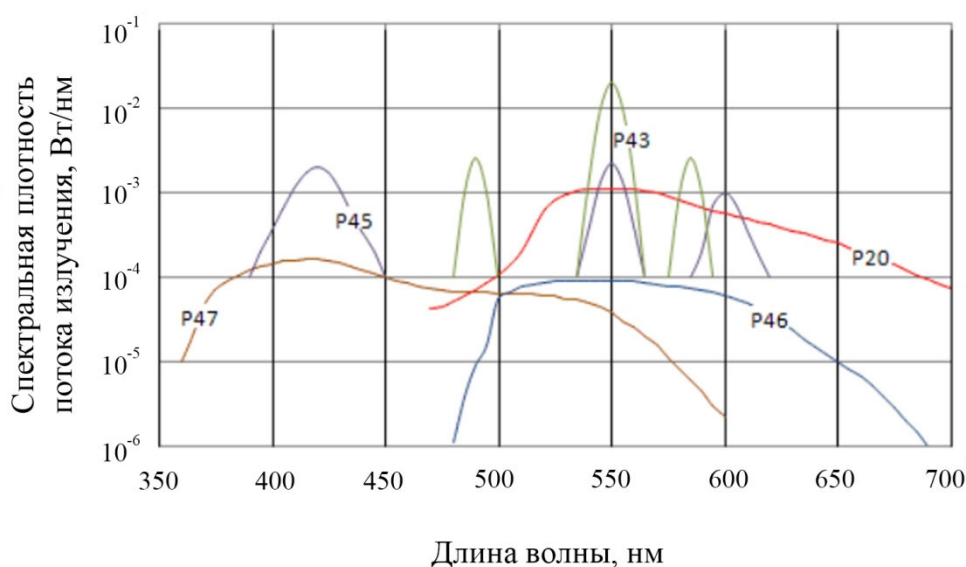


Рис. 22. Спектральные характеристики различных типов экранов ЭОП

При расчете окуляров для удобства задания спектральной эффективности рабочего диапазона длин волн на рис. 23 приведена относительная спектральная характеристика наиболее распространенного в ЭОП экрана Р43 (желто-зеленое свечение экрана). Она построена на основе данных рис. 22, но представлена в линейном масштабе по оси ординат.

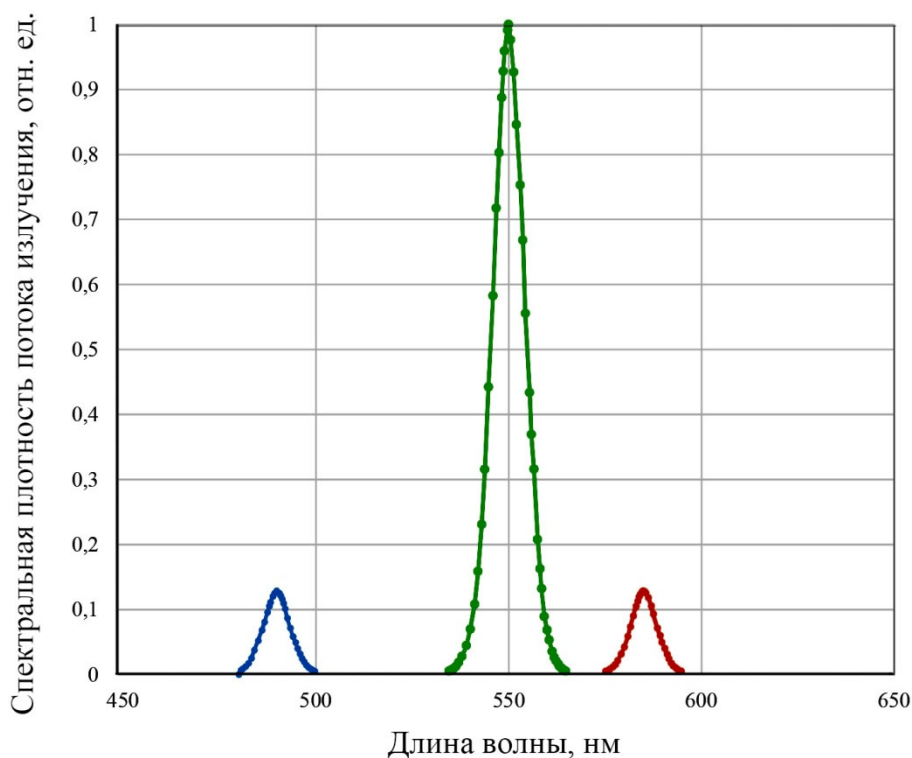


Рис. 23. Относительная спектральная характеристика излучения экрана типа Р43

Таким образом, при расчете окуляра, предназначенного для наблюдения изображения на экране типа Р43, рабочий диапазон длин волн можно принять от 0,535 до 0,585 мкм с основной длиной волны 0,550 мкм.

При работе окуляра апертурная диафрагма определяется оптической системой глаза наблюдателя. Если наблюдение экрана ЭОП предполагает, что в процессе наблюдения глазное яблоко наблюдателя должно поворачиваться, то при расчете окуляра рекомендуется положение апертурной диафрагмы совмещать с центром вращения глаза. Этот центр вращения находится внутри глазного яблока примерно на расстоянии 13 мм от поверхности роговицы. Необходимость учета вращения глаза возникает при

больших полях наблюдения, т. е. при разработке оптических систем короткофокусных окуляров.

Если наблюдение экрана ЭОП не требует поворота глазного яблока, то за апертурную диафрагму при расчете окуляра можно принять входной зрачок глаза наблюдателя. Входной зрачок глаза наблюдателя – это изображение отверстия в радужной оболочке глаза через предшествующие ей оптические поверхности глаза (роговицу). Увеличение в зрачках глаза составляет примерно 0,9 крат, т. е. входной зрачок несколько больше отверстия в радужке [50]. Входной зрачок глаза находится примерно на расстоянии 3 мм от передней поверхности роговицы.

В [38, с. 289] отмечается, что если в наблюдательном оптическом приборе с выходным зрачком прибора совмещен зрачок глаза, то наблюдение без виньетирования пучков лучей возможно лишь в пределах поворота глаза на угол α , при этом $\operatorname{tg} \alpha = (D' - d_{\text{гл}}) / 2l$, здесь l – расстояние от вершины роговицы до центра вращения глаза; D' – диаметр выходного зрачка, для которого рассчитан окуляр; $d_{\text{гл}}$ – диаметр входного зрачка глаза наблюдателя.

Например, если расчет окуляра выполнен для $D' = 10$ мм, а диаметр глаза 4 мм и зрачок глаза совмещен с расчетным положением выходного зрачка окуляра, то в процессе наблюдения изображения на экране ЭОП глаз может поворачиваться на $\pm 14^\circ$ без виньетирования наклонных пучков лучей. Поворот глазного яблока в процессе наблюдения изображения на экране ЭОП обусловлен рядом причин. Отметим здесь причину, связанную с изменением остроты зрения глаза по полю зрения: при появлении объекта за пределами фовеального зрения, определяемого желтым пятном сетчатки, движение глазного яблока направлено на перевод изображения в зону желтого пятна. Конечно, наблюдатель может весь прибор переместить так, чтобы изображение объекта стало находиться в центре поля зрения окуляра, но комфорт наблюдения в таком случае снижается. Поэтому при разработке оптической системы окуляра необходимо тщательно подходить к вопросу положения выходного зрачка и его диаметра.

Как известно, в зависимости от яркости объектов наблюдения диаметр зрачка глаза колеблется от 2 до 8 мм. Особенности поля адаптации

(экрана ЭОП), связанные с излучением люминофора, флуктуациями яркости на экране, наличием сцинтилляций, вызывают некоторое изменение зрачковой реакции в сторону увеличения зрачка. При этом зависимость диаметра зрачка от яркости экрана ЭОП выражается формулой [50]:

$$D_p = 5,5 - 1,5 \operatorname{th}[0,5 \lg(0,06L)]. \quad (10)$$

При расчете по приведенной формуле необходимо яркость L подставлять в кд/м², при этом диаметр получается в миллиметрах. Формула справедлива для $10^{-4} \text{ кд/м}^2 < L < 10^2 \text{ кд/м}^2$, т. е. при реальных яркостях экрана ЭОП. При яркости 1 кд/м² диаметр зрачка глаза достигает примерно 5 мм, при яркости 100 кд/м² – 3 мм. Именно при таких диаметрах выходного зрачка целесообразно проводить оценку качества изображения, формируемого оптической системой окуляра. Поскольку глаз наблюдателя в процессе наблюдения изображения экрана ЭОП может смещаться с оптической оси, то при расчете оптической системы окуляра рекомендуется моделировать такие ситуации, смещая выходной зрачок с оптической оси и контролируя как возможность наблюдения всего экрана, так и качество изображения при смещении зрачка.

По мере увеличения удаления выходного зрачка от окуляра в ПНВ возрастают диаметры линз окуляра. Рис. 24 демонстрирует влияние удаления выходного зрачка на диаметр окуляра.

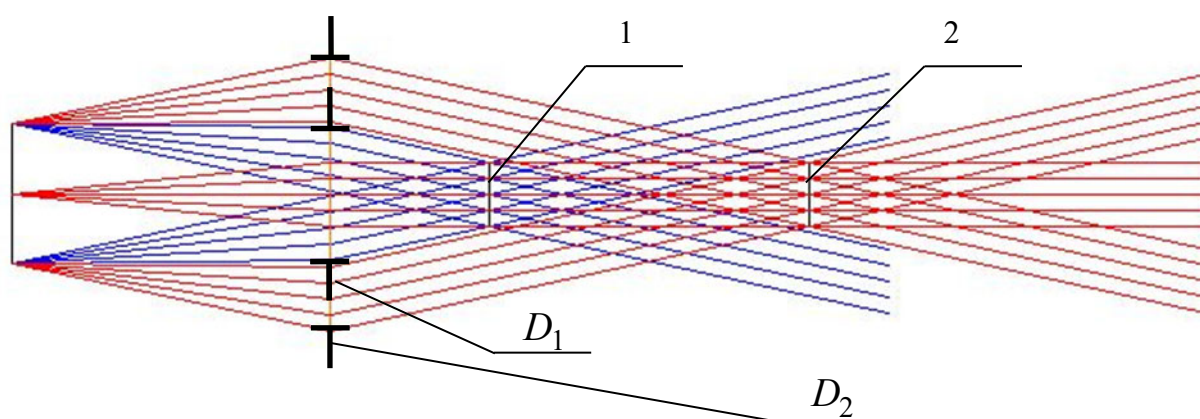


Рис. 24. Возрастание диаметра окуляра по мере удаления выходного зрачка

При положении выходного зрачка в положении 1 требуемый диаметр окуляра D_1 меньше, чем диаметр D_2 – при положении 2 (красный цвет лучей). Здесь окуляр представлен тонкой идеальной линзой. Если допустить виньетирование крайних наклонных пучков лучей, то удаление зрачка будет несколько больше.

Поскольку в оптической системе окуляра световые диаметры линз имеют ограниченные размеры, то под удалением выходного зрачка в окуляре ПНВ понимается наибольшее удаление зрачка глаза наблюдателя, при котором еще виден весь экран.

На рис. 25 наложены друг на друга два варианта окуляров: 1 – с фокусным расстоянием f_1' и 2 – с фокусным расстоянием f_2' , при этом $f_1' < f_2'$, при этом удаления $a_{\text{р}}'$ выходных зрачков в вариантах одинаковы.

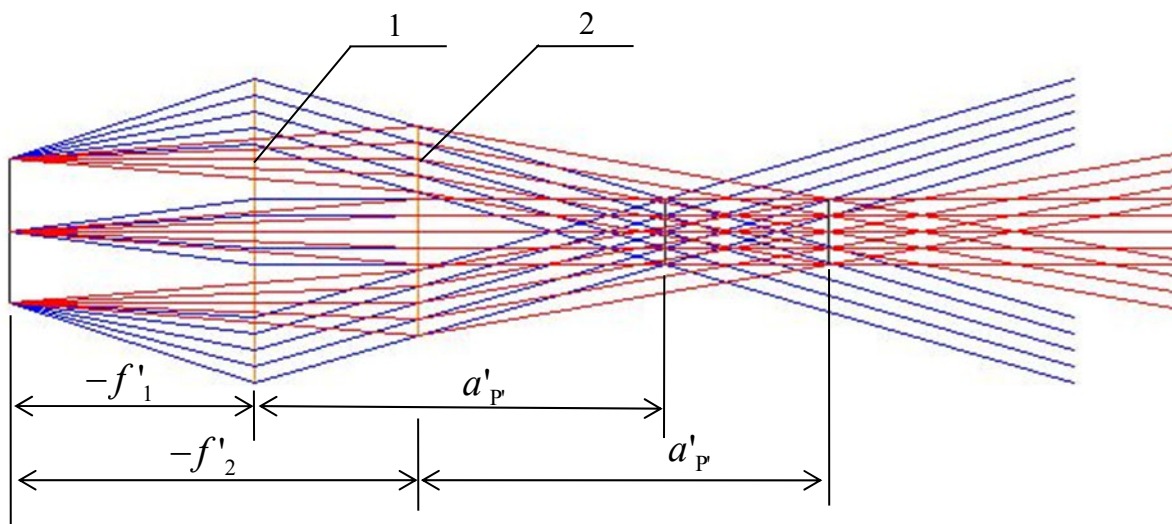


Рис. 25. Влияние фокусного расстояния окуляра на угловое поле зрения и диаметр окуляра

При увеличении фокусного расстояния при неизменном удалении выходного зрачка уменьшаются диаметр окуляра и его угловое поле.

Между обсуждаемыми характеристиками окуляра ПНВ существуют следующие зависимости:

$$a_{\text{р}50}' D_3 = f_{\text{ок}}' D_{\text{ок}}; \quad D_3 = f_{\text{ок}}' \operatorname{tg} \omega_{\text{ок}}', \quad (11)$$

где a'_{p50} – удаление выходного зрачка при 50 % виньетировании; $f'_{ок}$ – фокусное расстояние окуляра; $D_э$ – диаметр экрана ЭОП; $D_{ок}$ – диаметр окуляра; $2\omega'_{ок}$ – угловое поле за окуляром ПНВ.

Увеличение фокусного расстояния окуляра приводит к уменьшению видимого увеличения ПНВ. Обычно видимое увеличение ПНВ рассчитывается и приводится в характеристиках прибора для случая положения предмета в бесконечности и при совмещении центра экрана ЭОП с передним фокусом окуляра, т. е. при нулевой диоптрийной установке окуляра.

Известно, что наилучшие условия наблюдения для эметропического глаза реализуются при установке окуляра в диапазоне от минус 0,5 до минус 1 дптр. При этом видимое увеличение окуляра уменьшается по сравнению с номинальным положением. Например, для окуляра с фокусным расстоянием 40 мм, удалением зрачка 50 мм при установке на минус 1 дптр видимое увеличение уменьшается на 5 %, т. е. с 6,25 до 5,94 крата.

Применение волоконно-оптических элементов в ЭОП позволяет получать экраны не только плоской, но и сферической формы. Радиус сферической поверхности обычно равен 40 мм [19]. При разработке оптической системы окуляра наличие предмета сферической формы способствует более простому устранению кривизны изображения и, соответственно, упрощению оптической системы окуляра.

При расчете окуляров приборов, закрепляемых на голове наблюдателя, обычно добавляют некоторый запас на диаметр выходного зрачка по сравнению с диаметром глаза наблюдателя, чтобы при смещении положения глаз изображение не уходило из поля зрения. При разработке оптической системы прибора ночного видения дисторсия окуляра может компенсироваться соответствующей дисторсией объектива.

2.4.2. Варианты оптических систем окуляров приборов ночного видения

Для проведения практических расчетов окуляров далее приведены пять вариантов окуляров, информация о которых взята из литературных и патентных источников (рис. 26–30). Окуляры разработаны в разные годы и предназначены для работы с ЭОП разных поколений. Приведенные параметры оптических систем позволяют провести анализ окуляров и мо-

гут использоваться в качестве стартовых для расчетов оптических систем окуляров ПНВ в рамках практических занятий по учебной дисциплине.

Фокусное расстояние 10 мм

Линейное поле в плоскости предметов 8 мм

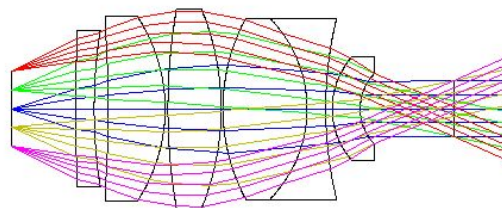
Удаление выходного зрачка 10 мм

Диаметр выходного зрачка 6 мм

Угловое поле 47,7°

Спектральный диапазон 0,486–0,656 мкм

Основная длина волны 0,546 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	6.890000		4.000000
1* Стандартная	144.210000	2.000000	TF4	7.700000 U
2* Стандартная	54.200000	1.500000		8.400000 U
3* Стандартная	-120.230000	6.100000	СТК9	8.600000 U
4* Стандартная	-17.824000	0.300000		9.900000 U
5* Стандартная	62.230000	5.700000	TK14	10.600000 U
6* Стандартная	-28.050000	0.200000		10.700000 U
7* Стандартная	20.420000	9.000000	СТК9	9.700000 U
8* Стандартная	-13.740000	2.000000	TF4	9.700000 U
9* Стандартная	40.740000	0.700000		9.700000 U
10* Стандартная	8.356000	3.000000	TK21	5.500000 U
11* Стандартная	5.495000	10.000000		3.800000 U
* Стандартная	бесконечность	0.000000		3.000000 U

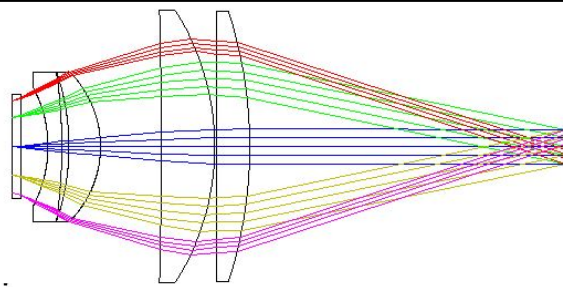
Рис. 26. Окуляр для ЭОП первого поколения [51]

Фокусное расстояние 25 мм

Диаметр плоского экрана 16 мм

Удаление выходного зрачка 70 мм

Диаметр выходного зрачка 6 мм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	1.400000	ЛК3	8.000000
1* Стандартная	бесконечность	4.800000		9.000000 U
2* Стандартная	-21.778000	2.400000	TF10	10.250000 U
3* Стандартная	-90.440000	1.250000		13.000000 U
4* Стандартная	-39.980000	5.500000	TBF13	12.950000 U
5* Стандартная	-18.365000	10.600000	V	13.000000 U
6* Стандартная	-859.000000	9.300000	TBF13	23.750000 U
7* Стандартная	-44.260000	0.400000		23.750000 U
8* Стандартная	бесконечность	5.700000	TF10	23.500000 U
9* Стандартная	-76.380000	55.000000		23.500000 U
* Стандартная	бесконечность	0.000000		3.000000 U

Рис. 27. Окуляр ПНВ [41, с. 288], [52]

Фокусное расстояние 19 мм

Угловое поле 45°

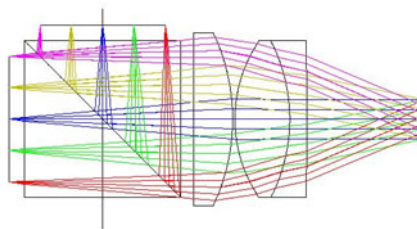
Линейное поле 16 мм

Удаление выходного зрачка 15 мм

Диаметр выходного зрачка 6 мм

Основная длина волны 0,5876 мкм

Диоптрийная подвижка ± 5 дптр



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	2.000000		8.000000
1* Стандартная	бесконечность	20.000000	1.52, 64.2	10.000000 U
2* Стандартная	бесконечность	1.750000		10.000000 U
3* Стандартная	бесконечность	5.000000	1.62, 60.3	11.000000 U
4* Стандартная	-25.630000	0.300000		11.000000 U
5* Стандартная	17.790000	7.000000	1.59, 61.2	10.000000 U
6* Стандартная	-21.820000	2.200000	1.80, 25.4	10.000000 U
7* Стандартная	-380.900000	15.000000		8.079301
* Стандартная	бесконечность	0.000000		3.000000 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		3.149618

Рис. 28. Окуляр ПНВ [53]

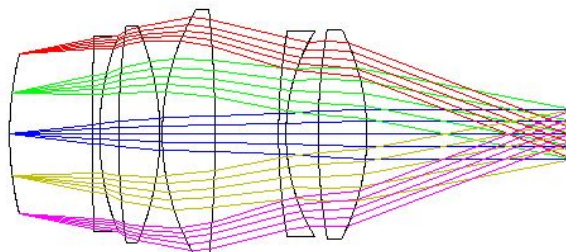
Фокусное расстояние 26,5 мм

Линейное поле 19,2 мм

Удаление выходного зрачка 25 мм

Диаметр выходного зрачка 6 мм

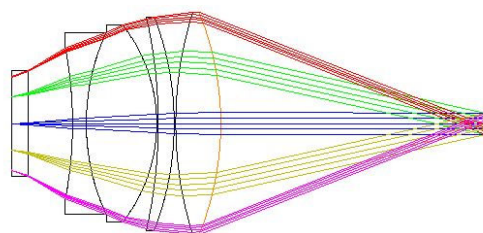
Основная длина волны 0,546 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	40.000000	10.000000		9.600000
1* Стандартная	285.200000	0.900000	1.85, 23.8	11.800000 U
2* Стандартная	32.000000	2.300000		11.800000 U
3* Стандартная	92.800000	5.000000	1.72, 50.4	13.100000 U
4* Стандартная	-32.600000	0.300000		13.100000 U
5* Стандартная	29.600000	6.400000	1.64, 55.4	15.000000 U
6* Стандартная	-151.000000	7.700000		15.000000 U
7* Стандартная	75.700000	0.900000	1.80, 25.5	12.400000 U
8* Стандартная	23.900000	3.900000		12.400000 U
9* Стандартная	73.700000	5.900000	1.64, 55.4	12.600000 U
10* Стандартная	-27.700000	25.000000		12.600000 U
* Стандартная	бесконечность	0.000000		3.000000 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		3.000000 U

Рис. 29. Окуляр ПНВ [54]

Фокусное расстояние 23,5 мм
 Линейное поле 17,5 мм
 Удаление выходного зрачка 50 мм
 Диаметр выходного зрачка 6 мм
 Диоптрийная подвижка ± 4 дптр



Тип поверхности		Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ	Стандартная	бесконечность	0.100000		8.750000
1*	Стандартная	бесконечность	3.000000	BK10	8.810280
2*	Стандартная	бесконечность	8.440000		9.910843
3*	Стандартная	-75.511000	2.600000	SF66	14.187785
4*	Стандартная	41.020000	13.300000	N-LASF44	17.174010
5*	Стандартная	-30.056500	0.300000		18.625524
6*	Стандартная	-90.422000	3.000000	N-LASF31A	19.799615
7*	Стандартная	-55.573500	0.300000		20.141591
8*	Стандартная	70.316000	8.500000	TK17	20.999868
9*	Стандартная	-55.573000	50.000000		20.940662
*	Стандартная	бесконечность	0.000000	Прямой выход	2.000000 U

Рис. 30. Окуляр ПНВ [38, с. 296]

Фокусное расстояние 20 мм
 Угловое поле 51°
 Удаление выходного зрачка 25 мм
 Диаметр выходного зрачка 10 мм

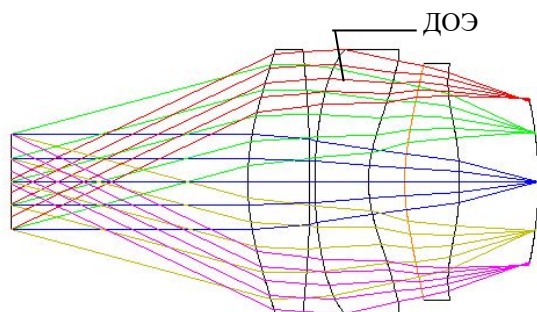


Рис. 31. Окуляр ПНВ [55]

Ниже даются некоторые комментарии по схемам окуляров.

Диоптрийная подвижка ± 4 дптр в окуляре, приведенном на рис. 26 [51], осуществляется перемещением всего окуляра.

При расчете окуляра (см. рис. 27 [52]) учитывалось защитное стекло экрана ЭОП, толщина которого составляет 1,4 мм. Расчет выполнялся для следующей спектральной эффективности: 0,546 мкм – 1; 0,486 мкм

и 0,589 – 0,4. В патенте [52] указано, что удаление зрачка составляет 70 мм, но проверочный расчет по приведенным в патенте конструктивным параметрам показывает существенное виньетирование крайних пучков лучей уже при удалении зрачка 60 мм. В конструкции окуляра две первых линзы установлены посредством контакта «стекло – стекло», чем обеспечивается высокая точность воздушного промежутка. Диоптрийная установка осуществляется подвижкой блока из третьей и четвертой линз, при этом, согласно [52], изменение воздушного промежутка на 1,25 мм соответствует 1 дптр.

На практическом занятии оптические схемы окуляров, представленных на рис. 26, 27, могут использоваться для получения компетенций по расчету диоптрийной подвижки окуляров.

Окуляр, схема которого приведена на рис. 28 [53], имеет большой передний фокальный отрезок, в котором размещается призма-куб со светоделительной гранью, что позволяет наблюдать одновременно как изображение экрана ЭОП, так и изображение с микродисплея. Таким образом можно обеспечить наблюдение через окуляр изображений, формируемых, например каналом ночного видения и тепловизионным каналом, или вводить в ночной канал дополнительную информацию. В [53] указано, что угловые aberrации в окуляре не превышают 1 дптр для края поля зрения. В конструктивных параметрах, приведенных на рис. 28, призма представлена плоскопараллельной пластинкой толщиной 20 мм. На практических занятиях создание компьютерной модели двухканального окуляра может использоваться в качестве упражнения для формирования навыков мультikonфигурационного проектирования.

Особенностью окуляра (см. рис. 29 [54]) является то, что он рассчитан на более широкий спектральный диапазон, чем рабочий спектральный диапазон излучения экрана ЭОП, что позволяет через окуляр не только вести наблюдение экрана ЭОП в монокуляре ночного видения, но и проводить фотографирование изображения с помощью цифровой камеры, устанавливаемой за окуляром. В [54] отмечается, что окуляр, геометрические aberrации которого не превышают 2 минут, обеспечивает комфортное наблюдение экрана ЭОП, имеющего предел разрешения 64 лин/мм.

Окуляр (см. рис. 30 [38, с. 296]) рассчитан совместно с плоскопараллельной пластинкой, устанавливаемой на расстоянии 0,1 мм за экраном ЭОП. Диоптрийная установка осуществляется перемещением всего окуляра. Световые диаметры линз определены, исходя из диаметра зрачка 6 мм, поэтому зрачок диаметром 4 мм имеет некоторую свободу поперечных перемещений.

Тенденции в оптических системах окуляров ПНВ связаны с уменьшением их массогабаритных характеристик с одновременным повышением углового поля в пространстве изображений окуляра, увеличением удаления выходного зрачка и его диаметра. Как следует из обсуждения общих вопросов в подразделе 2.4.1, реализация указанных тенденций в конкретной оптической системе приводит к необходимости удовлетворять противоречивые с оптических позиций требования. Поэтому в современных окулярах ПНВ для внутренних линз окуляров может применяться органическое оптическое стекло, преломляющие поверхности могут выполняться асферическими или киноформными.

На рис. 31 приведена оптическая схема компактного окуляра из патента [55]. Окуляр предназначен для бинокулярного ПНВ, закрепляемого на голове наблюдателя. В [55] расчетное значение диаметра выходного зрачка составляет 10 мм, удаление выходного зрачка – 25 мм. Для удобства оптических расчетов окуляров их часто проводят в обратном ходе лучей, именно в таком ходе лучей показан окуляр на рис. 31. Внешняя линза окуляра выполнена из неорганического оптического стекла, внутренние линзы – из органического. Все поверхности окуляра являются асферическими, при этом одна из поверхностей (выделена цветом и обозначена ДОЭ) линзы, расположенной перед экраном ЭОП, является киноформной. Длина от экрана до последней поверхности окуляра составляет около 30 мм, масса – менее 25 г.

На практических занятиях по дисциплине компьютерное моделирование подобного окуляра может проводиться в качестве демонстрации использования в компьютерных расчетах оптических систем асферических и киноформных поверхностей.

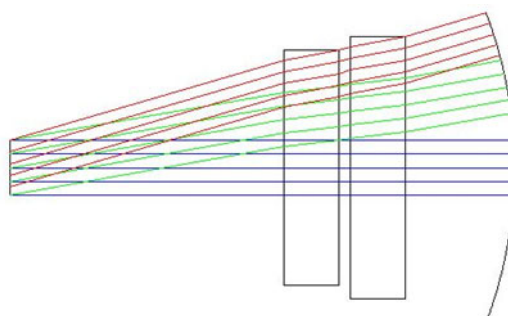
2.4.3. Пример компьютерного моделирования оптической системы окуляра приборов ночного видения

Рассмотрим пример расчета окуляра, удовлетворяющего следующим техническим требованиям:

- фокусное расстояние 30 мм;
- удаление выходного зрачка 30 мм;
- диаметр выходного зрачка 5 мм;
- диаметр экрана ЭОП 17,5 мм;
- форма экрана ЭОП – вогнутая сферическая радиусом 40 мм.

Пример призван продемонстрировать компьютерный метод проектирования по принципу «проектирование из плоскопараллельных пластинок», с использованием в качестве стартовой системы набора плоскопараллельных пластинок с их дальнейшим трансформированием в линзы путем использования компьютерной оптимизации.

Итак, исходная оптическая система окуляра составляется из плоскопараллельных пластинок. Например, берется две плоскопараллельных пластинки, толщина которых задается совершенно произвольно, исходя из разумных соображений, в качестве материалов указывается самое распространенное оптическое стекло марки К8 (рис. 32).



Тип поверхности		Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ	Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
*	Стандартная	бесконечность	25.000000		2.500000 U
2	Стандартная	бесконечность V	5.000000	LZ_K8 S	9.810475
3	Стандартная	бесконечность V	1.000000		10.752531
4	Стандартная	бесконечность V	5.000000	LZ_K8 S	11.044952
5	Стандартная	бесконечность V	10.000000 V		11.987008
IMA	Стандартная	-40.000000	-		14.154409

Рис. 32. Стартовая оптическая система для расчета окуляра

Расчет проводится в обратном ходе лучей. Угол наклона лучей принят 10 и 16,5°, что примерно соответствует угловому полю окуляра по ТЗ.

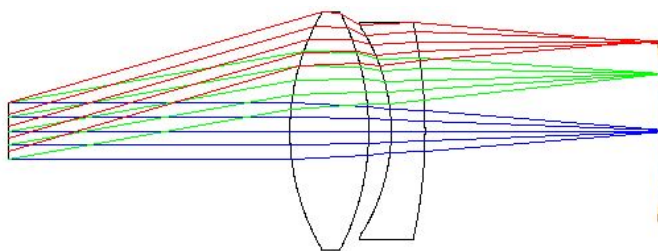
На первом этапе оптимизации в качестве переменных параметров задаются радиусы кривизны и марки стекол. В редакторе целевой функции оптимизации выбирается встроенная функция оптимизации (например, RTV и Centroid). К ней добавляются операторы EFL и AXCL. Фрагмент окна показан на рис. 33.

Опер. #	Тип	Волна	Hx	Hu	Rx	Ry	Цель	Вес	Величина	Вклад, %
1: EFL	EFL	2					30.000000	1.000000	1.00E+010	100.00000
2: DMFS	DMFS									
3: AXCL	AXCL	1	3	0.000000			0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
4: BLNK	BLNK	Operands for field 1.								
5: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.000000	0.433884	0.000000	0.000000	0.666667	1.084709	7.84E-019
6: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.000000	0.781831	0.000000	0.000000	0.666667	1.954579	2.55E-018
7: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.000000	0.974928	0.000000	0.000000	0.666667	2.437320	3.96E-018
8: TRAC	TRAC	2	0.000000	0.000000	0.433884	0.000000	0.000000	0.666667	1.084709	7.84E-019
9: TRAC	TRAC	2	0.000000	0.000000	0.781831	0.000000	0.000000	0.666667	1.954579	2.55E-018
10: TRAC	TRAC	2	0.000000	0.000000	0.974928	0.000000	0.000000	0.666667	2.437320	3.96E-018
11: TRAC	TRAC	3	0.000000	0.000000	0.433884	0.000000	0.000000	0.666667	1.084709	7.84E-019
12: TRAC	TRAC	3	0.000000	0.000000	0.781831	0.000000	0.000000	0.666667	1.954579	2.55E-018
13: TRAC	TRAC	3	0.000000	0.000000	0.974928	0.000000	0.000000	0.666667	2.437320	3.96E-018
14: BLNK	BLNK	Operands for field 2.								
15: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.216942	0.375754	0.000000	0.222222	1.061651	2.50E-019
16: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.390916	0.677086	0.000000	0.222222	1.905890	8.07E-019
17: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.487464	0.844312	0.000000	0.222222	2.373214	1.25E-018
18: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.433884	0.000000	0.000000	0.222222	1.084714	2.61E-019
19: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.781831	0.000000	0.000000	0.222222	1.954580	8.49E-019
20: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.974928	0.000000	0.000000	0.222222	2.437330	1.32E-018
21: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.216942	-0.37575	0.000000	0.222222	1.055880	2.48E-019
22: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.390916	-0.67709	0.000000	0.222222	1.909761	8.10E-019
23: TRAC	TRAC	1	0.000000	0.613497	0.487464	-0.84431	0.000000	0.222222	2.384824	1.26E-018
24: TRAC	TRAC	2	0.000000	0.613497	0.216942	0.375754	0.000000	0.222222	1.063369	2.51E-019
25: TRAC	TRAC	2	0.000000	0.613497	0.390916	0.677086	0.000000	0.222222	1.907599	8.09E-019
26: TRAC	TRAC	2	0.000000	0.613497	0.487464	0.844312	0.000000	0.222222	2.374919	1.25E-018
27: TRAC	TRAC	2	0.000000	0.613497	0.433884	0.000000	0.000000	0.222222	1.084722	2.61E-019
28: TRAC	TRAC	2	0.000000	0.613497	0.781831	0.000000	0.000000	0.222222	1.954579	8.49E-019

Рис. 33. Фрагмент рабочего окна редактора целевой функции оптимизации

Выбирается режим Namer-оптимизации. После проведения оптимизации плоскопараллельные пластинки трансформируются в положительную и отрицательную линзы, обеспечивающие заданное значение фокусного расстояния, программно подбираются материалы линз таким образом, чтобы оценочная функция была минимизирована. Полученная оптическая система окуляра приведена на рис. 34.

а)



б)

Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ	Стандартная	бесконечность	бесконечность	бесконечность
*	Стандартная	бесконечность	25.000000	2.500000 U
2	Стандартная	21.079815 V	7.000000	LZ_СТК3 S 10.656074
3	Стандартная	-23.333114 V	2.000000	10.534546
4	Стандартная	-17.223744 V	3.000000	LZ_ТФ10 S 9.471948
5	Стандартная	-45.231392 V	21.469899 V	9.723366
IMA	Стандартная	-40.000000	-	8.033811

Поля: 1 – 0°; 2 – 10°; 3 – 16,5°. Длины волн: 0,50; 0,546; 0,60 мкм

Точечная диаграмма пятна рассеяния

в)

Ед. измер. – мкм.	1	2	3
Поле:			
СКЗ радиуса :	8.039	13.425	20.193
Геометр. радиус :	12.451	31.887	182.162
Максимум шкалы:	400		
Радиус кружка Эйри :	3.994 мкм		
Референтная точка:	Центроид		

Рис. 34. Промежуточный вариант оптической системы окуляра:

а) оптическая схема; б) конструктивные параметры; в) фрагмент диаграммы пятна рассеяния

Анализ полученной системы показывает, что в результате оптимизации выбраны марки стекол СТК3 и ТФ10, при этом среднеквадратическому размеру пятна 0,008 мм для точки на оси в прямом ходе лучей будет соответствовать абберация менее 1', что можно признать хорошим результатом оптимизации. Оценка абберации в прямом ходе для края поля зрения дает 2,2'. Такой результат можно признать удовлетворительным.

Представляется интересным проанализировать результат выбора компьютерной программой марок материалов линз. Как известно, при аналитических методах расчета оптических систем для устранения хроматизма положения в двухлинзовой системе стремятся сделать равной нулю сумму отношений ϕ/v (ϕ – относительная оптическая сила линзы; v – коэффициент средней дисперсии материала линзы). В системе (рис. 34, б)

относительные оптические силы линз получились равными 0,59 и минус 1,20. Соответственно отношения ϕ/ν составили 0,029 и минус 0,033. Таким образом, в результате компьютерной оптимизации сумму отношений ϕ/ν составила минус 0,004, что обеспечило хроматизм положения примерно 1/300 от фокусного расстояния окуляра.

Рис. 34, в демонстрирует, что в изображении имеет место хроматизм увеличения. Для его уменьшения предлагается выполнить вторую линзу в виде склеенной. Для этого вводится еще одна поверхность, радиус которой равен радиусу пятой поверхности, толщина задается разумным значением, материал введенной линзы задается К8 (рис. 35, а, б).

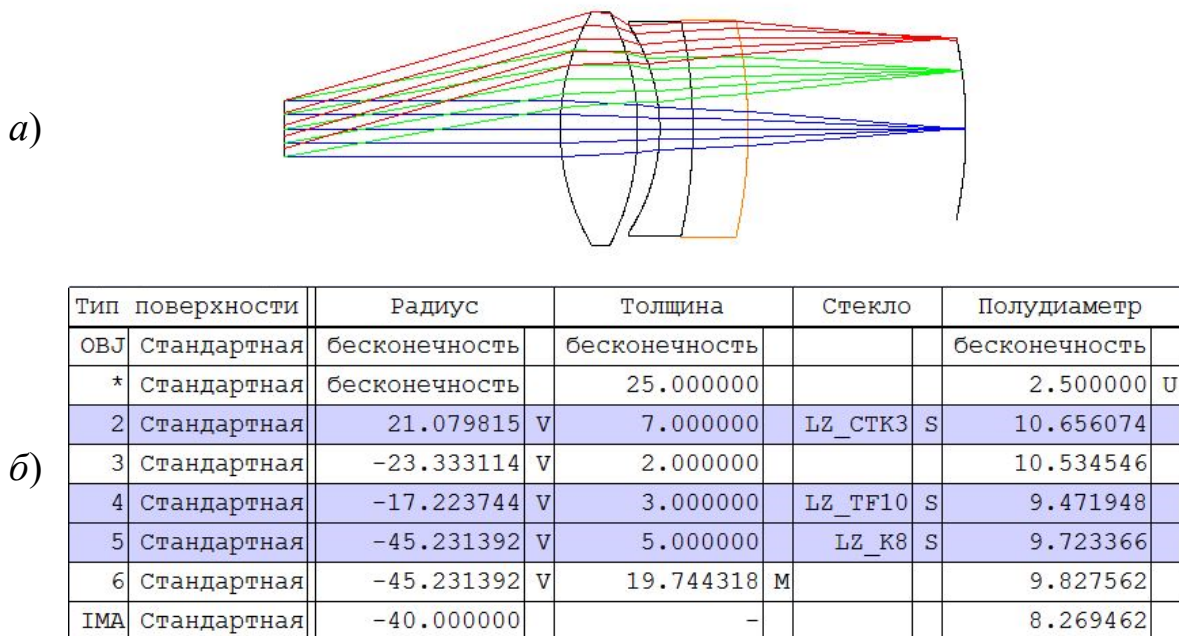


Рис. 35. Промежуточный вариант оптической системы окуляра

После этого проводятся несколько итераций оптимизации: в режиме HAMER-оптимизации осуществляется корректировка материалов линз, в режиме оптимизации методом наименьших квадратов с демпфированием проводится корректировка толщин линз в активном (ручном) режиме или с включением операторов ограничений. Для контроля хроматизма увеличения дополнительно вводится оператор LASL. Кроме того, с целью повышения технологичности исключается возможность выбора материала

первой линзы, он задается маркой K8. В результате получена система, представленная на рис. 36, а, б, в.

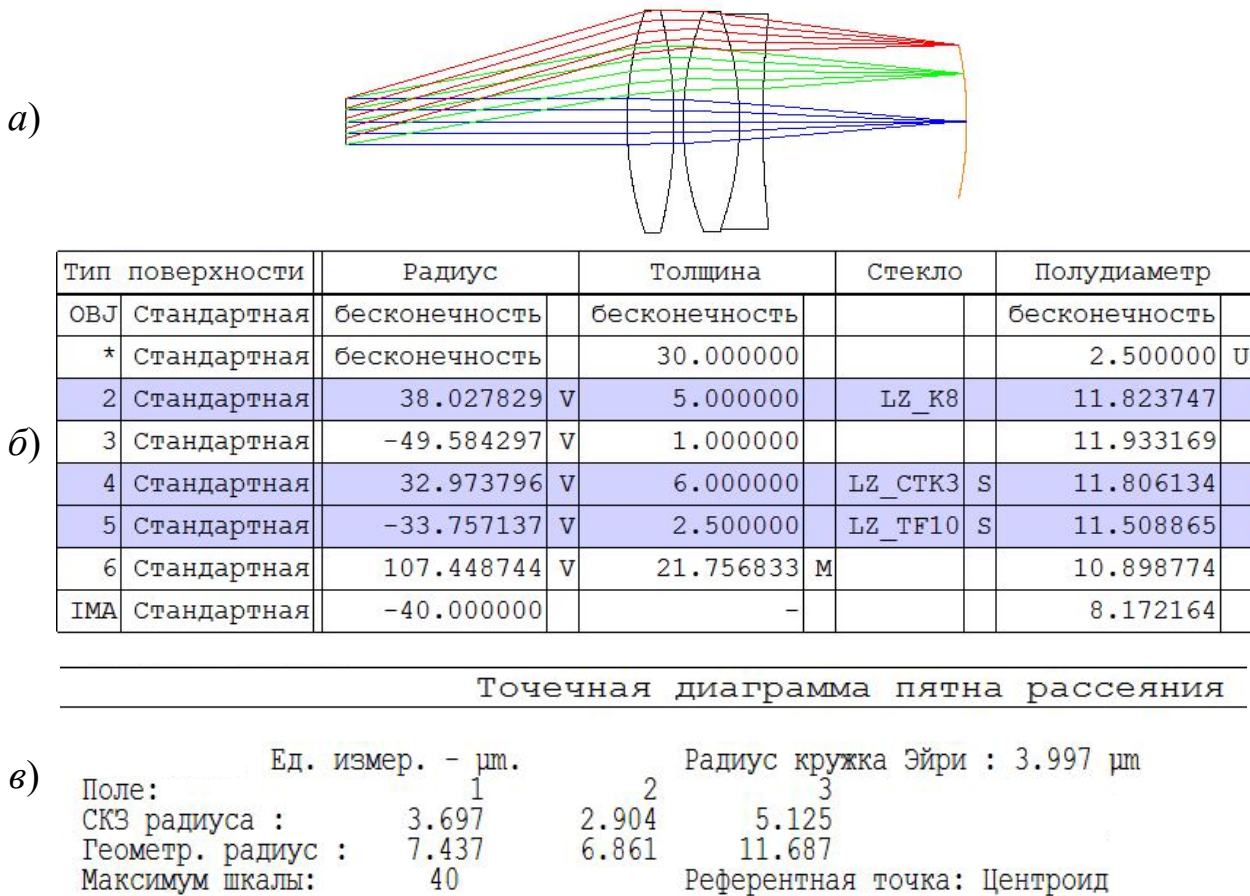


Рис. 36. Оптическая система синтезированного окуляра
в обратном ходе лучей

Для анализа качества изображения в прямом ходе лучей проводится реверс оптической системы, линейный размер предмета задается равным размеру экрана, проводится расчет aberrаций в угловой и диоптрийной мерах в афокальном режиме (рис. 37, а, б). В полученной системе средне-квадратические размеры aberrаций в угловой мере за окуляром составляют менее 1' (рис. 37, в), что свидетельствует о хорошем уровне коррекций поперечных aberrаций в оптической системе.

Аберрационные расчеты по приведенным конструктивным параметрам (см. рис. 37, б), показывают, что кривизна изображения и астигматизм за окуляром не превышают 0,2 дптр, дисторсия составляет около 9 %.

Хроматизм положения в системе уменьшен до 1/1 000 от фокусного расстояния окуляра. Таким образом, предложенный прием по добавлению дополнительной линзы в ходе изменения дизайна оптической системы окуляра оказался эффективным.

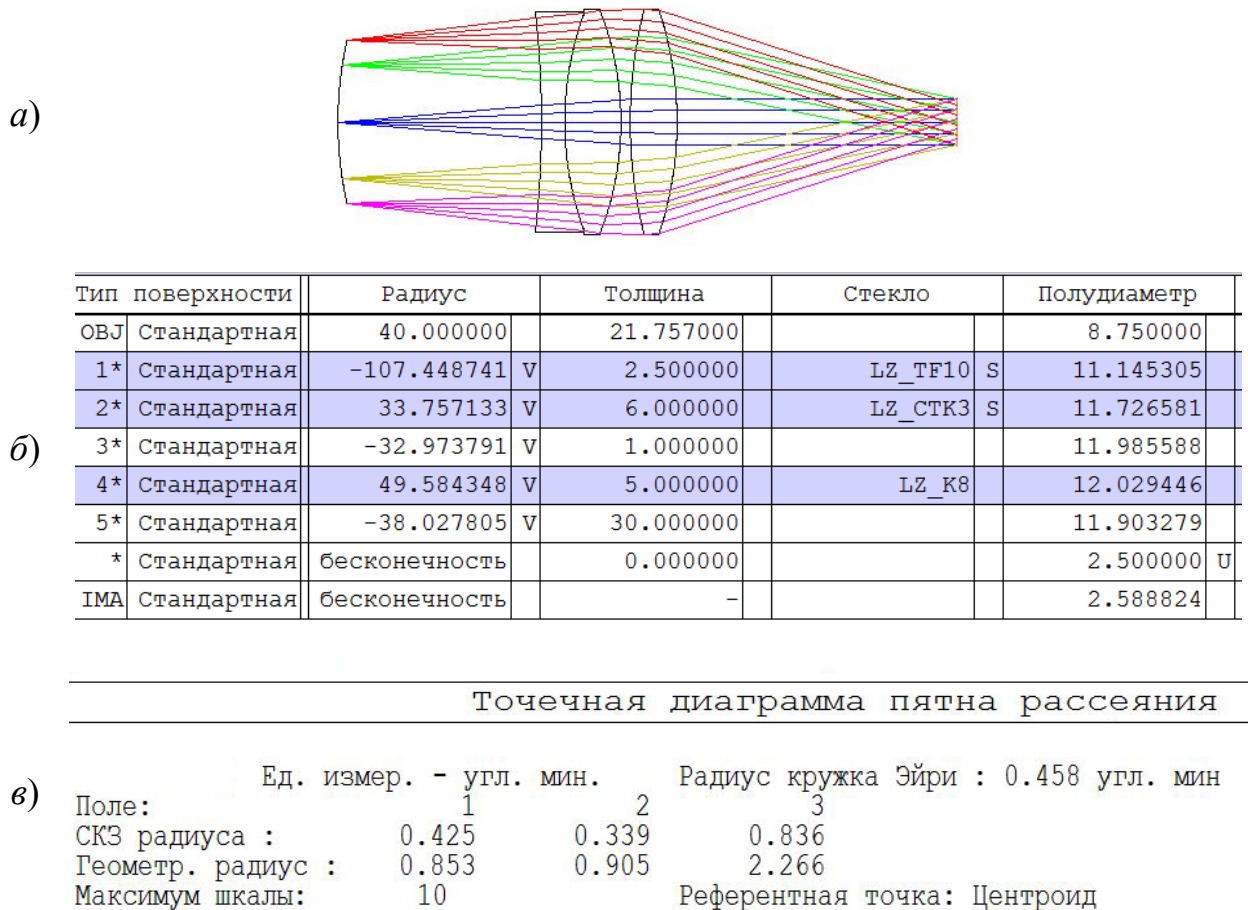


Рис. 37. Схема синтезированного окуляра в прямом ходе лучей

При выборе стартовой системы необходимо учитывать, что использование принципа «проектирование из плоскопараллельных пластинок» требует определенного опыта и не всегда приемлемо для магистрантов – начинающих разработчиков. Но в то же время приведенный пример демонстрирует мощные возможности, заложенные в современных программах по компьютерным методам расчета и проектирования оптических систем.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

3.1. Особенности проектирования оптических систем объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми приемниками инфракрасного излучения

В области оптико-электронного приборостроения тепловизионные приборы занимают одну из ключевых позиций. Современный уровень развития элементной базы тепловизионных приборов обеспечивает наличие на рынке большого количества тепловизионных приборов различного назначения. Исследования по оптическим системам [56, 57], приемникам, электронным модулям и обработке сигналов [59, 60], конструктивным исполнениям, тенденциям [61], моделированию в различных условиях эксплуатации приборов [61, 62] широко представлены в научно-технической литературе. Совершенствование тепловизионных приборов и их элементной базы продолжается и в настоящее время, о чем свидетельствуют статьи и патенты последних лет [63–67].

Стоимость оптических систем занимает значимую долю в общей стоимости тепловизионного прибора. Согласно [4], «совершенствование неохлаждаемых многоэлементных приемников (МПИ) излучения и технологии их изготовления стало приводить к тому, что наиболее существенной составляющей в структуре цены на инфракрасные системы с такими МПИ с конца 90-х годов часто является стоимость оптической системы». Такая ситуация, отмеченная на момент выхода [4] в 2004 г., сохраняется до настоящего времени. Поэтому разработка и производство оптических систем являются важным этапом при создании тепловизионных приборов с точки зрения как трудоемкости разработки, так и стоимости прибора.

Классификация объективов тепловизионных приборов во многом совпадает с классификацией самих тепловизионных приборов.

В зависимости от спектрального диапазона работы объективы делятся на объективы, предназначенные для работы в диапазоне длин волн от 3 до 5 мкм (MWIR объективы), и объективы, предназначенные для работы в диапазоне длин волн от 8 до 12 (14) мкм (LWIR объективы).

По типу приемника излучений выделяют объективы для сопряжения с неохлаждаемыми приемниками и объективы для сопряжения с охлаждаемыми приемниками излучений.

По характеру фокусного расстояния различают объективы с фиксированным фокусным расстоянием и объективы с переменным фокусным расстоянием (с дискретным изменением фокусного расстояния, панкратические, зом объективы).

По типу атермализации объективы делятся на объективы с пассивной атермализацией и объективы с активной атермализацией.

Проектирование оптических систем объективов с панкратической или дискретной сменой фокусного расстояния относится к специальному уровню разработок, и в настоящем учебнике не рассматривается.

Далее сфокусируемся на особенностях проектирования оптических систем объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений. К ним предъявляются следующие основные требования:

- использование материалов с высоким пропусканием в рабочем спектральном диапазоне чувствительности приемника;
- согласование фокусного расстояния, относительного отверстия, углового поля с параметрами приемника и требованиями по обнаружению и распознаванию объектов на заданной дальности;
- обеспечение высокого качества изображения в пределах поля зрения;
- обеспечение ортоскопичности;
- обеспечение телецентрического хода главных лучей в пространстве изображений для создания равномерности облученности всех точек изображения, отсутствие виньетирования;
- минимизация массы и габаритных размеров для обеспечения минимальной характеристики «конструктивный объем прибора / дальность распознавания»;

- активная или пассивная компенсация термооптических aberrаций;
- возможность фокусировки на различные расстояния до объектов.

Как известно, большая группа задач проектирования сложных оптических систем сводится к расчету двухкомпонентных схем. В частности, если под компонентами понимаются одиночные линзы, то схемы, соответственно, называются двухлинзовыми [68, с. 271]. В [69] рассматривается двухкомпонентная модель линзового объектива малогабаритного тепловизора. Решения с наименьшими значениями относительных отверстий каждого из компонентов схемы с учетом ограничений по осевой длине и возможности получения положительного заднего фокального отрезка объектива определяют области оптимальных схемных решений в рассматриваемой модели.

В схеме из двух тонких компонентов обеспечение телецентрического хода главных лучей в пространстве изображений достигается тем, что апертурная диафрагма располагается в передней фокальной плоскости второго компонента, и для уменьшения диаметра первого компонента совмещается с ним (рис. 38). Таким образом, на этапе построения исходной модели закладывается условие, что диаметр первого компонента не превышает диаметр входного зрачка объектива, что связано с требованиями по минимизации массы и поперечных габаритных размеров объектива.

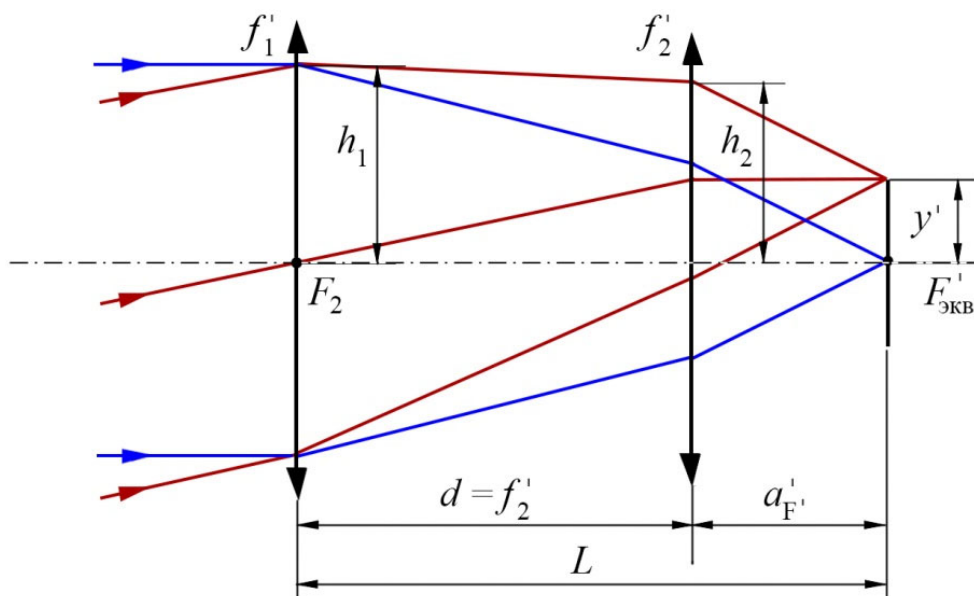


Рис. 38. Двухкомпонентная модель телецентрического объектива

Для анализа модели выбрано относительное отверстие 1 : 1. Выбор относительного отверстия связан с тем, что рассматриваемая модель должна соответствовать высоким требованиям по обнаружению объектов в тепловизионных приборах, в которых объективы применяются. Схемы с меньшими относительными отверстиями не представляют практического интереса с позиций разработки тепловизионных приборов с конкурентноспособными характеристиками.

На основе законов параксиальной (идеальной) оптики для анализируемой модели имеют место следующие соотношения между ее параметрами:

$$d = f_2'; f' = f_2'; L = 2f_2' - \frac{f_2'^2}{f_1'}; a_{F'}' = f_2' \left(1 - \frac{f_2'}{f_1'} \right);$$

$$2h_1 = f'; h_2 = y' + 0,5 \cdot a_{F'}'; K_1 = \left| \frac{f_1'}{f_2'} \right|; K_2 = \left| \frac{f_2'}{2h_2} \right|,$$

где f_1' , f_2' , f' – фокусные расстояния соответственно первого компонента, второго компонента и всего объектива (см. рис. 38); d – расстояние по оптической оси между компонентами; L – длина объектива в тонких компонентах; $a_{F'}'$ – задний отрезок; h_1 , h_2 – наибольшие световые высоты лучей на компонентах; K_1 , K_2 – диафрагменные числа компонентов; y' – размер изображения (полудиагональ чувствительной площадки приемника).

Допустимое отклонение от телецентрического хода главных лучей в пространстве изображений при работе объектива совместно с неохлаждаемым матричным приемником изображений определяется, исходя из условия обеспечения одинаковых условий облученности всех пикселей приемника. При отсутствии виньетирования наклонных пучков допустимое отклонение главных лучей крайних пучков от телецентрического хода (нетелецентричность) может достигать от 10 до 15°.

Строго телецентрическая модель, представленная на рис. 38, трансформирована на рис. 39 в модель с допустимой нетелецентричностью путем изменения расстояния d , при котором отклонение главных лучей

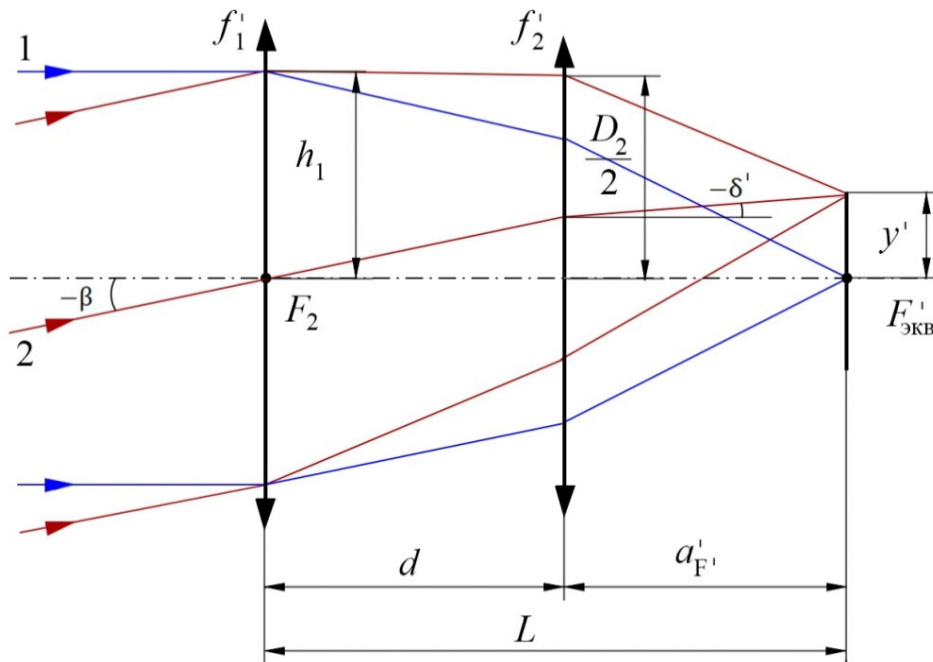


Рис. 39. Двухкомпонентная модель с допустимой нетелецентричностью

Соотношения между параметрами для модели с допустимой нетелецентричностью δ' , в которой входной зрачок совмещен с первым параксиальным компонентом, относительное отверстие составляет $1 : 1$, выполнена нормировка $f' = 1$, определяются на основании известных формул произвольных тангенсов:

- для апертурного луча 1: $h_1 = 0,5$; $\text{tg } \alpha'_1 = 0,5 / f'_1$; $h_2 = 0,5 - d \cdot \text{tg } \alpha'_1$;
 $0,5 = \text{tg } \alpha'_1 + h_2 / f'_2$; $a'_{F'} = 2h_2$; $L = d + a'_{F'}$;
- для главного луча 2: $h_2 = -d \cdot \text{tg } \beta$; $\text{tg } \delta' = \text{tg } \beta + h_2 / f'_2$.

Здесь α и β – углы апертурного и главного лучей с оптической осью, при этом $\beta'_2 = \delta'$, $\text{tg } \beta = -y'$. Между параметрами d , δ' и y' выполняется соотношение $d = f'_2(1 + \text{tg } \delta'/y')$. Диаметр D_2 второго компонента определяется как удвоенная наибольшая высота лучей на компоненте.

В [69] проведено исследование модели для двух значений y' (0,2 и 0,4) и углов δ' , лежащих в диапазоне от $+10^\circ$ до минус 10° . Для выявления области решений были расширены ограничения по диафрагменным числам компонентов и заднему фокальному отрезку объектива. Как известно из опыта проектирования оптических систем тепловизоров, одиночные линзы при большом показателе преломления материала могут иметь относительные отверстия до 1 : 1 и выше. Поэтому, если принять, что компонент объектива может состоять из двух таких линз, то относительное отверстие компонента может составлять до 1 : 0,5.

В случае использования в объективе компонентов, имеющих вынесенные главные плоскости, задний фокальный отрезок в параксиальной модели может быть отрицательным. Поэтому при определении области решений по двухкомпонентной модели с учетом допустимой нетелецентричности приняты следующие ограничения: $a'_{F'} > -0,5$; $K_1 \geq 0,5$; $K_2 \geq 0,5$; $L \leq 2f'$.

На рис. 40 изображены наложенные друг на друга результаты определения областей решений для случаев $y' = 0,2$ и $y' = 0,4$ при угле δ' , равном $+10^\circ$ и минус 10° , относительном отверстии 1 : 1 и нормировке $f' = 1$, заимствованные из [69]. Точками показаны параметры объективов, разработанных автором для применения в малогабаритных тепловизионных приборах спектрального диапазона от 8 до 14 мкм, характеристики которых приведены в [69–76].

В качестве примера на рис. 41 показан результат моделирования хода лучей в оптической схеме объектива, параметры которой удовлетворяют вышеприведенным соотношениям. Эквивалентное фокусное расстояние объектива равно фокусному расстоянию второго компонента, расстояние между компонентами равно по значению фокусному расстоянию второго компонента. Рисунок иллюстрирует, что главные лучи наклонных пучков имеют в пространстве изображений телецентрический ход. На основе этой схемы в подразделе 3.2.3 демонстрируется расчет объектива.

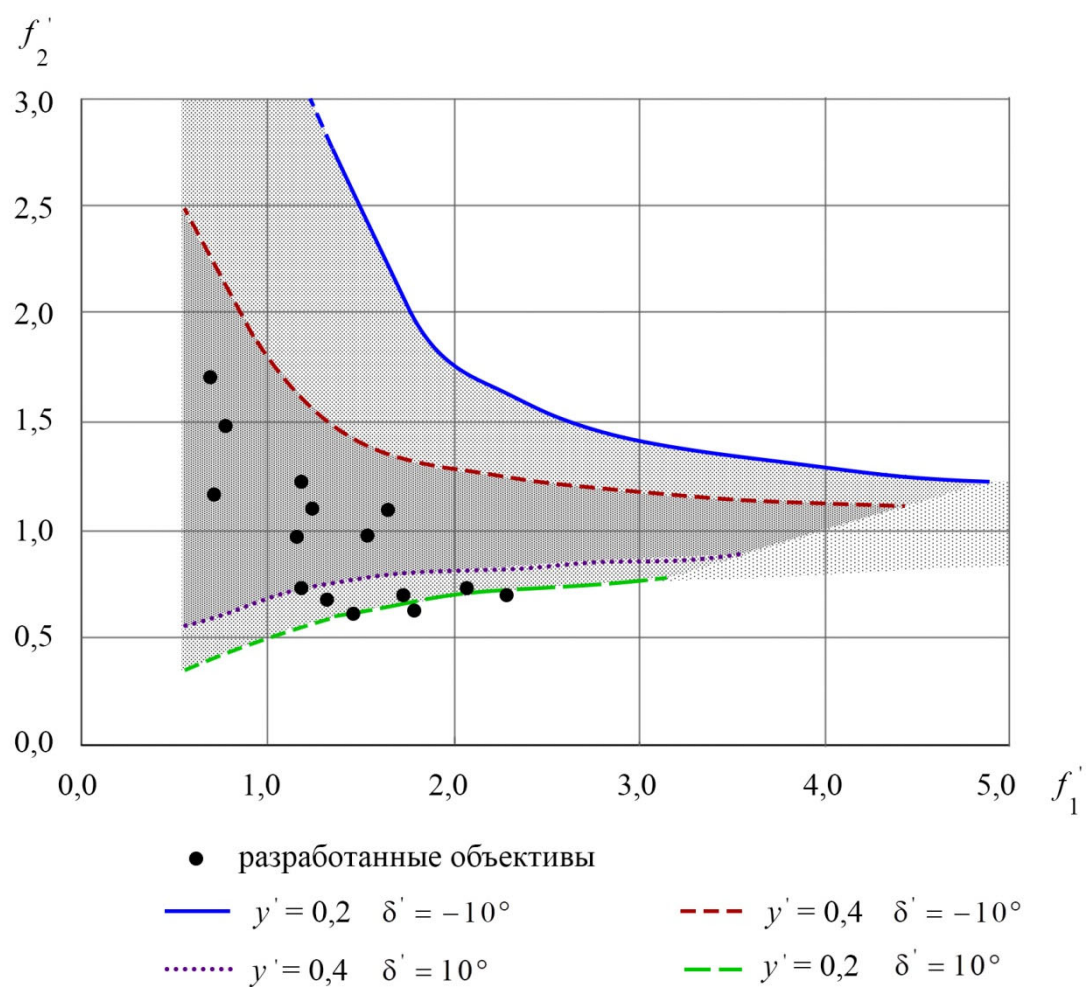
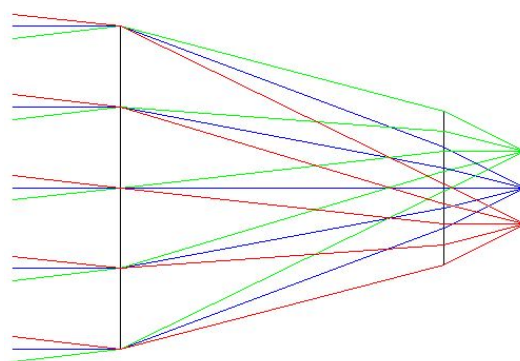


Рис. 40. Области решений [69]



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр	Фокусн. расст.
ОВУ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность	
1 Стандартная	бесконечность	20.000000		32.266667	
* Параксиал..		60.000000		30.000000	80.000000
3* Параксиал..		15.000000	М	14.300000	60.000000
ИМА Стандартная	бесконечность	-		6.800000	

Рис. 41. Параксиальная модель
двухкомпонентного телецентрического объектива

По результатам анализа светосильных линзовых объективов с учетом ограничений, накладываемых требованиями малогабаритности, показано, что для создания телецентрического светосильного объектива возможны схемные решения, в которых оптические силы первого и второго компонентов могут принимать значения, лежащие в диапазоне от 2,0 до 0,3 и менее, при этом: по мере увеличения оптической силы первого компонента увеличивается диапазон оптических сил второго компонента, повышаются относительные отверстия компонентов, уменьшаются длина системы и задний фокальный отрезок; по мере уменьшения оптической силы первого компонента уменьшается диапазон оптических сил второго компонента, снижаются относительные отверстия компонентов, возрастает длина системы; при повышении y' с 0,2 до 0,4 область решений f_2' уменьшается почти вдвое.

Структурный анализ объективов, разработанных для малогабаритных тепловизионных приборов, показал следующее: по значениям параметров компонентов разработанные объективы практически все попадают в область решений, полученную по математической модели; значения дифрагменных чисел компонентов колеблются от 0,6 до 2,6; угол отступления от телецентричности находится в диапазоне от $0,6^\circ$ до $10,6^\circ$; между оптическими силами компонентов имеют место следующие соотношения: $\varphi_1 = (1,5 \div 0,4)\varphi$; $\varphi_2 = (1,6 \div 0,6)\varphi$; $\varphi_1 = (2,5 \div 0,3)\varphi_2$; длина оптической системы вдоль оптической оси, включая задний фокальный отрезок, находится в диапазоне от 1,2 до 1,7 от фокусного расстояния объектива.

При компьютерной оптимизации конструктивных параметров в ходе разработки новых оптических систем объективов для малогабаритных тепловизионных приборов рекомендуется использовать ограничения по значениям оптических сил (фокусных расстояний) компонентов схемы.

На этапе схмотехнического проектирования при оценке габаритных размеров вновь проектируемого тепловизионного прибора на основе не охлаждаемого матричного приемника можно рекомендовать использовать условие: длина оптической системы объектива должна находиться в диапазоне от 1,2 до 1,7 от фокусного расстояния объектива.

При выборе исходной схемы для расчета объектива следует принимать во внимание, что решения с большим диапазоном возможных оптических сил компонентов имеют большие возможности по абберационной коррекции.

3.2. Проектирование оптической системы объектива тепловизионного прибора

3.2.1. Варианты оптических систем объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми приемниками излучений

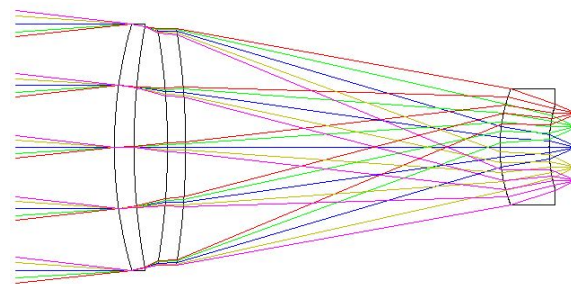
Процесс создания оптической системы любого объектива осуществляется на основе итерационного процесса, включающего синтез (выбор или создание стартовой системы), оптимизацию и анализ. Объективы для тепловизионных приборов не являются исключением.

«Современный уровень развития элементной базы тепловизионных приборов таков, что основная нагрузка в проектировании и создании новой модели тепловизионного прибора переносится на решение научно-технической задачи по оптимальному сопряжению параметров и характеристик оптики, приемника излучения и модулей электронной обработки изображения и регистрирующего устройства, а эффективность применения новой модели прибора во многом определяется специальным программным обеспечением по обработке термоизображений и видеосигналов, отражающим специфику применения прибора или комплекса для решения конкретных задач» [77].

Для магистранта, как начинающего разработчика оптических систем тепловизионных приборов, важным является изучение уже существующих оптических систем инфракрасных объективов. Некоторые из них могут послужить стартовой системой при разработке нового объектива в соответствии с заданием для разработки, изучение других будет полезным для понимания структурных схем этого типа объективов, дизайна компонентов, оценки качества изображения, получения информации по используемым материалам в инфракрасных объективах.

Для данного учебника по литературным и патентным источникам отобран ряд инфракрасных объективов, характеристики и конструктивные параметры которых приведены на рис. 42–51. Эти объективы предназначены для работы совместно с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений в составе тепловизионных приборов.

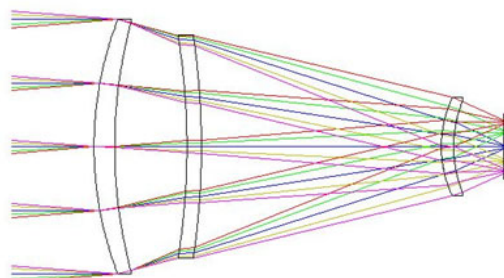
Фокусное расстояние 60 мм
 Приемник: 640 × 480
 Шаг пикселей 17 мкм
 Относительное отверстие 1 : 1,2
 Спектральный диапазон 8–14 мкм
 Основная длина волны 10,6 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
* Стандартная	90.360000	4.000000	GERMANIUM	25.000000
2* Стандартная	136.140000	6.800000		24.497206
3* Стандартная	-145.550000	3.700000	ZNSE	23.986014
4* Стандартная	-155.960000	64.000000		24.057428
5* Стандартная	32.810000	10.000000	GERMANIUM	11.763429
6* Стандартная	30.970000	4.620000		8.753905
7* Стандартная	бесконечность	0.800000	GERMANIUM	8.000000 U
8* Стандартная	бесконечность	0.750000		8.000000 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		6.839581

Рис. 42. ИК объектив [38, с. 334]

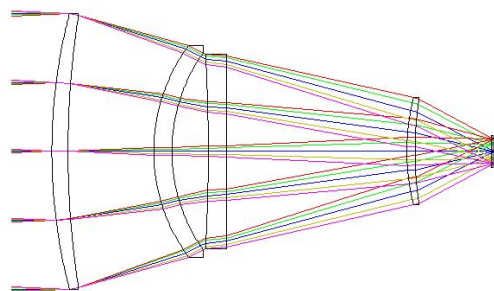
Фокусное расстояние 75 мм
 Приемник: 384 × 288
 Шаг пикселей 25 мкм
 Относительное отверстие 1 : 1,2
 Спектральный диапазон 8–14 мкм
 Основная длина волны 10,6 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
* Стандартная	87.540000	5.000000	GERMANIUM	31.268259
2* Стандартная	120.230000	17.500000		30.440706
3* Стандартная	-175.790000	3.500000	ZNSE	27.372980
4* Стандартная	-194.090000	58.100000		27.321870
5* Стандартная	28.640000	3.000000	GERMANIUM	12.088182
6* Стандартная	30.480000	12.069600		11.103419
7* Стандартная	бесконечность	0.800000	GERMANIUM	8.000000 U
8* Стандартная	бесконечность	1.000000		8.000000 U
9 Стандартная	бесконечность	0.011000		6.010359
IMA Стандартная	бесконечность	-		6.006792

Рис. 43. ИК объектив [38, с. 265]

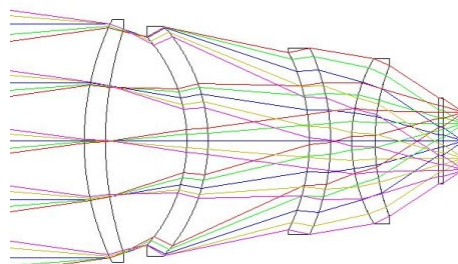
Фокусное расстояние 150 мм
 Приемник: 384 × 288
 Шаг пикселей 25 мкм
 Относительное отверстие 1 : 1,1
 Спектральный диапазон 8–14 мкм
 Основная длина волны 11 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
* Стандартная	269.800000	8.000000	GERMANIUM	68.165086
2* Стандартная	438.500000	42.500000		67.343461
3* Стандартная	87.540000	9.000000	ZNSE	52.323199
4* Стандартная	83.950000	18.000000		48.551485
5* Стандартная	-843.200000	9.000000	ZNSE	48.187537
6* Стандартная	бесконечность	89.400000		47.238036
7 Стандартная	109.400000	4.000000	GERMANIUM	26.551809
8 Стандартная	166.340000	37.870000		25.881272
9* Стандартная	бесконечность	0.800000	GERMANIUM	8.000000 U
10* Стандартная	бесконечность	1.000000		8.000000 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		6.013617

Рис. 44. ИК объектив [78, с. 253]

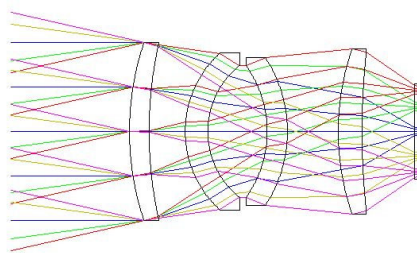
Фокусное расстояние 49,7 мм
 Приемник: 640 × 480
 Шаг пикселей 17 мкм
 Угловое поле 15,8°
 Относительное отверстие 1 : 0,9
 Спектральный диапазон 8–12 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
* Стандартная	65.610000	5.000000	GERMANIUM	28.700000 U
2* Стандартная	83.560000	19.220000		26.600000 U
3* Стандартная	-36.900000	5.000000	GERMANIUM	24.660000 U
4* Стандартная	-40.550000	23.920000		27.200000 U
5* Стандартная	-47.420000	5.000000	ZNSE	20.990000 U
6* Стандартная	-52.000000	5.000000		22.000000 U
7* Стандартная	39.450000	5.500000	GERMANIUM	19.550000 U
8* Стандартная	47.970000	15.000000		17.820000 U
9* Стандартная	бесконечность	1.000000	GERMANIUM	10.200000 U
10* Стандартная	бесконечность	4.946000		10.050000 U
11 Стандартная	бесконечность	0.011000		6.802168
IMA Стандартная	бесконечность	-		6.800000 U

Рис. 45. ИК объектив [79]

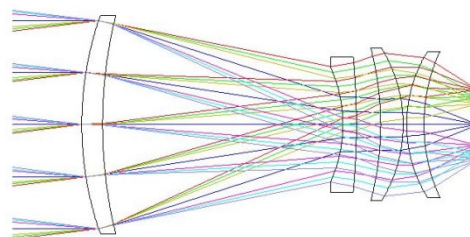
Фокусное расстояние 30 мм
 Приемник: 640 × 480
 Шаг пикселей 17 мкм
 Относительное отверстие 1 : 1
 Спектральный диапазон 8–12 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
* Стандартная	46.932867	3.300000	GE_LONG	15.000000 U
2* Стандартная	67.933527	6.088940		14.550000 U
3* Стандартная	17.823565	3.800000	ZNSE	13.200000 U
4* Стандартная	14.173855	10.000000		11.100000 U
5* Стандартная	-19.112929	3.400000	ZNSE	11.100000 U
6* Стандартная	-22.987830	8.574227		12.450000 U
7* Стандартная	42.585099	4.000000	GE_LONG	13.950000 U
8* Стандартная	124.319563	8.901765		13.400000 U
9* Стандартная	бесконечность	1.000000	3.42, 0.0	8.000000 U
10* Стандартная	бесконечность	1.000000		8.000000 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		6.870211

Рис. 46. ИК объектив [80]

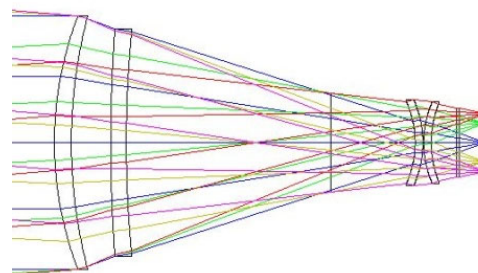
Фокусное расстояние 80 мм
 Диагональ приемника 20 мм
 Шаг пикселей 20 мкм
 Диаметр входного зрачка 60 мм
 Относительное отверстие 1 : 1,33
 Спектральный диапазон 8–12 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
* Стандартная	94.812362	6.000000	GE_LONG	31.500000 U
2* Стандартная	132.512402	69.350000		22.000000 U
3* Стандартная	-40.559048	3.900000	ZNSE	16.700000 U
4* Стандартная	-211.869103	7.000000		19.500000 U
5* Стандартная	-87.126396	6.500000	ZNSE	22.000000 U
6* Стандартная	-42.205325	1.000000		22.000000 U
7* Стандартная	39.527276	5.000000	GE_LONG	21.000000 U
8* Стандартная	50.480042	14.276663		21.000000 U
9* Стандартная	бесконечность	1.000000	3.42, 0.0	10.796653
10* Стандартная	бесконечность	1.000000		10.636671
IMA Стандартная	бесконечность	-		10.010059

Рис. 47. ИК объектив [81]

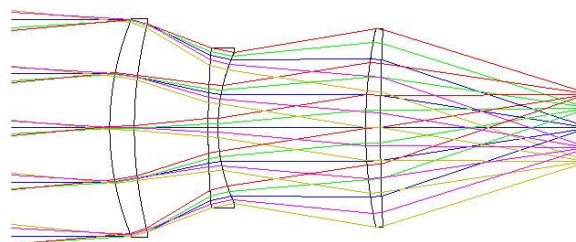
Фокусное расстояние 130 мм
 Угловое поле 9°
 Линейный размер изображения 20 мм
 Относительное отверстие 1 : 1,4
 Спектральный диапазон 8–12,5 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1* Стандартная	125.310000	6.000000	GERMANIUM	45.000000 U
2* Стандартная	176.200000	14.000000		45.000000 U
3* Стандартная	552.100000	5.500000	IKS25	40.477480
4* Стандартная	406.400000	72.540000		39.441669
* Стандартная	бесконечность	30.000000		17.532945
6* Стандартная	-35.480000	2.700000	IKS25	14.435178
7* Стандартная	-37.840000	0.300000		15.064169
8* Стандартная	35.480000	2.700000	GERMANIUM	14.449866
9* Стандартная	36.640000	9.000000		13.650860
10* Стандартная	бесконечность	1.000000	GERMANIUM	12.281882
11* Стандартная	бесконечность	9.367512 M		12.229257
IMA Стандартная	бесконечность	-		10.234160

Рис. 48. ИК объектив [81]

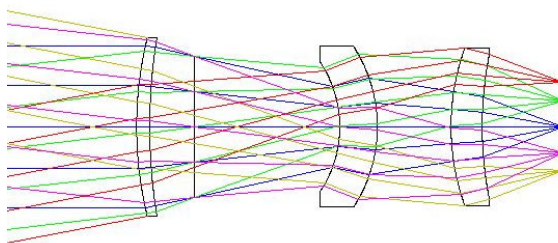
Фокусное расстояние 75 мм
 Размер (диагональ) изображения 13,6 мм
 Относительное отверстие 1 : 1,6
 Основная длина волны 10,6 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
STO Стандартная	57.000000	5.000000	GERMANIUM	22.104750
2 Стандартная	85.000000	15.000000		21.149116
3 Стандартная	210.000000	2.000000	ZNSE	16.222197
4 Стандартная	37.000000	30.000000		15.302059
5 Стандартная	100.000000	3.000000	GERMANIUM	20.120292
6 Стандартная	400.000000	41.746548 M		19.956195
IMA Стандартная	бесконечность	-		7.063329

Рис. 49. ИК объектив [82]

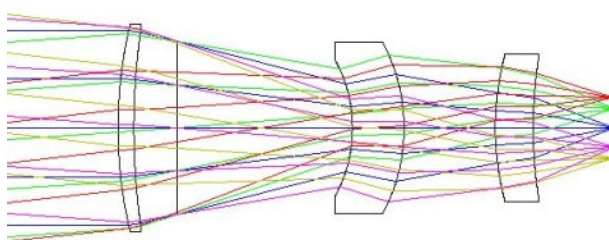
Фокусное расстояние 35 мм
Относительное отверстие 1 : 1,4
Угловое поле 24,7°
Спектральный диапазон 8–12 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1* Стандартная	58.710000	2.020000	GERMANIUM	13.700000 U
2* Стандартная	86.290000	6.940000		13.400000 U
STO Стандартная	бесконечность	22.300000		10.900000 U
4* Стандартная	-18.130000	5.800000	GERMANIUM	10.000000 U
5* Стандартная	-22.800000	11.350000		12.400000 U
6* Стандартная	36.000000	4.800000	GERMANIUM	12.200000 U
7* Стандартная	57.520000	12.386124 M		11.200000 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		6.798620

Рис. 50. ИК объектив [83]

Фокусное расстояние 50 мм
Относительное отверстие 1 : 1,43
Угловое поле 12,52°
Спектральный диапазон 8–12 мкм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1* Стандартная	81.110000	2.860000	GERMANIUM	18.800000 U
2* Стандартная	125.250000	7.740000		18.300000 U
STO Стандартная	бесконечность	31.870000		15.600000 U
4* Стандартная	-25.570000	9.330000	GERMANIUM	12.300000 U
5* Стандартная	-32.800000	16.530000		15.400000 U
6* Стандартная	51.440000	6.860000	GERMANIUM	13.400000 U
7* Стандартная	82.180000	14.740000 T		12.100000 U
IMA Стандартная	бесконечность	-		5.564671

Активн.: 1/2	Конфиг. 1*	Конфиг. 2
1: MOFF	0	
2: THIC	0	1.0000E+010
3: THIC	3	31.870000
4: THIC	5	16.530000

Рис. 51. ИК объектив [83]

Структурный анализ схемы, приведенной на рис. 42 [38, с. 334], показывает, что толстый мениск является основным силовым компонентом схемы, его фокусное расстояние практически совпадает с фокусным расстоянием всего объектива.

Комментарий к объективу, приведенному на рис. 45, – авторы в патенте указали следующее: «Характеристики качества изображения должны быть постоянны по всему полю изображения объективов, что предполагает отсутствие виньетирования полевых лучей, значение концентрации энергии в пикселе приемника должно быть не менее 65–70 % Концентрация энергии в пикселе размером (17×17) мкм в центре поля зрения ≥ 70 %; на краю поля зрения ≥ 47 %». При проверочном расчете объектива, приведенного на рис. 45, потребуется определить положение плоскости наилучшей установки. Оно составит 0,011 мм. В этой плоскости расчетные значения ФКЭ соответствуют заявленным в патенте. При анализе структурной схемы этого объектива в нем можно выделить два компонента: компонент 1 (первая и вторая линзы) и компонент 2 (третья и четвертая линзы). Анализ этого варианта показывает, что относительная оптическая сила компонента 1 составляет 0,543; компонента 2 – 1,013, и схема попадает в область решений, приведенную на рис. 40. В ней имеет место ход главных лучей, близкий к телецентрическому.

Магистрантам на практических занятиях предлагается провести аналогичный анализ для своих вариантов и наложить полученные результаты на графики, представленные на рис. 40.

Для объектива, приведенного на рис. 49, в [82] значения конструктивных параметров округлены и приведены с погрешностью 5 %. Поэтому приведенные на рис. 49 конструктивные параметры требуют оптимизации. Авторами патента утверждается, что высокое качество для фокусного расстояния 75 мм обеспечивается при изменении конструктивных параметров в пределах не более ± 5 %.

В объективе, приведенном на рис. 50, подвижкой второй линзы обеспечивается фокусировка на объекты, расположенные от бесконечности до 1 м. В объективе, приведенном на рис. 51, фокусировка на 1 м обеспечивается подвижкой третьей линзы.

В [83] приведены конструктивные параметры для вариантов объектива с фокусными расстояниями 25, 35 и 50 мм. Магистрантам предлагается рассчитать требуемые подвижки, оценить качество изображения, сравнить результаты с приведенными в [83]. На учебном занятии можно воспользоваться вариантами с другими фокусными расстояниями из указанного источника. Выполнение подобного упражнения позволит получить компетенции по расчету внутренней фокусировки в объективах и использованию режима мультikonфигураций.

На учебном занятии предлагается на примере объектива, приведенного на рис. 47, провести анализ качества изображения.

Анализ конструктивных параметров объективов, приведенных на рис. 42–51, позволяет выявить материалы, которые использованы в них.

Одним из основных материалов во всех приведенных примерах является германий. Германий пропускает излучение в диапазоне длин волн от 2 до 23 мкм. Германий имеет показатель преломления примерно 4,0, коэффициент средней дисперсии в диапазоне от 8 до 14 мкм почти на порядок (примерно в 7–8 раз) выше, чем в диапазоне от 3 до 5 мкм. Плотность германия – 5,32 г/см³. Показатель преломления германия сильно зависит от температуры. Значение dn/dT составляет $4,08 \cdot 10^{-4}$ 1/градус (для длины волны 10,6 мкм). Коэффициент линейного теплового расширения германия составляет $6,1 \cdot 10^{-6}$ 1/градус (при 293 К).

Пропускание образца германия толщиной 1 мм составляет 46,8 % для излучения с длиной волны 10,6 мкм [84]. Указанное значение учитывает как поглощение внутри образца, так и потери на поверхностях плоского образца. Согласно [85] потери на отражение на двух поверхностях для длины волны 11 мкм составляют 53 %. Поглощение внутри германия увеличивается при повышении температуры, и при высоких температурах германий может потерять прозрачность. Значения показателей поглощения для различных температур и другие характеристики германия, равно как и других инфракрасных материалов, можно найти в справочниках и на сайтах производителей инфракрасной оптики [78, с. 450, 84–86 и др.].

Селенид цинка ZnSe пропускает излучение в диапазоне длин волн от 0,55 до 19 мкм. Показатель преломления в диапазоне длин волн от 3 до 5 мкм составляет примерно 2,43; в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм –

от 2,42 до 2,38. Плотность селенида цинка $5,27 \text{ г/см}^3$. Значение dn/dT составляет $6,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/градус}$ (для длины волны $10,6 \text{ мкм}$). Потери на отражение от двух поверхностей плоского образца составляют $29,1 \%$ (для излучения с длиной волны $10,6 \text{ мкм}$). Температурный коэффициент линейного расширения равен $7,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/градус}$ (при 273 К).

Группа оптических материалов под общим названием халькогенидные стекла обеспечивают пропускание излучения в диапазоне длин волн от 1 до 17 мкм . Различные производители выпускают их под своими фирменными названиями: оптические бескислородные инфракрасные стекла типа ИКС (РФ), халькогенидные стекла типа Gasir (Франция), типа IRG (Schott) и др. Показатели преломления халькогенидных стекол различных марок находятся в диапазоне от $2,2$ до $3,0$. Коэффициенты средней дисперсии в диапазоне длин волн от 8 до 12 мкм для различных марок стекол типа IRG находятся в пределах от 110 до 170 .

При использовании компьютерных методов проектирования оптических систем следует обращать внимание на полноту информации о свойствах применяемых материалов в каталогах стекол, поставляемых в составе программ компьютерного проектирования оптики. При необходимости эти каталоги корректируются, имеется возможность ввода новых марок стекол или корректировки свойств имеющихся марок стекол.

В силу высоких показателей преломления оптические детали из инфракрасных материалов применяются в объективах тепловизионных приборов с просветляющими покрытиями.

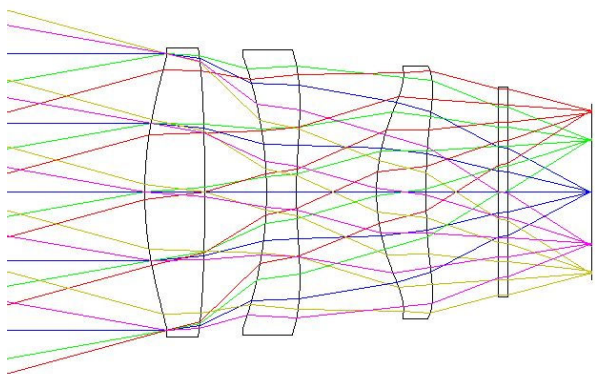


Рис. 52. ИК объектив [88]

Современные технологии формообразования позволяют использовать асферические поверхности для создания объективов тепловизионных приборов. На рис. 52 приведена оптическая схема из патента [87], в которой все поверхности, кроме третьей по ходу лучей, являются асферическими, при этом четвертая из них является киноформной. Материал линз – сульфид

цинка ZnS. Объектив имеет фокусное расстояние 19 мм, угловое поле $30,5^\circ$, относительное отверстие 1 : 1.

Применение асферических профилей и дифракционных оптических элементов в инфракрасных объективах направлено на повышение относительного отверстия, углового поля, пропускания, уменьшение массы и длины объективов. Использование в оптических системах асферических поверхностей и дифракционных оптических элементов переводит разработку объектива тепловизионного прибора из типовой в специальную; к ней можно приступить после освоения методик компьютерного проектирования типовых объективов.

3.2.2. Учебная научно-исследовательская работа как способ изучения законов прикладной оптики

Анализ оптических систем объективов проводится на учебных занятиях. Анализируя дизайн отдельных линз в оптических системах, приведенных в вариантах на рис. 42–51, обращается внимание, что большинство линз имеет форму менисков (положительных или отрицательных). Ориентация менисков различна: первый мениск в оптических системах обращен выпуклой поверхностью к пространству предметов, остальные – обращены к пространству предметов как выпуклой, так и вогнутой поверхностями. Дизайн (форма) линз в инфракрасном объективе зависит от той функции, которую выполняет линза для коррекции аберраций в объективе.

Прежде чем приступить к разработке инфракрасных объективов в соответствии с техническим заданием, на практических занятиях магистрантам дается такая задача: рассчитать одиночную линзу из германия с заданными фокусным расстоянием и относительным отверстием, которая обеспечила бы наименьшие геометрические аберрации в изображении точки на оси. Предлагается провести расчеты для линз с различными относительными отверстиями – от 1 : 10 до 1 : 1.

После того, как магистрант нашел решение своей конкретной задачи, проводится обобщение результатов, полученных обучающимися группы: вычисляются отношения радиусов кривизны преломляющих поверхностей линзы, проводится расчет формы линзы, обеспечивающей

минимум сферической аберрации, по известным формулам прикладной оптики [88, с. 283], проводится сравнение с исследованиями, приведенными в книге Ллойда [89] и т. д.

Примером подобных исследования может служить работа, выполненная магистрантом прошлых лет [90].

Результаты первого этапа учебной научно-исследовательской работы должны убедить обучающегося, что линза, расположенная в зоне апертурной диафрагмы, для минимизации аберраций широкого пучка лучей должна иметь дизайн в виде мениска с определенным соотношением радиусов.

В многолинзовых системах объективов обеспечивается сложение аберраций отдельных линз до достижения некоторого итогового минимума не только сферической, и всех остальных аберраций в изображении, но, тем не менее, полезно сопоставить отношение радиусов в первом мениске каждого из приведенных объективов с результатами своих исследований одиночной линзы с минимальным размером геометрических аберраций осевого пучка лучей.

На втором этапе анализируются хроматические аберрации отдельной линзы и дублета. Предлагается сравнить значение хроматизма положения изображения для мениска, полученного на первом этапе, с расчетным значением для тонкой линзы по известной формуле прикладной оптике [49, с. 14]. Коэффициент средней дисперсии материала предлагается вычислить, воспользовавшись значениями показателя преломления германия, рассчитываемых компьютерной программой по дисперсионной формуле. Аналогичные исследования предлагается провести как в спектральном диапазоне от 8 до 12 мкм, так и в диапазоне от 3 до 5 мкм. Магистранты формулируют ответы на следующие вопросы: а) коррелируют ли между собой значения хроматизма положения, рассчитанные по формуле для тонкой линзы и полученные путем расчетов с помощью компьютерной программы; б) во сколько раз отличается хроматизм положения изображения в указанных спектральных диапазонах и чем это отличие обусловлено?

При проведении компьютерного моделирования ахроматического дублета к линзе из германия добавляется плоскопараллельная пластинка,

например из селенида цинка. Радиусы поверхностей плоскопараллельной пластинки включаются в число переменных параметров. При оптимизации конструктивных параметров устанавливается требование ахроматизации в рабочем спектральном диапазоне. При анализе оптических систем в ходе оптимизации контролируется вид кривой хроматизма положения до получения типичного вида, характерного для ахроматической коррекции. В окончательном варианте полученного ахроматического дублета определяется соотношение оптических сил линз. Проводится сравнение полученного соотношения с теоретическим. Исследование проводится для сочетаний германия с различными материалами, прозрачными в исследуемом спектральном диапазоне. Обобщая результаты работы, рекомендуется на диаграмме «показатель преломления – коэффициент средней дисперсии» (типа диаграммы Аббе) показать положение германия и селенида цинка для двух спектральных диапазонов и сравнить свои результаты с опубликованными в литературе, например [91, с. 26].

На третьем этапе проводится компьютерное моделирование линзы с устраненным астигматизмом. Предлагается компьютерными методами определить положение апертурной диафрагмы и форму германиевой линзы, при которых обеспечивается анастигматическая коррекция, и сравнить результаты, полученные в инфракрасном диапазоне с известными решениями в видимом диапазоне спектра.

В ходе учебной научно-исследовательской работы у магистрантов могут возникнуть другие вопросы, преподавателем могут быть поставлены новые вопросы, поиск ответов на которые потребует от обучающихся проведения компьютерных расчетов, сравнения результатов с теоретическими положениями и результатами других исследователей. Несмотря на то, что автору настоящего учебника и преподавателям, ведущим учебные занятия по компьютерным методам проектирования, ответы на многие вышеперечисленные вопросы известны, начинающему разработчику инфракрасной оптики рекомендуется пройти предложенным путем для формирования собственных профессиональных компетенций.

Здесь уместно привести цитату из книги известного отечественного оптотехника И. А. Турыгина: «Расчет оптической системы всегда является исследовательской работой» [92, с. 383]. Знания, полученные по результа-

там учебной научно-исследовательской работы, призваны помочь магистрантам увидеть в результатах компьютерных методов проектирования оптических систем объективов тепловизионных систем не некий случайный набор оптических элементов, а проявление фундаментальных законов и закономерностей прикладной оптики.

3.2.3. Пример разработки оптической системы объектива тепловизионного прибора

Рассматривается следующее техническое задание на разработку учебного инфракрасного объектива:

- фокусное расстояние 60 мм;
- относительное отверстие 1 : 1,2;
- спектральный диапазон от 8 до 12 мкм;
- приемник излучения 640×460 элементов, шаг пикселей 0,017 мм.

В качестве стартовой системы для ее дальнейшей оптимизации может быть выбран один из объективов, конструктивные параметры которых приведены в подразделе 3.2.1. Но в данном примере магистрантам предлагается самостоятельно создать исходную оптическую систему, используя подход к созданию структурной схемы объектива, изложенный в подразделе 3.1, и знания, полученные при выполнении творческих заданий по подразделу 3.2.2.

Структурная схема объектива, сопрягаемого с неохлаждаемым матричным приемником излучений, создается на основе двухкомпонентной модели. Например, можно использовать компоненты с фокусным расстоянием 80 и 60 мм, установленные на расстоянии 60 мм (см. схему на рис. 41), входящие в область решений двухкомпонентной модели. Апертурная диафрагма совмещается с первым компонентом. В качестве материала линз выбирается германий. Форма линз выбирается в виде менисков, обеспечивающих наименьшие размеры геометрических aberrаций в изображении осевой точки. В результате исходная система может иметь вид, представленный на рис. 53.

Анализ созданной исходной системы показывает следующие значения геометрических aberrаций: астигматизм около 0,3 мм, хроматизм по-

ложения 0,06 мм, дисторсия менее 0,3 %, среднеквадратические размеры в пятне рассеяния в центре и по полю составляют от 0,26 до 0,33 мм. При этом радиус кружка Эйри составляет 0,015 мм.

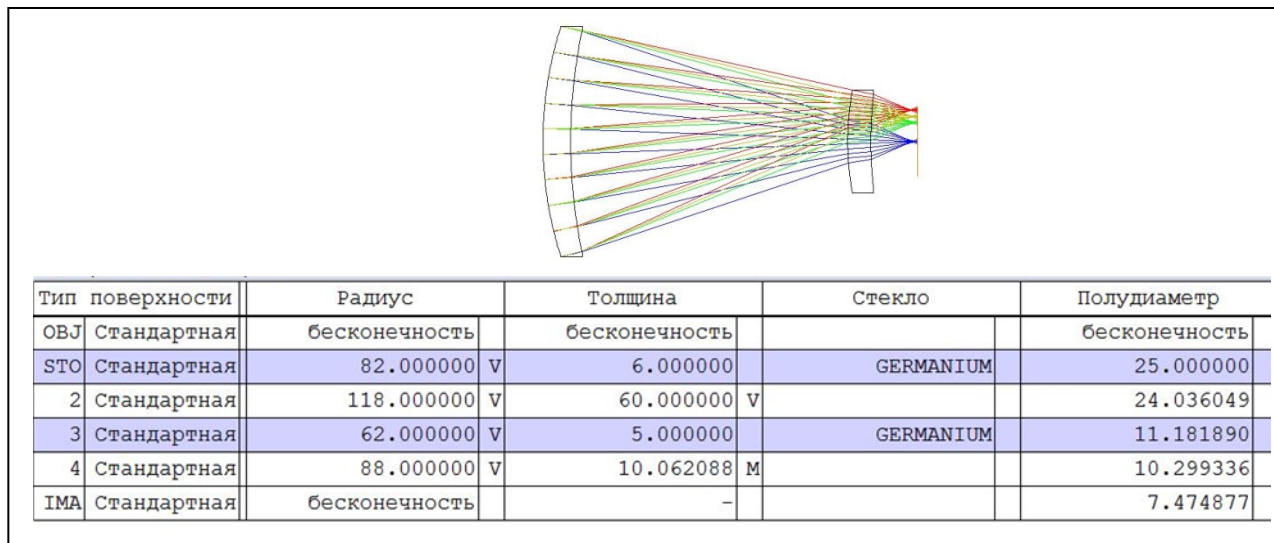


Рис. 53. Исходная система

Первый этап оптимизации проводится с целью минимизации геометрических aberrаций. Можно использовать встроенную целевую функцию оптимизации, дополнив ее оператором фокусного расстояния. Например, целевая функция оптимизации может включать операторы TRAC для нескольких полей и оператор EFFL. Кроме того, рекомендуется ограничить общую длину системы (TOTR) и задать наименьшее значение заднего фокального отрезка, например, соответственно 95 и 15 мм. В результате оптимизации с автоматическим числом циклов среднеквадратический размер aberrаций может быть уменьшен примерно в два-три раза (рис. 54).

Анализ системы показывает, что одной из причин поперечных геометрических aberrаций является хроматизм положения изображения, который оказывается близким к значению, определяемому по формуле тонкой линзы. В ходе анализа проводятся указанные вычисления и сравнение. Поэтому, используя компетенции, полученные при выполнении заданий в подразделе 3.2.2, в систему вводится плоскопараллельная пластинка из ZnSe (рис. 55), а в целевую функцию оптимизации – требование к хроматизму положения (AXCL).

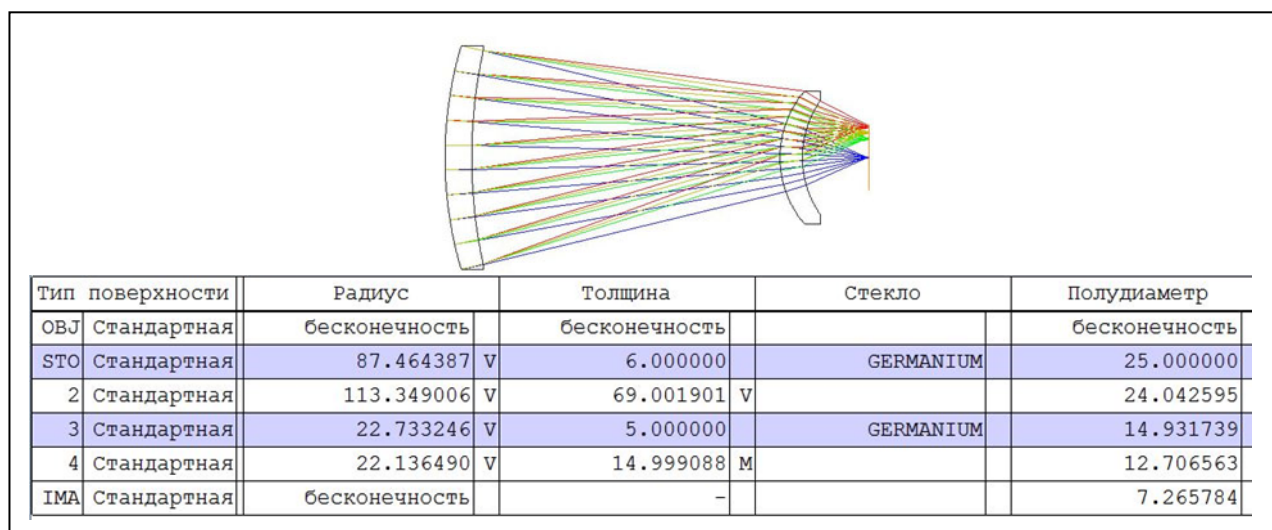


Рис. 54. Система в ходе первого этапа оптимизации

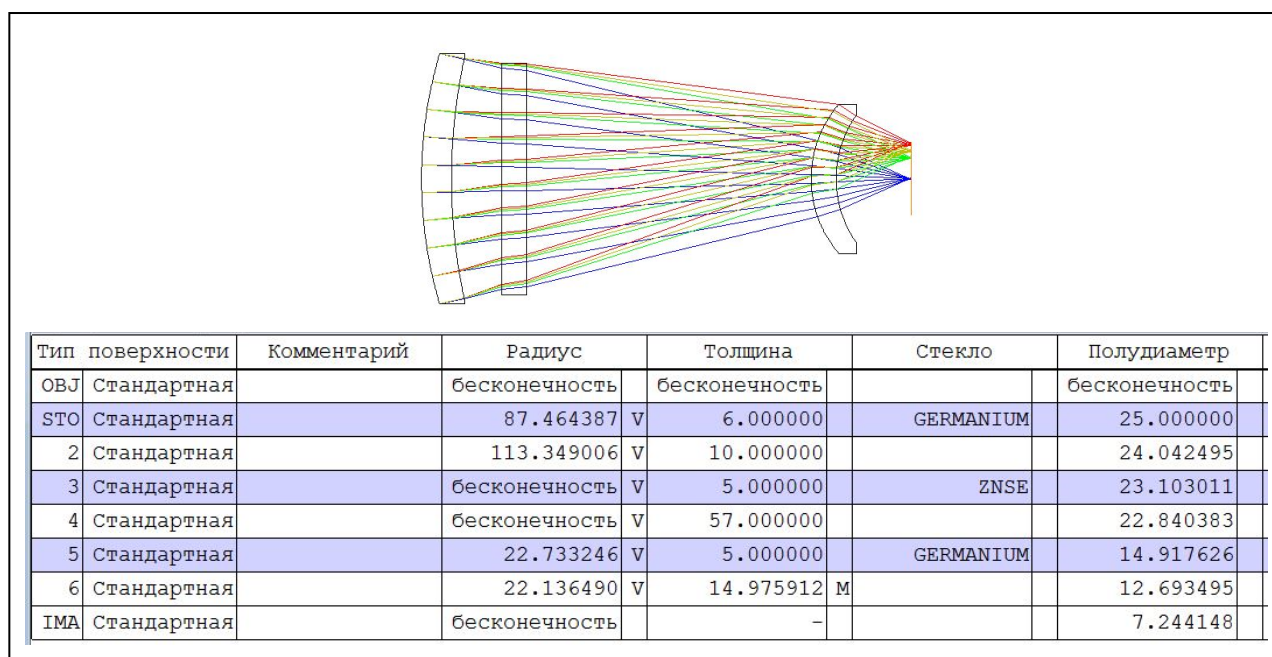


Рис. 55. Введение плоскопараллельной пластинки в систему

После оптимизации в системе в несколько раз уменьшается хроматизм положения, среднеквадратические значения поперечных геометрических aberrаций становятся меньше кружка Эйри (рис. 56).

На втором этапе оптимизация осуществляется с помощью интегральных показателей качества, например, с помощью операторов MTF (рис. 57).

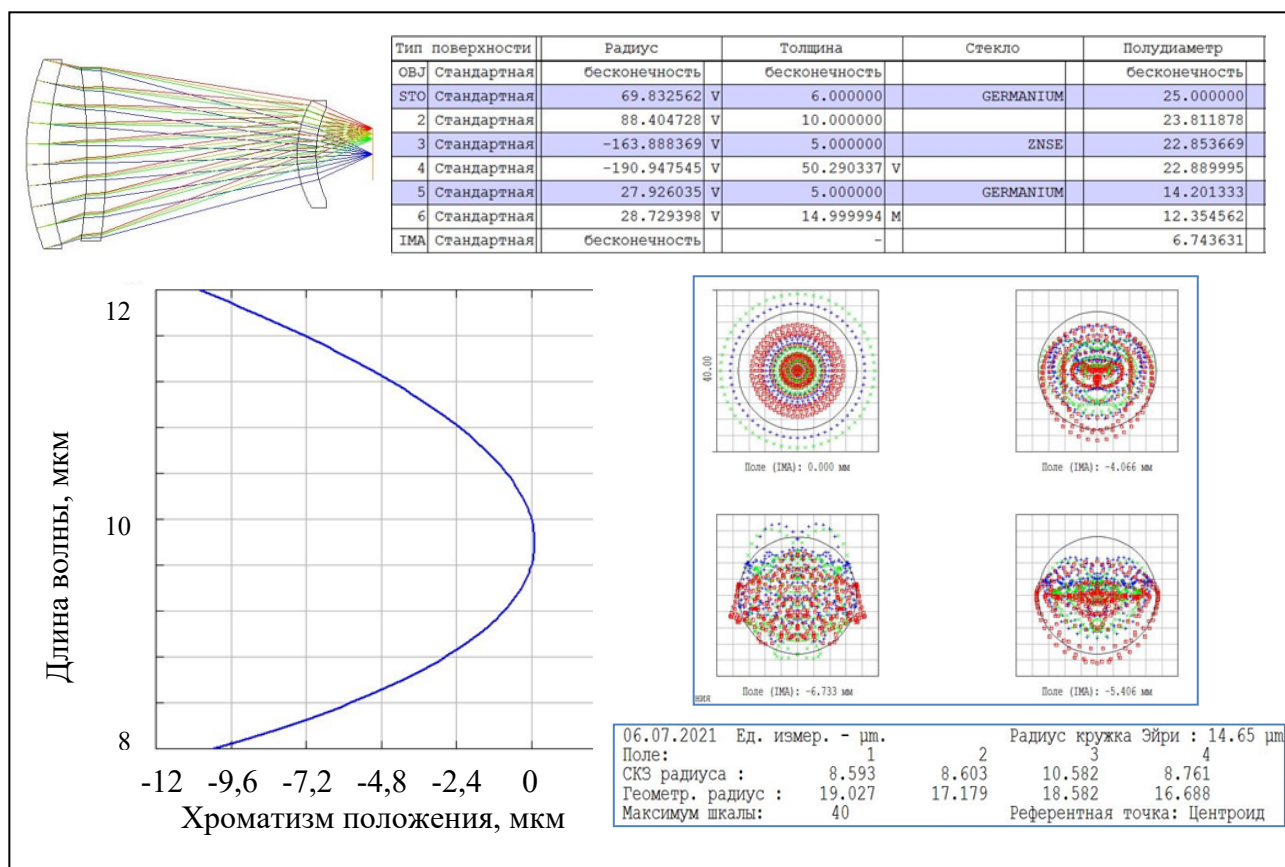


Рис. 56. Система после первого этапа оптимизации

Опер. #	Тип	Samp	Волна	Поле	Freq	Grid	Цель	Вес	Величина	Вклад, %
1: MTFT	MTFT	1	0	1	30.000000	0	1.000000	400.000000	0.512823	33.427115
2: MTFS	MTFS	1	0	2	30.000000	0	1.000000	100.000000	0.512340	8.373348
3: MTFT	MTFT	1	0	2	30.000000	0	1.000000	100.000000	0.478718	9.567795
4: MTFS	MTFS	1	0	3	30.000000	0	1.000000	100.000000	0.461372	10.215139
5: MTFT	MTFT	1	0	3	30.000000	0	1.000000	200.000000	0.474468	19.448854
6: MTFS	MTFS	1	0	4	30.000000	0	1.000000	100.000000	0.482278	9.437547
7: MTFT	MTFT	1	0	4	30.000000	0	1.000000	100.000000	0.479743	9.530202

Рис. 57. Фрагмент окна редактора целевой функции оптимизации

На заключительном этапе проводится балансировка aberrаций с учетом плоскости наилучшей установки. Для этого при оптимизации расстояние до плоскости изображения устанавливается в качестве переменной. В результате, следуя вышеописанной методике, специально для данного учебника получена система, конструктивные параметры которой приведены на рис. 58, а ее анализ – далее в подразделе 3.2.4.

Тип поверхности		Радиус		Толщина		Стекло	Полудиаметр	
ОВУ	Стандартная	бесконечность		бесконечность			бесконечность	
*	Стандартная	68.532503	V	6.000000		GERMANIUM	25.000000	
2*	Стандартная	86.406880	V	7.953538	V		23.789707	
3*	Стандартная	-178.369769	V	5.000000		ZNSE	23.198316	
4*	Стандартная	-208.661174	V	51.769579	V		23.197363	
5*	Стандартная	26.483477	V	5.000000		GERMANIUM	13.976136	
6*	Стандартная	26.554610	V	14.634456	V		12.045664	
IMA	Стандартная	бесконечность		-			6.738131	

Рис. 58. Конструктивные параметры системы
после второго этапа оптимизации

Необходимость перевода радиусов преломляющих поверхностей на пробные стекла определяется используемой технологией изготовления. Эти вопросы обсуждаются на практических занятиях по дисциплине.

Обобщая материал подраздела, еще раз отмечается, что время, требуемое для оптимизации конструктивных параметров оптической системы, удовлетворяющей требованиям технического задания, во многом зависит от правильно выбранного момента перехода от целевой функции оптимизации, построенной с использованием геометрических аберраций, к целевой функции оптимизации на основе интегральных показателей качества изображения. В [93, с. 117] такой подход возводится в ранг «золотого правила расчета оптики».

3.2.4. Анализ полученной системы

До сих пор иногда поднимается вопрос об оптимальном соотношении размера пятна рассеяния объектива и размера пикселя приемника. Обусловлено это тем, что не для всех применений тепловизионных объективов критерий качества связывают с конкретным значением пятна рассеяния в изображении точки объекта.

Рассмотрим этот вопрос применительно к инфракрасным объективам, которые в тепловизионных наблюдательных приборах сопрягаются с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений. Оптические схемы именно таких объективов приведены в подразделе 3.2.1. Для анализа оптической системы, конструктивные параметры которой приведены в подразделе 3.2.3 (см. рис. 58), на рис. 59 приведены графики ЧКХ, ФКЭ, числа Штреля.

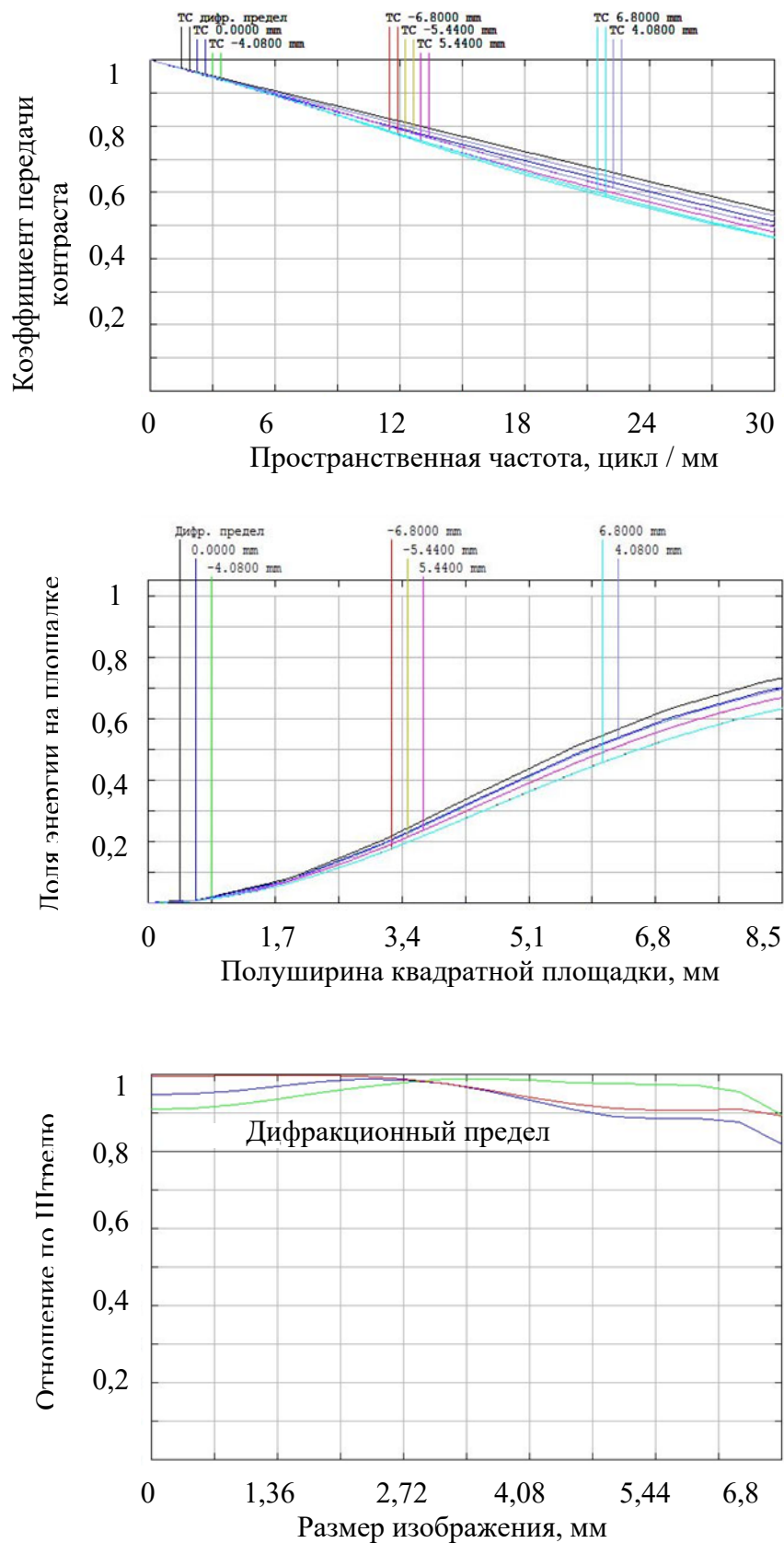


Рис. 59. Графики ЧКХ, ФКЭ, числа Штреля для объектива, конструктивные параметры которого приведены на рис. 58

ЧКХ представляет собой зависимость коэффициента передачи контраста от пространственной частоты синусоидальной испытательной миры. На графике ЧКХ объектива по оси абсцисс откладывается пространственная частота в линиях на миллиметр (циклах на миллиметр). Под «линией» понимается период (цикл) миры. По оси ординат указывается коэффициент передачи контраста, т. е. отношение контраста изображения к контрасту объекта. Для анализа тепловизионного объектива целесообразно ограничить значение пространственных частот частотой Найквиста. Значение частоты Найквиста ν_H обусловлено дискретизацией многоэлементного изображения и рассчитывается как $\nu_H = 1/2\delta$, где δ – шаг пикселей приемника. Так, для приемника с шагом пикселя 0,017 мм получается $29,4 \text{ мм}^{-1}$.

Из графика ЧКХ следует, что для анализируемого объектива коэффициент передачи контраста на частоте Найквиста для всех точек поля находится в диапазоне от 0,53 до 0,47. Существует два подхода к анализу полученных значений коэффициента передачи контраста: сравнение с коэффициентом передачи контраста «идеального», безабберационного объектива и сравнение с ЧКХ приемника. Для анализируемого объектива относительный коэффициент передачи контраста по сравнению с безабберационным объективом (называемый в [93] соотношением Гопкинса) находится в диапазоне от 0,98 до 0,87. В [41, с. 337] приведены критерии оценки качества объективов, основанные на практических разработках авторов монографии (табл. 9).

Таблица 9

Критерии качества по [42]

Значение коэффициента передачи контраста на частоте Найквиста	Оценка качества изображения объектива
равно или более 0,5	отличное
равно или более 0,4	хорошее
равно или более 0,2	удовлетворительное
равно или более 0,1	плохое
равно или более 0,0	неудовлетворительное

Качество анализируемого объектива на основании сравнения с критериями, приведенными в табл. 9, можно признать отличным и хорошим по всему полю зрения.

Иногда требуется пересчитать значение пространственной частоты в плоскости изображений объектива (в мм^{-1}) в значение пространственной частоты в пространстве предметов (в рад^{-1} или минутах^{-1}). Связь между указанными пространственными частотами определяется формулами

$$\nu_p = \nu' f'; \quad \nu_m = \nu_p / 3\,440, \quad (12)$$

где ν_p – пространственная частота в пространстве предметов объектива, рад^{-1} ; ν_m – пространственная частота в пространстве предметов объектива, минуты^{-1} ; ν' – пространственная частота в плоскости изображений объектива, мм^{-1} ; f' – фокусное расстояние объектива, мм.

Например, для объектива с фокусным расстоянием 60 мм пространственной частоте в плоскости изображений, равной 30 мм^{-1} , соответствует частота в пространстве предметов $1\,800 \text{ рад}^{-1}$, или $0,52 \text{ минут}^{-1}$.

Оценка качества изображения по ЧКХ широко используется при проектировании объективов тепловизионных приборов в силу удобства измерения этой характеристики при изготовлении объективов, с одной стороны, и свойства мультипликативности ЧКХ при анализе всего оптико-электронного тракта изделия – с другой.

Коэффициент передачи контраста может рассчитываться не только для миры с синусоидальным, но для миры с прямоугольным распределением яркости. При этом для анализируемого объектива для частоты 30 лин/мм получаются значения 0,68 и 0,59, что дает примерно на 25 % лучший результат. Это обстоятельство следует принимать во внимание в зависимости от способа определения коэффициента передачи контраста, применяемого при сборке и контроле объективов на производстве.

Функция концентрации энергии (ФКЭ) приводится в координатах: по оси абсцисс – размер (радиус круга или полуширина квадрата) площадки; по оси ординат – доля энергии в изображении предметной точки, которая концентрируется объективом на этой площадке. Так, в анализируемом объективе на квадратной площадке со стороной 0,017 мм, равной размеру

пикселя приемника, концентрируется 70 % энергии в изображении осевой точки, а для точки на краю поля (угол чувствительной площадки приемника) – 63 %; во всех остальных точках поля ФКЭ принимает промежуточные значения. Сравнение указанных значений проводится с безаберрационным объективом, для которого ФКЭ составляет 73 % для точки на оси. Остальная доля энергии приходится на соседние пиксели, что приводит к снижению контраста в изображении предметной точки и качественно объясняет снижение коэффициента передачи контраста по мере увеличения пространственной частоты на графиках ЧКХ.

В основе расчетов ФКЭ лежит вычисление компьютерной программой функции рассеяния точки (ФРТ). Как известно, распределение энергии в функции рассеяния точки определяется дифракцией волновых фронтов на выходном зрачке объектива, а количество энергии, собираемое оптической системой и направляемое в изображение точки, определяется входным зрачком объектива. Результаты расчетов ФРТ в программах по оптическому проектированию представляются пользователю различными способами. На рис. 60 приведено представление ФРТ в серой шкале, вписанное в квадрат, равный размеру пикселя приемника. На этом же рисунке приводится значение отношения по Штрелю: 0,963 для точки на оси и 0,803 для точки на краю поля.

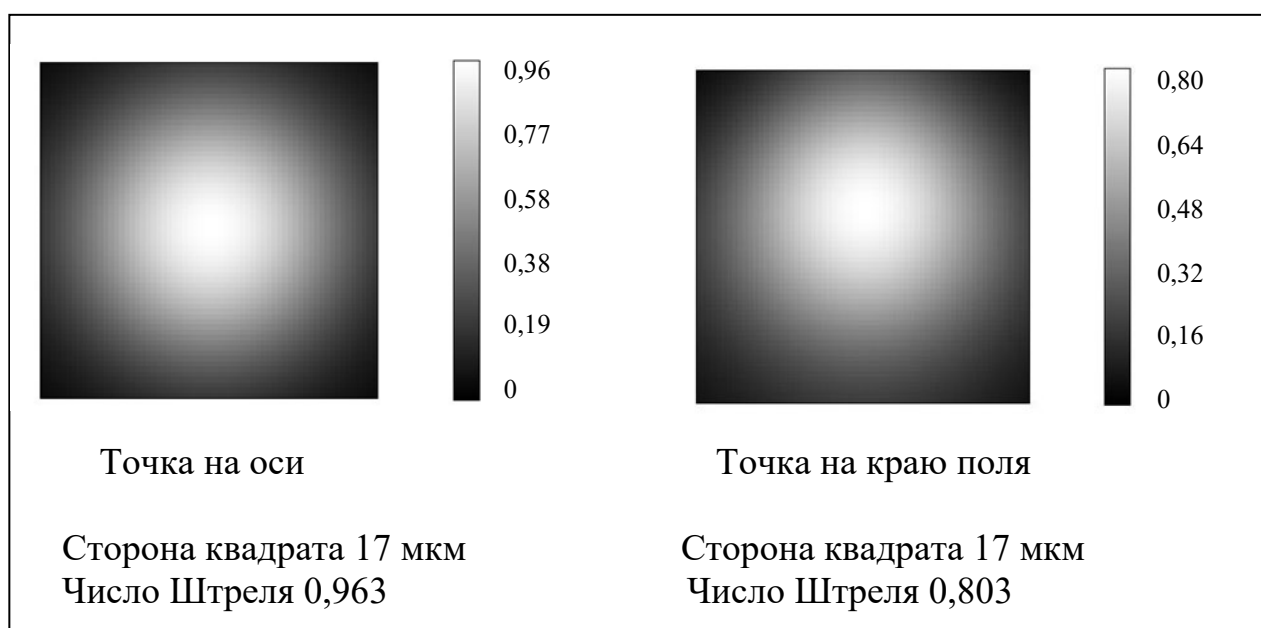


Рис. 60. Визуальное представление ФРТ

Отношение по Штрелю представляет отношение максимума освещенности в изображении точки, формируемом оптической системой, к максимуму освещенности в центре кружка Эйри, формируемом безаберрационным объективом. Программа позволяет провести анализ по распределению отношения по Штрелю по полю изображения для различных длин волн (см. рис. 59). Отношение по Штрелю используется при разработке дифракционно ограниченных оптических систем, к которым и относятся объективы тепловизоров. Несмотря на то, что отношение по Штрелю описывает всего лишь одну точку в ФРТ, оно используется не только как характеристика для анализа, но и как инструмент при создании оптимизационных функций при разработке дифракционно ограниченных оптических систем объективов.

Обращается внимание, что отношение по Штрелю в анализируемом объективе для осевой точки превышает известный критерий 0,8.

Значение отношения по Штрелю (число Штреля), равное 0,8, соответствует критерию Релея $\lambda/4$ для сферической аберрации и критерию Марешаля $\lambda/14$ для среднеквадратического значения волновой аберрации в изображении любой точки поля. Критерий по Штрелю был предложен в 1895 г. Он получил свое развитие в современных исследованиях, в частности, в [93], исходя из критерия Штреля, определены допустимые значения аберраций (комы, астигматизма и др.). Там же для пространственных частот, превышающих 0,1 от предельной пространственной частоты, для отношения Гопкинса, превышающего 0,8, приведены допустимые значения аберраций. По мнению [93, с. 154] при оптимизации систем с пространственными частотами, превышающими 0,1 от предельной частоты, использование отношения Штреля «более естественно».

Для анализируемого объектива предельная частота для основной длины волны 10 мкм составляет 100 мм^{-1} .

На первом этапе оптимизации оптической системы между размерами геометрических пятен рассеяния и ЧКХ существует очевидная закономерность: чем меньше пятно, тем выше ЧКХ. Но по мере приближения к дифракционному качеству изображения, при оптимизации на втором этапе, пропорциональность может нарушаться: возрастает коэффициент переда-

чи контраста на частоте Найквиста, а при этом геометрический размер абберационного пятна рассеяния увеличивается. Или: наибольшее значение ФКЭ в пятне, равном размеру пикселя, возрастает, а при этом и размер пятна увеличивается, и коэффициент передачи контраста уменьшается. Причина кроется в сложной структуре распределения энергии внутри пятна, формируемого оптической системой в изображении точки объекта, обусловленной искажением дифрагированного на выходном зрачке объектива волнового фронта абберациями оптической системы, а также возможным виньетированием пучков лучей.

Подтверждение вышеописанному явлению находится и в монографии [93, с. 158]: «Отношение контраста на определенной пространственной частоте с абберациями и без называется соотношением Гопкинса на этой пространственной частоте. Балансировка абберации, полученная для увеличения отношения Гопкинса, отличается от балансировки для увеличения числа Штреля».

На практических занятиях по разработке тепловизионного объектива обсуждаются способы расчета ЧКХ, ФКЭ, ФРТ, отношения Штреля, среднеквадратических волновых аббераций, геометрических аббераций с помощью компьютерных методов: задание условий (установок) для расчетов, точности расчетов различными способами, способы представления результатов расчетов и другие особенности компьютерных методов.

Перечисленные способы и критерии анализа направлены на то, чтобы сравнить оптическую систему разрабатываемого объектива на различных этапах оптического проектирования с безабберационным объективом и добиться, чтобы система была максимально приближена к безабберационному объективу.

При высокой степени приближения к дифракционной системе (к безабберационному объективу) увеличить ФКЭ в пятне, равном размеру чувствительной площадке элемента приемника, или повысить коэффициент передачи контраста на частоте Найквиста можно, увеличивая задний апертурный угол в объективе, т. е. снижая влияние дифракции на выходном зрачке, и минимизируя (выполняя балансировку) аббераций в изображении. Вопрос об относительном отверстии объектива решается на

концептуальном уровне проектирования, уточняется в ходе оптического проектирования, при этом во внимание принимаются энергетические, массогабаритные, экономические и другие соображения с целью достижения максимальной дальности решения зрительных задач при эксплуатации тепловизионного прибора.

3.3. Термоанализ оптической системы объектива тепловизионного прибора

Термооптический анализ оптической системы объектива осуществляется с целью определения оптических характеристик объектива и положения плоскости изображения при различных температурах эксплуатации и выявления наиболее рациональных подвижек линз, блоков линз объектива (приемника излучений) для компенсации терморасфокусировки, если она возникает при изменении температуры. Термооптический анализ проводится обычно при допущении, что все линзы, оправы имеют одинаковую температуру, т. е. градиенты температур в объективе отсутствуют. Если в объективе тепловизионного прибора предусмотрен механизм фокусировки на объекты, находящиеся на конечных расстояниях от объектива, то при выборе термокомпенсационных подвижек стараются использовать те же подвижки (внутренняя или внешняя фокусировка), которыми осуществляется фокусировка на близкие дистанции (активная термокомпенсация).

Прежде чем проводить термооптические расчеты оптических систем, состоящих из нескольких оптических элементов, представляется полезным провести анализ термооптических аберраций отдельной линзы. Подобное упражнение можно организовать на практических занятиях по дисциплине как учебную научно-исследовательскую работу по изучению законов геометрической оптики (см. подраздел 3.2.2).

Итак, теоретические вопросы расчета термооптических аберраций оптических систем изложены в классических монографиях и учебниках [68, 89]. Особенности расчета термооптических аберраций инфракрасных объективов тепловизионных приборов посвящен ряд работ, среди которых [94–96].

В табл. 10 приведена информация по термооптическим свойствам материалов, используемых для изготовления объективов тепловизионных приборов, на основе данных, систематизированных в [94].

Таблица 10

Термооптические свойства некоторых материалов

Материал	n_{10}	dn/dT , 10^{-6} градус $^{-1}$	α , 10^{-6} градус $^{-1}$	ν	V , 10^{-6} градус $^{-1}$
IRG22	2,496 7	67,2	12,1	110,87	32,8
IRG23	2,786 9	103,0	13,4	167,00	44,2
IRG24	2,609 0	19,9	20,4	174,89	–8,0
IRG25	2,603 2	59,2	14,0	109,06	22,9
IRG26	2,778 2	32,2	20,8	160,20	–2,7
Ge	4,003 1	408,0	5,7	834,19	130,2
GaAs	3,277 0	149,0	5,7	107,41	59,7
ZnSe	2,406 0	61,0	7,6	57,86	35,8
ZnS	2,200 0	41,0	6,8	22,22	27,4

В таблице использованы следующие обозначения: n_{10} – показатель преломления для длины волны, равной 10 мкм; dn/dT – температурное приращение показателя преломления; α – коэффициент линейного расширения материала; ν – коэффициент средней дисперсии материала в спектральном диапазоне от 7 до 12 мкм; V – термооптическая постоянная материала.

В соответствии с методикой, изложенной в [68, 88] для тонкой одиночной линзы, изменение $\Delta f'$ фокусного расстояния и, соответственно, смещение задней фокальной плоскости при изменении температуры на ΔT для случая бесконечно удаленного предмета определяется по формуле

$$\Delta f' = -f' V \Delta T, \quad (13)$$

где f' – фокусное расстояние линзы.

Значение термооптической постоянной материала линзы вычисляется по формуле

$$V = \frac{dn/dT}{n-1} - \alpha. \quad (14)$$

В табл. 11, в качестве примера, приведены результаты расчета термооптической aberrации положения (смещения задней фокальной плоскости и изменения фокусного расстояния) тонких одиночных линз с фокусными расстояниями 100 и 250 мм, выполненных из германия и халькогенидного стекла IRG24 [97] для температуры минус 40 °С.

Таблица 11

Термооптическая aberrация положения одиночной линзы. $T = -40\text{ °С}$

f' , мм	Материал	$\Delta f'$, мм		Направление смещения плоскости изображений	$\Delta f'/f'$, %
		формула (1)	Zemax		
100	Ge	0,781	0,821	от линзы	0,82
	IRG24	–0,048	–0,050	к линзе	–0,05
250	Ge	1,952	2,052	от линзы	0,82
	IRG24	–0,121	–0,125	к линзе	–0,05

Расчеты выполнены по формуле (13) и в компьютерной программе Zemax.

Как следует из формулы (13), направление смещения плоскости изображения, построенного одиночной положительной линзой, определяется знаком произведения $V\Delta T$. При понижении температуры плоскость изображения, построенная одиночной положительной линзой из германия, сдвигается по направлению от линзы, при повышении температуры – в направлении к линзе. Аналогичный характер направления смещения плоскости изображения имеет место для одиночных линз, изготовленных из материалов, у которых $V\Delta T$ имеет положительные значения. Для материалов, приведенных в табл. 10, только у двух марок халькогенидных стекол IRG24 и IRG26 значения V отрицательные. Для линз, изготовленных

из указанных марок, при понижении температуры плоскость изображения сдвигается по направлению к линзе, при повышении температуры – в направлении от линзы.

Принимая во внимание формулу (13), относительная погрешность фокусного расстояния $\Delta f'/f'$ одиночной линзы при изменении температуры определится как

$$\frac{\Delta f'}{f'} = -V \Delta T. \quad (15)$$

Для компенсации температурного смещения плоскости изображения (термооптической аберрации положения) необходимо, чтобы смещение плоскости чувствительной площадки приемника происходило в том же направлении и на такое же значение, что и смещение плоскости изображения:

$$-f' V \Delta T = f' \alpha_K \Delta T, \quad \text{или} \quad \frac{dn/dT}{n-1} - \alpha + \alpha_K = 0, \quad (16)$$

где α_K – коэффициент линейного расширения материала корпуса.

В случае одиночной линзы и приемника, закрепленных в корпусе, условие устранения терморасфокусировки принимает простой вид:

$$\alpha_K = -V. \quad (17)$$

Если линза выполнена из германия, то для корпуса требуется материал, имеющий большой отрицательный коэффициент линейного расширения, а именно: $\alpha_K = -130 \cdot 10^{-6}$ 1/градус. Для линзы из IRG24 требуется значение $\alpha_K = 8 \cdot 10^{-6}$ 1/градус. Поэтому для линзы из германия невозможно осуществить пассивную атермализацию из-за отсутствия материала для корпуса с требуемыми характеристиками, а для линз из IRG24 и IRG26 возможность для пассивной атермализации имеется.

При проведении учебной научно-исследовательской работы магистрантам могут быть заданы варианты линз из различных инфракрасных материалов, обсуждаются способы задания температур эксплуатации при

проведении компьютерных расчетов, анализируются изменения конструктивных параметров, смещение плоскости изображения, изменение фокусных расстояний, изменение аберраций и другие вопросы, на основе которых совместными усилиями преподавателя и магистрантов формулируются общие закономерности, обобщающие результаты расчетов по всем вариантам.

Оптические схемы современных объективов тепловизионных приборов с фиксированным фокусным расстоянием содержат две, а чаще – три, четыре и более линз. Проведение термооптического анализа оптической системы компьютерными методами осуществляется с использованием инструмента мультиконфигурационного моделирования. Предварительно необходимо в редакторе оптической системы указать температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) материала корпуса (промежуточных колец) в строках редактора, соответствующих воздушным промежуткам, включая задний отрезок от последней линзы объектива до плоскости изображений. Желательно также указать фиксированные значения полудиаметров поверхностей, соответствующие световым диаметрам.

Затем в редакторе мультиконфигураций выбрать операцию (инструмент) по созданию конфигураций для термооптического анализа, указать диапазон температур (минимальную и максимальную температуру для термооптического анализа) и количество конфигураций для анализа. Программа дополнительно к исходной конфигурации (обычно при температуре 20 °С) сформирует указанное количество конфигураций, для каждой из которых будут рассчитаны радиусы преломляющих поверхностей, толщины линз, воздушных промежутков, диаметров линз, показатели преломления материалов, соответствующие заданным температурам. Переключаясь из одной конфигурации в другую, магистрант может проводить анализ оптической системы при различных температурах.

На рис. 61 показан фрагмент редактора мультиконфигураций, сформированный для оптической системы, разработанной в качестве примера в подразделе 3.2.3 (см. рис. 58). Для его формирования были заданы: минимальная температура минус 40 °С, максимальная температура 50 °С, ТКЛР корпуса $22 \cdot 10^{-6}$ 1/градус, количество конфигураций 3.

Активн.: 2/4		Конфиг. 1	Конфиг. 2*	Конфиг. 3	Конфиг. 4
1: TEMP	0	20.000000	-40.000000	5.000000	50.000000
2: PRES	0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
3: CRVT	1	0.014592	0.014597	T 0.014593	T 0.014589
4: CRVT	2	0.011573	0.011577	T 0.011574	T 0.011571
5: CRVT	3	-5.606E-003	-5.609E-003	T -5.607E-003	T -5.605E-003
6: CRVT	4	-4.792E-003	-4.795E-003	T -4.793E-003	T -4.791E-003
7: CRVT	5	0.037759	0.037772	T 0.037763	T 0.037753
8: CRVT	6	0.037658	0.037671	T 0.037661	T 0.037652
9: THIC	1	6.000000	5.997948	T 5.999487	T 6.001026
10: TH*	2	7.953538	7.938277	T 7.949722	T 7.961172
11: TH*	3	5.000000	4.997870	T 4.999467	T 5.001065
12: TH*	4	51.769579	51.707012	T 51.753938	T 51.800857
13: TH*	5	5.000000	4.998290	T 4.999573	T 5.000855
14: TH*	6	14.634456	14.611938	T 14.628826	T 14.645718
15: GL*	1	GERMANIUM	GERMANIUM	P GERMANIUM	P GERMANIUM
16: GL*	3	ZNSE	ZNSE	P ZNSE	P ZNSE
17: GL*	5	GERMANIUM	GERMANIUM	P GERMANIUM	P GERMANIUM
18: SD*	1	25.000000	24.991450	T 24.997863	T 25.004275
19: SD*	2	23.800000	23.791860	T 23.797965	T 23.804070
20: SD*	3	23.200000	23.190117	T 23.197529	T 23.204942
21: SD*	4	23.200000	23.190117	T 23.197529	T 23.204942
22: SD*	5	14.000000	13.995212	T 13.998803	T 14.002394
23: SD*	6	12.100000	12.095862	T 12.098965	T 12.102069

Рис. 61. Фрагмент редактора мультikonфигураций
для термооптического анализа

Анализ качества изображения в каждой из автоматически сформированных конфигураций 2, 3 и 4 показывает наличие терморасфокусировки и снижение качества изображения, например, снижение коэффициентов передачи контраста в рабочем диапазоне пространственных частот. Для устранения терморасфокусировки необходимо ввести какой-либо компенсатор. Для примера на рис. 62 показан простейший способ устранения терморасфокусировки – смещение плоскости приемника (или всего объектива относительно приемника) вдоль оптической оси. Значение смещения 0,42 мм для конфигурации 2 (минус 40 °С) определено итерационно по критерию максимального повышения коэффициентов передачи контраста. На рис. 62 показаны фрагмент оптической схемы, смещение плоскости

изображения и график ЧКХ после введения термокомпенсационной подвижки.

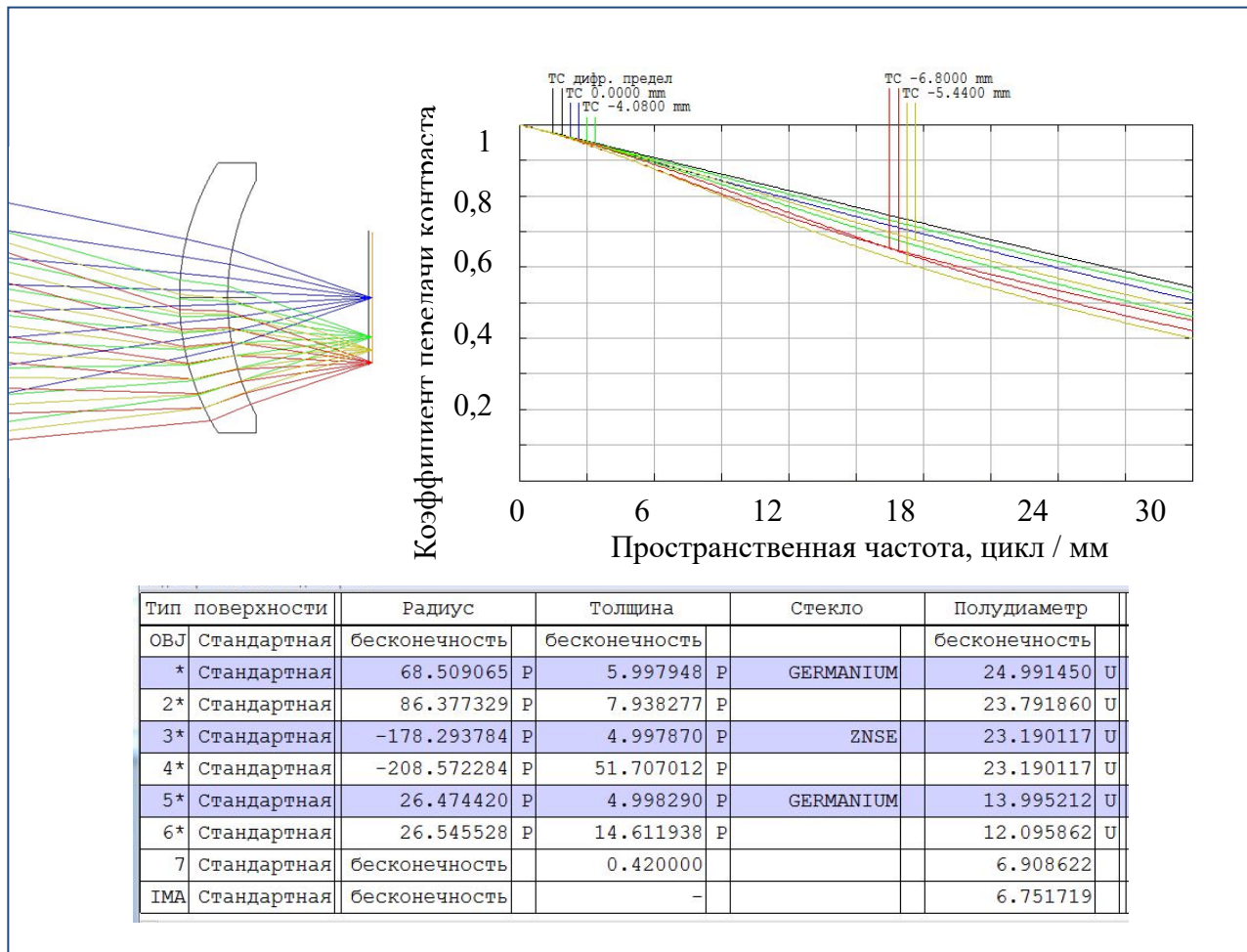


Рис. 62. Определение термокомпенсационной подвижки объектива

На практических занятиях по дисциплине с магистрантами обсуждаются и определяются термокомпенсационные подвижки другими линзами объектива (внутренняя термокомпенсация).

Более сложной задачей является проектирование объективов, не имеющих фокусирующей подвижки, но в которых не должны возникать терморасфокусировка и (или) изменение фокусного расстояния при изменении температуры эксплуатации прибора (атермализованные объективы, или объективы с пассивной атермализацией). Оптическое проектирование таких систем согласно принятой классификации (см. подраздел 1.2) отно-

сится не к типовым, а специальным расчетам. И хотя в рамках данного учебника специальные расчеты не рассматриваются, расчет атермализованного объектива вполне под силу тем магистрантам, кто проводит разработки и исследования в области проектирования оптических систем под руководством научного руководителя. Основная специфика заключается в том, что в редакторе оптимизационной функции создаются совокупности операторов для каждой из конфигураций и оптимизация проводится одновременно для всех конфигураций. В [98] дается подробное описание последовательности проведения расчетов атермализованного четырехлинзового объектива тепловизионного прибора с фокусным расстоянием 50 мм, относительным отверстием 1 : 1, приводятся конструктивные параметры объектива и использованные материалы.

Поиск теоретических решений и практических разработок по созданию ИК объективов с пассивной атермализацией продолжается.

3.4. Проектирование оптических систем объективов, сопрягаемых с охлаждаемыми приемниками инфракрасного излучения в тепловизионных приборах

Передовая оптическая техника базируется на достижениях фундаментальных исследований многих научных направлений и объединяет сложные в техническом и технологическом планах группы приборов, включая тепловизионные [17]. Использование электромагнитного излучения оптического диапазона позволяет обеспечить высокую информативность изображений, высокую точность определения координат, компактность многих оптико-электронных приборов и систем, спектральную и пространственную селекцию объектов. В последние десятилетия отмечаются высокие темпы развития тепловизионных приборов и появление большого количества новых моделей [4]. Технические характеристики тепловизионных приборов, в которых в качестве приемника излучений применяются неохлаждаемые болометрические матрицы, достигли значений, близких к предельным возможностям современной элементной базы [99]. Прогнозные исследования [100, 101] свидетельствуют, что в ближайшие годы будет усиливаться тенденция появления новых тепловизионных приборов,

в которых используются охлаждаемые матричные приемники излучений. Поэтому актуальным является уже на этапе концептуального проектирования закладывать в новые разработки достижения современных оптических технологий и компьютерного дизайна оптики.

Предметом данного подраздела являются тепловизионные объективы, удовлетворяющие специфическим требованиям, обусловленным необходимостью сопряжения с охлаждаемыми матричными приемниками излучения.

В научно-технической и патентной литературе, например [102–115], имеется информация о большом количестве разработанных и созданных инфракрасных объективов для тепловизионных приборов, использующих матричные приемники излучений. В них рассматриваются вопросы коррекции аберраций [103], обсуждается алгоритм проектирования многокомпонентных оптических систем [114], технология компьютерного расчета атермализованных оптических систем [98]. Однако, как показывает анализ упомянутых источников с позиций исследования оптических схем, в большинстве из них описание последних носит констатирующий характер, либо, как это принято в патентных источниках, приводится сравнение разработанной (предлагаемой) оптической схемы объектива с одним или несколькими наиболее близкими аналогами, выбранными авторами для сравнения. Вопрос о том, насколько параметры конкретной разработки объектива являются «оптимальными», можно обсуждать, имея возможность сравнения их с областью решений некоей идеальной (безабберационной) модели. Такой моделью может служить параксиальная модель инфракрасного объектива, сопрягаемого с охлаждаемым матричным приемником излучений.

Для ее создания предлагаются структурная схема и классификация объективов, сопрягаемых с охлаждаемыми матричными приемниками излучений в тепловизионных приборах [114–116]. На основании выборки из нескольких десятков объективов тепловизионных приборов для MWIR или LWIR диапазонов электромагнитного излучения в [117] предложена классификация, отражающая особенность согласования объективов и охлаждаемых приемников излучений. Эта особенность обусловлена принципом сопряжения оптических элементов в сложной оптической или

оптико-электронной системе, требующим согласования входного и выходного зрачков последовательно расположенных элементов. Роль апертурной диафрагмы выполняет отверстие внутри корпуса приемника, диаметр и положение которого относительно чувствительной площадки приемника определяет относительное отверстие приемника. Внутреннее пространство корпуса вместе с приемником, защитным стеклом и диафрагмой в процессе эксплуатации охлаждается до рабочих температур приемника. С целью соблюдения указанного принципа сопряжения либо сама охлаждаемая диафрагма выполняет функцию выходного зрачка объектива, либо оптическая схема объектива должна обеспечивать формирование выходного зрачка объектива в зоне размещения охлаждаемой диафрагмы приемника. В любом случае специфический признак объективов в выборке – это наличие вынесенного выходного зрачка. Несимметричность оптической системы объектива относительно апертурной диафрагмы прибора является фактором, усложняющим коррекцию полевых aberrаций в изображении.

В результате структурного анализа объективов с фиксированными фокусными расстояниями [117] по классификационному признаку, основанному на положении входного зрачка объектива, выделены четыре типа оптических схем объективов (табл. 12). В табл. 12 используются следующие обозначения: P – центр входного зрачка; a_P – расстояние вдоль оптической оси от первого компонента объектива до входного зрачка; А.д. – охлаждаемая диафрагма приемника; p' – расстояние от охлаждаемой диафрагмы до задней фокальной плоскости объектива (плоскости чувствительной площадки приемника; f' – фокусное расстояние объектива; L – длина объектива; D , D_1 , D_2 – диаметры входного зрачка, компонентов 1, 2 соответственно.

Выделенные типы характеризуются следующими соотношениями:

- тип «а»: $a_P > L$; $D_1 > D$;
- тип «б»: $0 < a_P < L$; $D_2 > D_1 > D$;
- тип «в»: $a_P = 0$; $D_1 = D$;
- тип «г»: $a_P < 0$; $D_1 > D$.

Классификация объективов с вынесенным выходным зрачком

Тип	Классификационный признак	Структурная схема объектива
а	$a_P > L$	
б	$0 < a_P < L$	
в	$a_P = 0$	Плоскость промежуточного изображения
г	$a_P < 0$	Плоскость промежуточного изображения

Структурная схема типа «а» находит применение в изделиях, в которых требуется небольшая относительная длина объектива [102].

По структурной схеме типа «б» проектируются короткофокусные широкоугольные объективы [104].

В изделиях, в которых диаметр объектива ограничивается диаметром входного зрачка, структура объектива соответствует типу «в» [103, 105, 107]. По этому же типу может моделироваться оптическая система в режиме узкого поля в изделиях с дискретной сменой увеличений [108–110].

Структурная схема типа «г» применяется в многокомпонентных системах со сканирующими элементами [106].

Далее рассматриваются основные соотношения в двухкомпонентной модели объектива типа «в», сопрягаемого с охлаждаемым матричным приемником излучений. Используя законы геометрической оптики, в структурной схеме типа «в» определены аналитические соотношения между ее параметрами. Рис. 63 поясняет обозначения основных параметров, используемых в аналитических соотношениях, а именно: L_2 – расстояние вдоль оптической оси от плоскости промежуточного изображения до чувствительной площадки приемника; L_P – расстояние между плоскостями входного и выходного зрачков объектива; $a'_{F'}$ – задний фокальный отрезок объектива – расстояние от компонента 2 до чувствительной площадки приемника; f'_1 – фокусное расстояние компонента 1; $2y'_1$ – размер (по диагонали) промежуточного изображения; $2y'_2$ – диагональ чувствительной площадки приемника; D' – диаметр выходного зрачка объектива.

Применяя положения и закономерности геометрической оптики к оптической системе объектива, состоящей из тонких компонентов, расположенных относительно друг друга и относительно приемника в соответствии со схемой, представленной на рис. 63, можно записать ряд соотношений между отдельными параметрами, а именно:

$$f' = \beta_2 f'_1 ; \beta_2 = -y'_2 / y'_1 ; \beta_P = -D' / D ; L_2 = -f'_2 (\beta_2 - 1)^2 / \beta_2 ;$$

$$L_P = -f'_2 (\beta_P - 1)^2 / \beta_P ; a'_{F'} = L_2 \beta_2 / (\beta_2 - 1),$$

где f'_2 – фокусное расстояние компонента 2; β_2 – линейное увеличение компонента 2; β_P – линейное увеличение в зрачках.

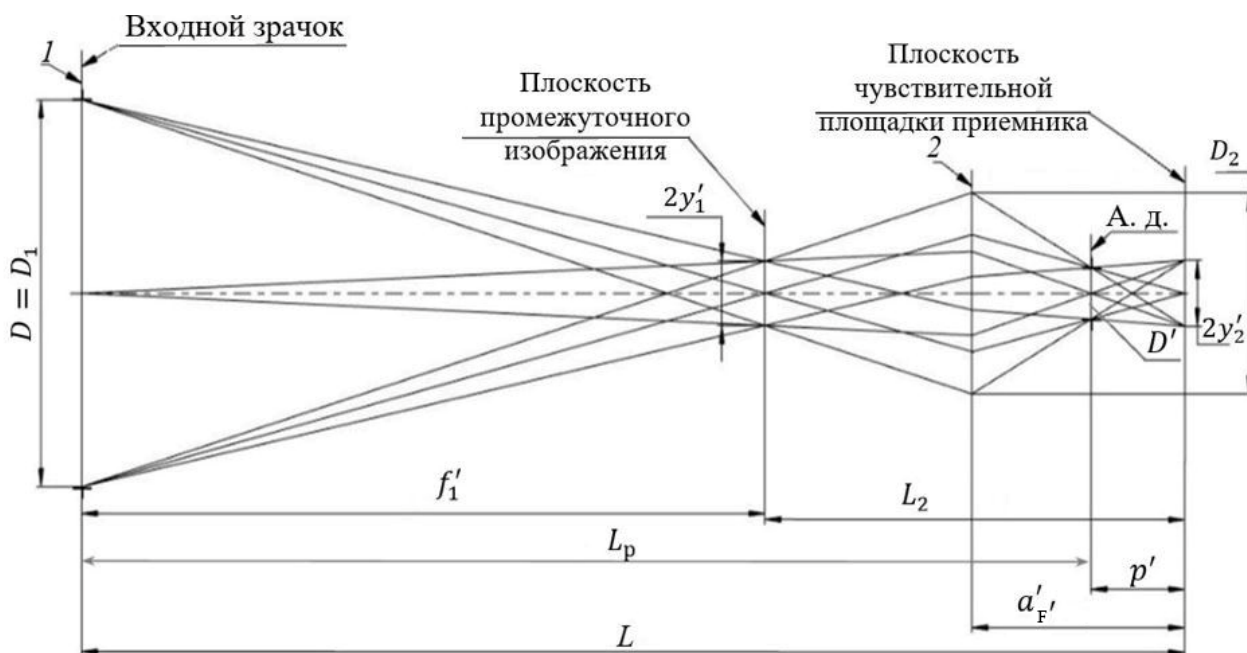


Рис. 63. Двухкомпонентная схема объектива типа «в»

Условие $L_p = L_2 + f'_1 - p'$, специфическое для анализируемой схемы, представленной на рис. 63, определяет фокусное расстояние f'_2 через линейные увеличения β_2 , β_p , фокусное расстояние компонента 1 и параметр p' приемника:

$$f'_2 = \beta_2 \beta_p (f'_1 - p') / (\beta_p (\beta_2 - 1)^2 - \beta_2 (\beta_p - 1)^2). \quad (18)$$

При этом увеличения β_2 и β_p в анализируемой схеме связаны между собой следующей зависимостью: $\beta_2 \beta_p = p' / f'_1$.

Из условия $L = f'_1 + L_2$ устанавливается связь между длиной объектива, линейным увеличением β_2 , фокусными расстояниями объектива и компонента 2:

$$L = (f'_1 - f'_2 (\beta_2 - 1)^2) / \beta_2. \quad (19)$$

Для относительных отверстий объектива $1:K$ и его компонентов $1:K_1$ и $1:K_2$ соответствующие диафрагменные числа определяются сле-

дующим образом: $K = p' / D'$; $K_1 = f'_1 / D'$; $K_2 = f'_2 / D_2$. При этом диаметр компонента 2, определяемый ходом крайних лучей наклонного пучка, может быть рассчитан как $D_2 = 2(a'_F(0,5D' + |y'_2|) / p' - |y'_2|)$.

Исследование математической модели, проведенное для следующих значений параметров: фокусные расстояния объектива от 50 до 300 мм; два значения относительного отверстия: 1 : 2 и 1 : 4; линейное увеличение компонента 2 от минус 0,25 до минус 3^{*}; формат приемника 640 × 512, размер пикселей 15 × 15 мкм; p' составляет 20 мм, выявило следующие закономерности в рассматриваемой схеме объектива [116]:

- относительная длина объектива не зависит от относительного отверстия приемника, уменьшается с увеличением $|\beta_2|$ и возрастает по мере уменьшения фокусного расстояния объектива;
- относительные отверстия 1: K_1 компонента 1 не зависят от фокусного расстояния объектива, возрастают с увеличением $|\beta_2|$;
- относительные отверстия 1: K_2 компонента 2 возрастают при повышении относительного отверстия объектива 1: K ;
- отношение a'_F / p' не зависит от относительного отверстия объектива, уменьшается при возрастании $|\beta_2|$ и увеличивается при уменьшении f' .

С целью определения оптимальной области решений для технической реализации объективов по типу «в» предлагаются следующие ограничения:

- по габаритным соображениям: $D_2 / D_1 \leq 1$ – позволяет найти такие решения, при которых диаметры компонентов не будут превышать диаметра входного зрачка, что связано с возможностями реализации объективов с ограничением по массе и габаритным размерам;
- по ограничениям, связанным с сопряжением объектива с охлаждаемым приемником излучений: $a'_F \geq 1,5p'$ – позволяет выявить такие решения, которые обеспечивают расстояние между компонентом 2 и плоскостью охлаждаемой диафрагмы не менее 10 мм, что определяет возможность конструктивного сопряжения объектива с приемником;

– по абберационным соображениям: $K_2 \geq 0,5$ – направлено на выявление решений, в которых относительное отверстие компонента 2 не превышает теоретически предельного значение для апланатических систем.

Рис. 64 демонстрирует уменьшение области решений по $|\beta_2|$ при уменьшении абсолютного значения фокусного расстояния объектива и отсутствие решений для короткофокусной части исследуемого диапазона фокусных расстояний. На этом же рисунке показан и диапазон возможных осевых габаритных размеров для соответствующих фокусных расстояний.

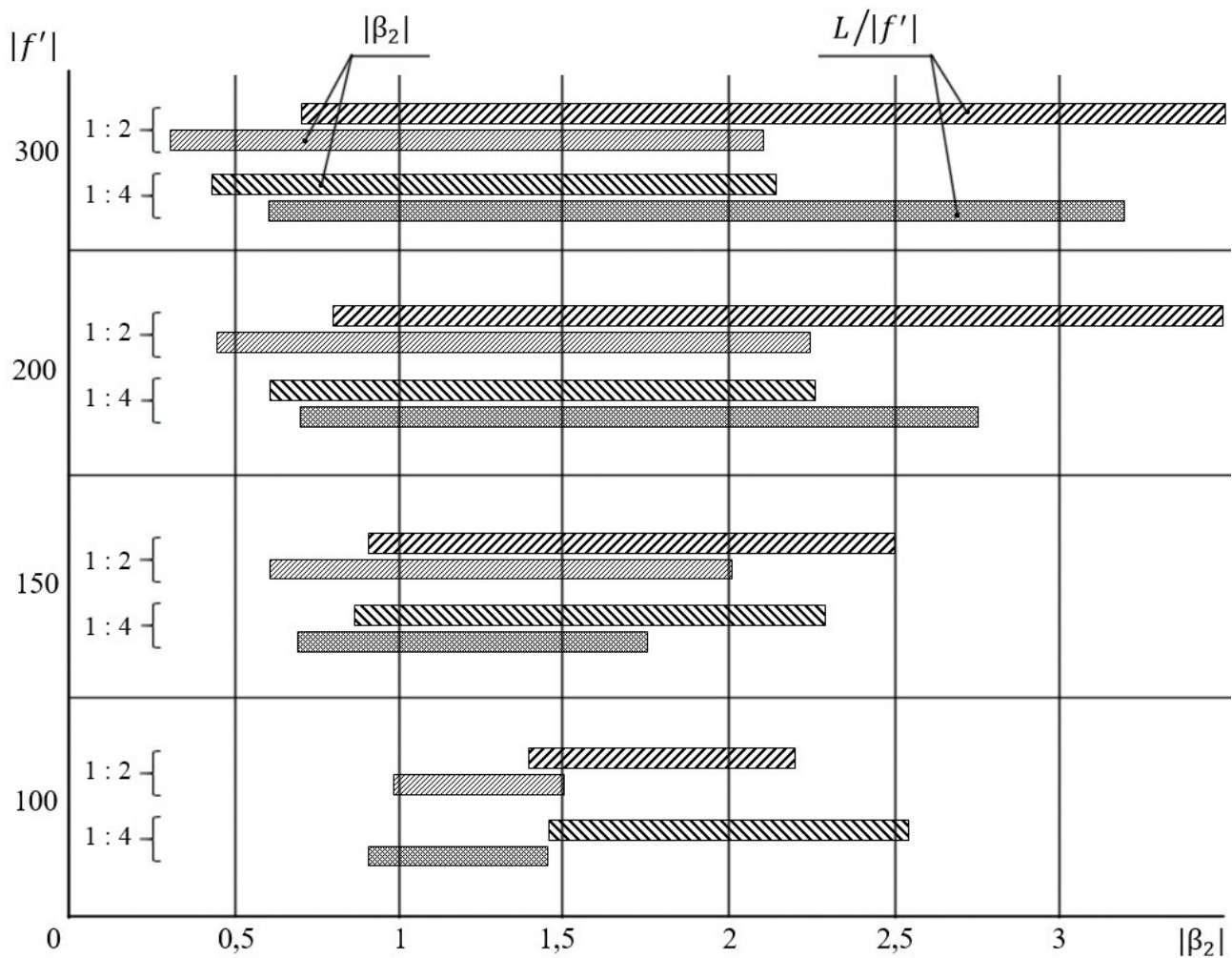


Рис. 64. Диапазоны решений $|\beta_2|$ и $L / |f'|$ для различных фокусных расстояний объектива, построенного в соответствии с рис. 63

Таким образом, для исследованной аналитической модели двухкомпонентной схемы инфракрасного объектива, сопрягаемого с охлаждаемым приемником, имеющего входной зрачок, совмещенный с первым компонентом, при введенных ограничениях и выбранных диапазонах параметров установлено следующее:

- область решений $|\beta_2|$ соответствует значениям от 0,3 до 2,4;
- наибольший диапазон решений по $|\beta_2|$ выявлен для длиннофокусных объективов. По мере уменьшения $|f'|$ диапазон решений по $|\beta_2|$ уменьшается до нуля: при относительном отверстии 1 : 2 отсутствуют решения для абсолютных значений фокусных расстояний менее 80 мм, для относительного отверстия 1 : 4 – менее 75 мм;
- относительная длина объектива возрастает с уменьшением абсолютного значения фокусного расстояния объектива.

Расчет оптических систем с абсолютными значениями фокусных расстояний менее 80 мм требует либо снятия указанных ограничений, либо введения коллективной линзы в плоскость промежуточного изображения, либо использования другой структурной схемы.

Как следует из табл. 12, для случая ограничения диаметра объектива до диаметра входного зрачка в объективах, сопрягаемых с охлаждаемыми матричными приемниками излучений, требуется не менее двух компонентов. Аналогичный вывод по количеству компонентов сделан и для объективов тепловизионных приборов, в которых применяются неохлаждаемые микроболометрические матричные приемники [69]. Количество линз в компоненте определяется, прежде всего, его относительным отверстием и может достигать от одной до пяти и более линз, например [106, 107]. В случае, если компонентом схемы будет являться одиночная линза, то количество линз в объективе будет минимальным – две. Стремление к уменьшению количества линз в объективе обусловлено задачей повышения коэффициента пропускания оптических систем и соответственно повышения физической светосилы объективов в проектируемых тепловизионных приборах.

Задача о форме преломляющих поверхностей линзы в общем виде решена для случая устранения сферической аберрации [1] и астигматизма [2]. При инженерных разработках оптических систем объективов для тепловизионных приборов требуется одновременная балансировка не только двух указанных, но и остальных пяти первичных аберраций. При этом значения остаточных аберраций должны быть соразмерны размеру пикселя приемника и балансироваться в соответствии с принятым критерием по частотно-контрастной характеристике объектива или функции концентрации энергии в пятне, равном размеру пикселя приемника.

Современные оптические технологии формообразования позволяют изготавливать линзы биасферического дизайна, т. е. с двумя асферическими преломляющими поверхностями. Примером успешной технологической реализации могут служить двухлинзовые объективы для неохлаждаемых тепловизионных приборов [112, 113].

Однако условия работы компонентов в объективах, сопрягаемых с охлаждаемым приемником изображений, отличаются от объективов для болометрических матричных приемников. Оптическая система является несимметричной относительно апертурной диафрагмы, и при совмещении входного зрачка с первым компонентом (схема «в») ни один из компонентов не работает с телецентрическим ходом главных лучей. Кроме того, при разработке объективов для охлаждаемых приемников возникает требование, связанное с уменьшением эффекта Нарцисса, накладывающее дополнительные ограничения на дизайн линз. Поэтому вопрос о том, какое наименьшее количество линз может содержать объектив, сопрягаемый с охлаждаемым матричным приемником, не является очевидным, и в рамках настоящего исследования решался методами инженерного компьютерного проектирования оптических систем для конкретных значений фокусного расстояния, относительного отверстия и параметров приемника.

В [119] приведены результаты компьютерного моделирования оптической системы с двумя биасферическими линзами, в котором абсолютное значение фокусного расстояния составляет 300 мм, относительное отверстие 1 : 2, относительная длина 1,57. Методами компьютерно-

го моделирования показано, что расстояние между компонентами объектива является действенным коррекционным параметром и не может быть минимизировано без усложнения конструктивного исполнения второго компонента объектива.

Уменьшение осевой длины объектива приводит к увеличению относительных отверстий компонентов объектива и соответственно к увеличению линз во втором компоненте до двух или трех. При выполнении второго компонента из трех линз осевая длина становится равной фокусному расстоянию объектива.

В [116] приведены результаты компьютерного моделирования для объектива с относительным отверстием $1 : 4$ и фокусным расстоянием, абсолютное значение которого равно 100 мм. Рабочий спектральный диапазон длин волн принят в соответствии с [118] от 7,7 до 9,3 мкм. Результаты разработки иллюстрируются рис. 65.

Оптическая система содержит две биасферические линзы, при этом характер асферических поверхностей монотонный, без точек перегиба. На рис. 65, б схематически показано положение четырех точек 1–4 на чувствительной площадке приемника, для которых приведены диаграммы пятен рассеяния, при этом сторона квадрата на диаграммах составляет 100 мкм, радиус кружка Эйри 42 мкм. Размеры пятен рассеяния меньше диаметра кружка Эйри, что и обеспечивает ЧКХ, близкую к безаберрационной. Как в двухлинзовом объективе [119], так и в объективе, представленном на рис. 65, эффект Нарцисса минимизирован по критерию YNI [7].

При обсуждении характеристик объективов на практических занятиях по дисциплине рекомендуется обращаться к ГОСТ Р 58566–2019. Оптика и фотоника. Объективы оптико-электронных приборов. Методы испытаний [120].

Материал данного раздела призван помочь магистрантам в разработке оптических систем объективов, сопрягаемых с охлаждаемыми приемниками инфракрасного излучения, при выполнении выпускных квалификационных работ по тематике магистерских диссертаций, связанных с тепловизионными приборами.

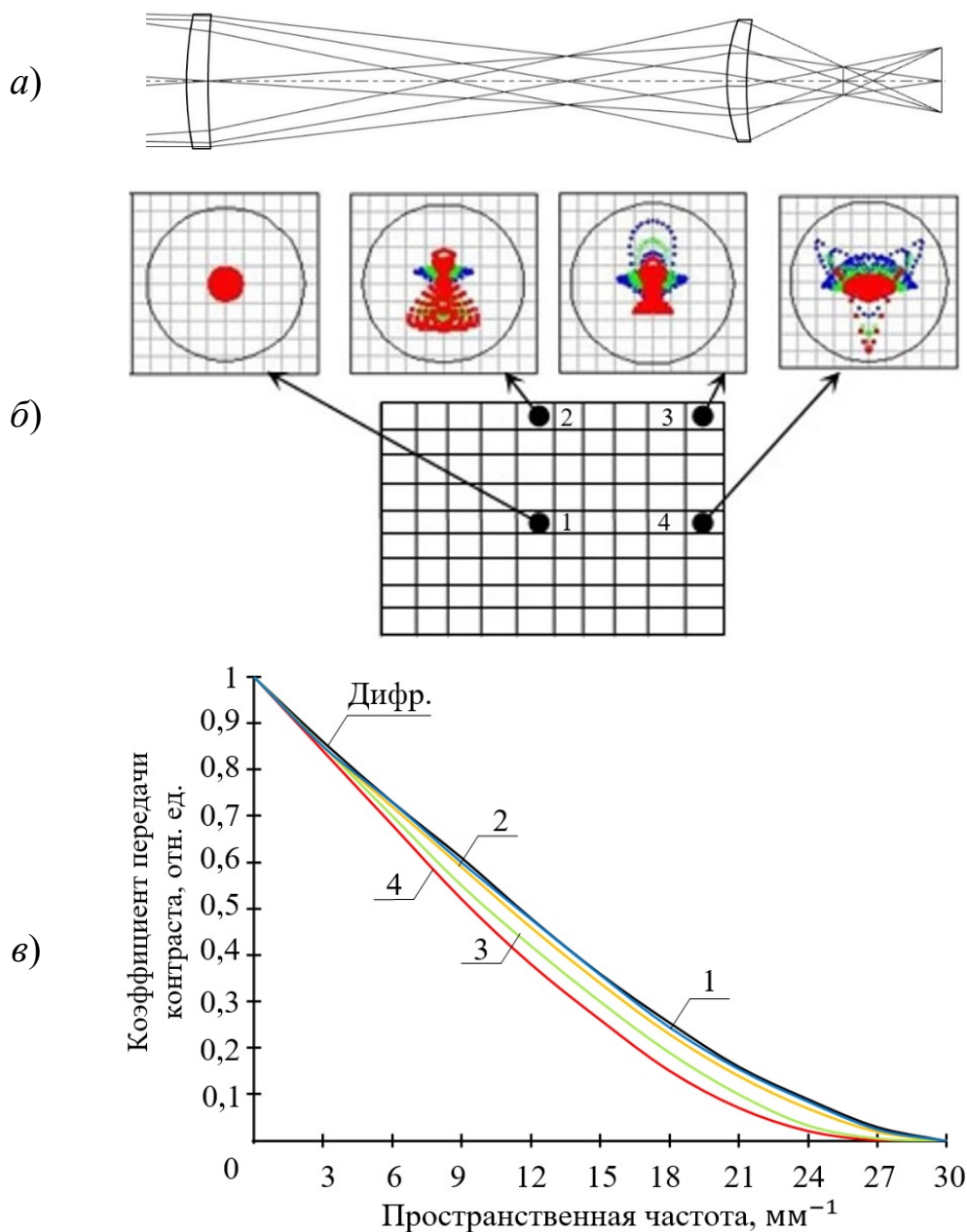


Рис. 65. Объектив с биасферическими линзами:

а) оптическая схема, 100 мм, 1 : 4; б) диаграммы пятен рассеяния; в) графики ЧКХ, соответствующие точкам 1–4

3.5. Проектирование оптических систем окуляров для наблюдения изображений на микродисплеях

Изображение, формируемое в оптико-электронном приборе на микродисплее, рассматривается через окуляр. Оптические схемы окуляров зависят от таких характеристик, как размер микродисплея, видимое увели-

чение окуляра, удаление и диаметр выходного зрачка. Качество изображения, формируемое окуляром, должно соответствовать возможностям зрительной системы человека.

Методы расчета и оптические системы окуляров принципиально одинаковы для любых оптико-электронных приборов, работающих в различных спектральных диапазонах – видимом или инфракрасном, так как расчет окуляра проводится независимо (в смысле трассировки лучей) от расчета объективной части оптико-электронного прибора (см. подраздел 2.4).

Часто для удобства расчет оптической системы окуляра проводят в обратном ходе лучей. Однако окончательную оценку качества изображения рекомендуется проводить в прямом ходе лучей с размещением глаза наблюдателя на требуемом расстоянии и с учетом возможных смещений глаза наблюдателя как перпендикулярно оптической оси, так и с учетом вращения глаза в широкоугольных окулярах.

На рис. 66–70 приводятся оптические системы некоторых окуляров, предназначенных для наблюдения изображения на микродисплеях в оптико-электронных приборах.

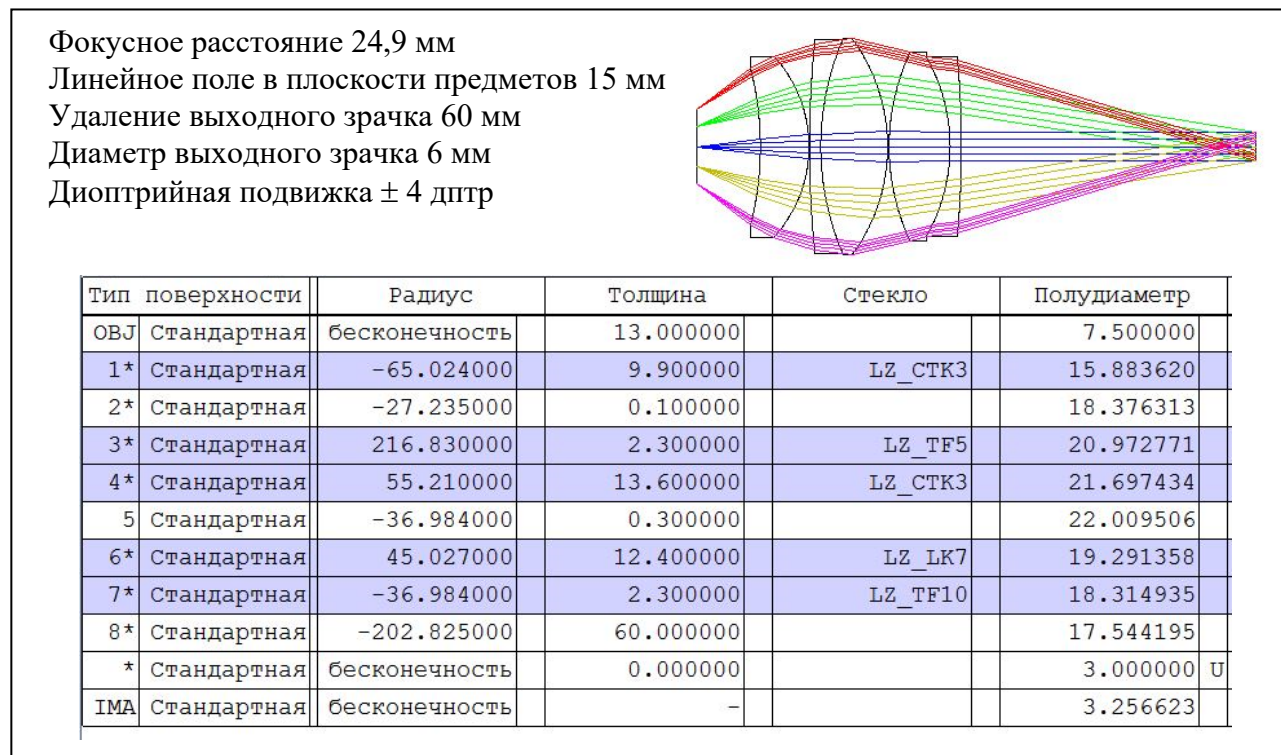
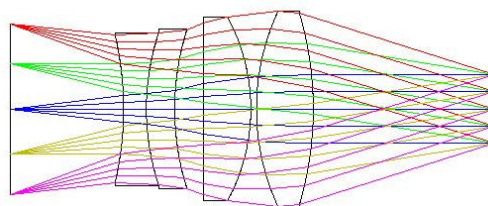


Рис. 66. Окуляр для микродисплея [38, с. 276]

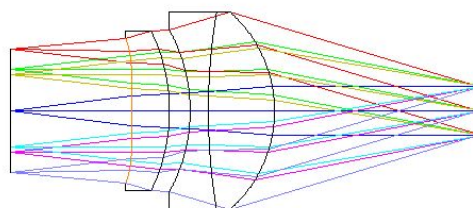
Фокусное расстояние 25,2 мм
 Линейное поле в плоскости предметов 15 мм
 Удаление выходного зрачка 16 мм
 Диаметр выходного зрачка 6 мм
 Диоптрийная подвижка ± 4 дптр



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
ОВУ	Стандартная	бесконечность		7.500000
1*	Стандартная	-28.246000	LZ_TF10	6.531231
2*	Стандартная	21.090000	LZ_K8	6.716752
3*	Стандартная	23.331000		22.000000 U
4*	Стандартная	776.296900	LZ_K8	7.593644
5*	Стандартная	-16.904000		8.106059
6*	Стандартная	20.421000	LZ_K8	8.577849
7*	Стандартная	-29.850500		8.408869
*	Стандартная	бесконечность		3.000000 U
ИМА	Стандартная	бесконечность	-	3.000000

Рис. 67. Окуляр для микродисплея [38, с. 290]

Фокусное расстояние 25,1 мм
 Линейное поле в плоскости предметов 15 мм
 Удаление выходного зрачка 25 мм
 Диаметр выходного зрачка 6 мм
 Диоптрийная подвижка ± 4 дптр

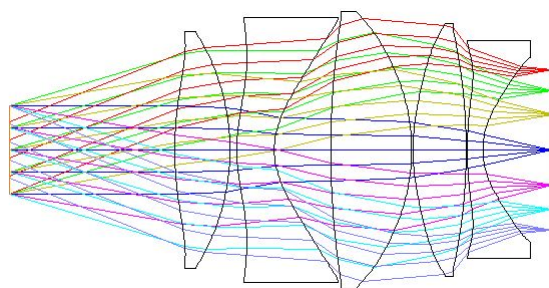


Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
ОВУ	Стандартная	бесконечность	V	7.500000
1*	Четная ас..	-192.405535 V	LZ_СТК19 S	8.853627
2*	Стандартная	-22.154644 V		9.687887
3*	Стандартная	-20.302510 V	LZ_TF10 S	9.933008
4*	Стандартная	72.579284 V	LZ_СТК19 S	12.000000 U
5*	Стандартная	-15.935803 V		12.000000 U
*	Стандартная	бесконечность		3.000000 U
ИМА	Стандартная	бесконечность	-	3.000000

Конич. пост.	Коеф. при ρ^2	Коеф. при ρ^4	Коеф. при ρ^6	Коеф. при ρ^8
0.000000				
-1.000000	2.2125E-003 V	-1.346E-004 V	1.2070E-006 V	-1.539E-008 V
0.000000				

Рис. 68. Окуляр с одной асферической поверхностью

Фокусное расстояние 17 мм
 Угловое поле 44°
 Удаление выходного зрачка 14 мм
 Диаметр выходного зрачка 7,5 мм



Тип поверхности		Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр	Конич. пост.
OBJ	Стандартная	бесконечность	бесконечность		*	0.000000
*	Стандартная	бесконечность	14.000000		3.750000	U 0.000000
2*	Четная ас..	21.284000	4.682000	1.53, 56.0	9.700000	U -10.841000
3*	Стандартная	-18.630000	0.571000		10.000000	U 0.000000
4*	Четная ас..	18.382000	3.164000	1.64, 22.4	11.200000	U -18.418000
5*	Четная ас..	6.510900	4.781000		11.000000	U -3.070000
6*	Стандартная	71.450000	6.829000	1.80, 46.6	11.100000	U 0.000000
7*	Стандартная	-16.940000	0.125000		11.700000	U 0.000000
8*	Четная ас..	16.302000	4.490000	1.81, 41.0	10.650000	U 0.180000
9*	Стандартная	-47.650000	0.099000		10.300000	U 0.000000
10*	Четная ас..	32.752000	1.310000	1.64, 22.4	9.200000	U -24.960000
11*	Четная ас..	6.436440	5.807000		7.800000	U -2.180000
IMA	Стандартная	бесконечность	-		6.815804	0.000000

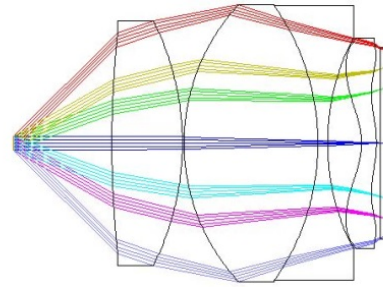
Конич. пост.	Козф. при ρ^2	Козф. при ρ^4	Козф. при ρ^6	Козф. при ρ^8	Козф. при ρ^{10}
0.000000					
0.000000					
-10.841000	-3.348E-003	V 2.5028E-005	V -7.985E-007	V 0.000000	0.000000
0.000000					
-18.418000	9.4769E-003	V -2.839E-004	V 1.0470E-006	V 0.000000	0.000000
-3.070000	8.8685E-003	V -7.726E-005	V 2.0063E-007	V 0.000000	0.000000
0.000000					
0.000000					
0.180000	1.1920E-004	V -2.916E-004	V 2.0474E-006	V 1.2054E-010	V -3.310E-011
0.000000					
-24.960000	9.2577E-004	V 2.7411E-004	V -1.087E-005	V 6.9599E-008	V 0.000000
-2.180000	2.4827E-003	V 6.9784E-004	V -2.580E-005	V 2.5781E-007	V 0.000000
0.000000					

Рис. 69. Асферический окуляр [121]

Окуляры [38] рассчитаны на спектральный диапазон от 0,48 до 0,59 мкм. Оценка качества изображения, формируемого окуляром, проводится при диаметре зрачка 4 мм по коэффициенту передачи контраста на частоте Найквиста ($N_H = 25$ лин/мм), при этом в пределах 2/3 поля указанный коэффициент превышает 0,5, что, по мнению авторов [38], обеспе-

чивает высокое качество изображения. В этом примере оценка качества изображения по ЧКХ проводится в обратном ходе лучей. Учитывая, что при работе с окуляром наблюдение ведется в прямом ходе лучей, при анализе оптических систем окуляров в прямом ходе значение частоты Найквиста N'_H в лин/угл. мин в пространстве изображений связано с N_H следующим образом: $N'_H = 0,0003 N_H f'_{ок}$.

Фокусное расстояние 25 мм
Угловое поле 90°
Удаление выходного зрачка 15 мм
Диаметр выходного зрачка 2 мм



Тип поверхности	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр	Конич. пост.
OBJ Стандартная	бесконечность	бесконечность		*	0.000000
* Стандартная	бесконечность	15.000000		1.00000 U	0.000000
2* Стандартная	158.218000	10.786000	1.88, 40.8	16.9058	0.000000
3* Стандартная	-41.589000	0.250000		18.7111	0.000000
4* Стандартная	31.092000	20.445000	1.88, 40.8	21.2305	0.000000
5* Стандартная	-36.545000	1.500000	1.96, 17.5	21.0000 U	0.000000
6* Стандартная	35.133000	5.173000		16.1568	0.000000
7* Четная ас..	-10.866000	2.282000	1.53, 56.0	16.1304	-2.67700
8* Четная ас..	-17.426000	0.600000		15.3050	-0.53730
9* Стандартная	бесконечность	0.700000	1.52, 64.2	14.6178	0.000000
10* Стандартная	бесконечность	0.474826 M		14.3185	0.000000
IMA Стандартная	бесконечность	-		14.0278	0.000000

Конич. пост.	Пар.1 (не исп.)	Пар.2 (не исп.)	Пар.3 (не исп.)	Пар.4 (не исп.)	Пар.5 (не исп.)
0.000000					
0.000000					
0.000000					
0.000000					
0.000000					
0.000000					
0.000000					
-2.67700	0.000000	2.0200E-004	-9.738E-007	3.2800E-009	-4.015E-012
-0.53730	0.000000	3.2730E-004	-6.879E-007	-2.327E-009	7.1330E-012
0.000000					
0.000000					
0.000000					

Рис. 70. Широкоугольный окуляр [122]

Непрерывное повышение требований к оптическим системам в целом и окулярам в частности задает тенденции их развития в направлении уменьшения габаритных размеров, массы, количества линз, повышения разрешающей способности и повышения коэффициента пропускания при одновременном увеличении углового поля и видимого увеличения окуляров, а зачастую и удаления выходного зрачка. Поэтому в окулярах применяются асферические поверхности, дифракционные оптические элементы, полимерные материалы. Эти тенденции особенно проявляются в последние десятилетия в связи с развитием оптических технологий формообразования.

Асферическая поверхность (четная асферика) – это осесимметричная поверхность, образуемая которой описывается уравнением:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \dots,$$

где z – координата асферической поверхности в системе координат, связанной с вершиной поверхности; $c=1/R$ – кривизна поверхности; r – радиальная координата; k – коническая постоянная; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и т. д. – коэффициенты асферики.

В качестве примера на рис. 68 приведена рассчитанная специально для данного учебника оптическая система окуляра, в которой применена одна асферическая поверхность. На практических занятиях по дисциплине рекомендуется провести оценку качества изображения при смещенном выходном зрачке глаза, а также моделирование работы окуляра для аметропического глаза с аметропией от минус 4 до 4 дптр. Оптическая система может использоваться на практических занятиях по дисциплине как стартовая для проведения учебного упражнения по выбору наилучшей поверхности для асферизации в окуляре.

На рис. 69 приводится оптическая система одного из окуляров из [121] из пяти линз, из которых первая и четвертая имеют по одной асферической поверхности, а вторая и пятая являются биасферическими. В [121] для асферических поверхностей приводятся только значения конических постоянных и отмечается, что значения коэффициентов асфе-

ческих поверхностей могут быть определены путем применения компьютерной оптимизации. Приведенные на рис. 69 значения коэффициентов асферики таким образом и получены. Выполнение учебного упражнения по определению коэффициентов асферики компьютерными методами в этой или других схемах из [121] может послужить для магистрантов первым опытом по изучению влияния коэффициентов асферики не только на качество изображения, но и на дизайн линз, обсуждению технологических ограничений и других вопросов.

В [122] приводится несколько схем широкоугольных окуляров с угловыми полями от 70 до 90° для наблюдения изображений на микродисплеях. Одна из них приведена на рис. 70. Назначение биасферической линзы в схеме – уменьшение астигматизма. В этом можно убедиться, заменив в схеме последнюю линзу просто плоскопараллельной пластинкой или удалив ее из схемы. Биасферическая линза в несколько раз уменьшает астигматизм и полностью исправляет его для поля $38,5^\circ$.

Целесообразность применения асферических поверхностей, дифракционных и градиентных оптических элементов в оптических системах зависит от технологических возможностей изготовления. Если погрешности изготовления высоки, то они не позволят достичь заложенных при расчете параметров поверхностей и сред. В [123] отмечается, что применение киноформных элементов в линзовых оптических системах видимого диапазона позволяет примерно на треть уменьшить количество линз в системе. Поскольку допуски на изготовление оптических систем окуляров выше, чем в оптических системах объективов, то их разработка представляет широкое поле для творчества в части использования в дизайне современных возможностей оптических технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка новых оптических систем является основой создания современных оптических и оптико-электронных приборов и комплексов с конкурентными характеристиками.

Современные компьютерные методы проектирования (расчета) оптических систем, представляя симбиоз эвристических и детерминированных процедур, предоставляют большие возможности для творческой профессиональной деятельности.

В учебнике далеко не полностью рассмотрены возможности компьютерных методов проектирования оптических систем. Автор надеется, что материал учебника, а главное – результаты выполнения практических заданий по учебной дисциплине пробудят профессиональный интерес магистрантов к творческому процессу разработки новых оптических систем, к дальнейшему движению к продвинутому уровню овладения методами расчета оптических систем, к созданию новых оригинальных оптических систем.

«Искусство» овладения компьютерными методами расчета оптических систем возможно только как результат синтеза знаний и опыта.

Автор выражает надежду, что понимание общего алгоритма оптимизации оптических систем позволит магистрантам быстро адаптироваться к применению других пакетов компьютерных программ по расчету оптических систем. Необходимо понимать, что используемая компьютерная программа является инструментом для реализации знаний в области опто-техники по созданию новых оптических систем с учетом современных возможностей технологий оптического формообразования, новых материалов и оптических элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rafael G. Gonzales-Acuna, Hektor A. Chaparro-Romo. General formula for bi-aspheric singlet lens design free of spherical aberration // *Applied Optics*. – 2018. – Vol. 57, No. 31. – P. 9341–9345.
2. Rafael G. Gonzales-Acuna, Hektor A. Chaparro-Romo, Julio C. Gutierrez-Vega. General formula for design a freeform singlet free of spherical aberration and astigmatism // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, No. 4. – P. 1010–1015.
3. Проектирование оптических систем: Пер. с англ. / Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. – М. : Мир, 1983. – 432 с.
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа : учеб. пособие. – М. : Логос, 2004. – 444 с.
5. Родионов С. А. Автоматизация проектирования оптических систем : учеб. пособие для приборостроительных вузов. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 270 с.
6. Шехонин А. А., Домненко В. М., Гаврилина О. А. Методология проектирования оптических приборов : учеб. пособие. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. – 91 с.
7. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation, 2009. – 732 p.
8. Кулакова Н. А., Насыров А. Р., Несмелова И. М. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра // *Оптический журнал*. – 2010. – Т. 77, № 5. – С. 34–42.
9. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 276 с.
10. Волков В. Г. Приборы ночного видения для бронемашин // *Специальная техника*. – 2004. – № 5. – С. 2–13.
11. Волков В. Г. Приборы ночного видения для бронемашин // *Специальная техника*. – 2004. – № 6. – С. 2–10.
12. Волков В. Г. Корабельные приборы ночного видения // *Специальная техника*. – 2006. – № 1. – С. 2–14.
13. Волков В. Г. Корабельные приборы ночного видения // *Специальная техника*. – 2006. – № 2. – С. 2–8.

14. Волков В. Г. Авиационные приборы ночного видения // Специальная техника. – 2006. – № 3. – С. 2–20.
15. Волков В. Г. Авиационные приборы ночного видения // Специальная техника. – 2006. – № 4. – С. 2–12.
16. Офиц. сайт АО «Новосибирский приборостроительный завод». – URL: <http://npzoptics.ru> (дата обращения 30.06.2021).
17. Оружие и технологии России. Энциклопедия XXI век. Том 11. Опτικο-электронные системы и лазерная техника. – М. : Издательский дом «Оружие и технологии», 2005. – 720 с.
18. Бутслов М. М., Степанов Б. И., Фанченко С. Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. – М. : Наука, 1978. – 431 с.
19. Офиц. сайт АО «Катод» – URL: <http://katodnv.com> (дата обращения 30.06.2021).
20. Орлов В. А., Петров С. И. Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. – М. : Воениздат, 1989. – 254 с.
21. Experimental Flight Testing of Night Vision Imaging Systems in Military Fighter Aircraft / R. Sobatini, M.A. Richardson, M. Cantiello, M. Toscano, P. Fiorini, D. Zammit-Mangion, A. Gatdi. – Journal of Testing and Evaluation. – Vol. 42, No. 1. – P. 1–17.
22. Vollmerhausen R. Night vision integrated performance model: impact of a recent change on the model's predictive accuracy // Optics Express. – Vol. 24, No. 21. – P. 23654–23666.
23. Пат. 2217780 Российская Федерация, МПК51 G02В 9/60. Светосильный объектив / Бабинцев В. Ф., Леонова Г. А.; заявитель и патентообладатель Государственное унитарное дочернее предприятие «Специальное конструкторское бюро техники ночного видения» Государственного унитарного предприятия «НПО "Орион"». – № 2002111076/28, заявл. 25.04.2002 ; опубл. 27.11.2003, Бюл. № 33. – 9 с.
24. Пат. 2276799 Российская Федерация, МПК51 G02В 13/14, 6/60. Объектив для ближней ИК-области спектра / Скляр С. Н., Склярова А. И.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Красногорский завод им. С. А. Зверева» / № 2004137662/28 ; заявл. 23.12.2004 ; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14. – 8 с.

25. Точприбор : в 3 т. Т. 1 : Оптические и оптико-электронные приборы, системы прицеливания, разведки и наблюдения для сухопутных войск / ред., сост. В. В. Малинин. – Новосибирск : Наука, 2011. – 412 с.
26. Пат. 2504808 Российская Федерация, МПК51 G02B 6/60, 13/16. Объектив для прибора ночного видения / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В.; заявители и патентообладатели Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. / № 2012131966/28 ; заявл. 25.07.2012 ; опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2. – 13 с.
27. Пат. 2360269 Российская Федерация, МПК51 G02B 9/34, 13/14. Объектив для приборов ночного видения / Шишкин И. П.; заявитель и патентообладатель Иностранное частное производственное унитарное предприятие «Сайбир Оптикс» (ВУ) / № 2007138243/28 ; заявл. 15.10.2007 ; опубл. 27.06.2009, Бюл. № 18. – 9 с.
28. Запрягаева Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем. – М. : Логос, 2000. – 584 с.
29. Теребиж В. Ю. Современные оптические телескопы. – М. : Физматлит, 2005. – 80 с.
30. Тульева Н. Н. Объективы для кино и телевидения : учеб. пособие. – СПб. : СПбГУКиТ, 2009. – 92 с.
31. Гаврилов Е. В., Кириловский В. К. Современные кинообъективы и их контроль // Оптический журнал, 2005. – Т. 72. – № 10. – С. 47–55.
32. Ray S. F., Applied Photographic Optics // Focal Press. – 1988. – 526 p.
33. Хацевич Т. Н. Критерий оценки качества изображения объективов ПНВ // Приборы. – 2019. – № 10. – С. 35–43.
34. ГОСТ 19803–86. Преобразователи электронно-оптические. Термины, определения и буквенные обозначения. – Введ. 19.12.1986. – М. : Из-во стандартов, 1986. – 14 с.
35. Nebi Gul, Murat Efe. Improved analytical modulation transfer function for image intensified charge coupled devices // Turk J Elec Eng & Comp Sci, 2010. – Vol. 18. – No. 1. – P. 71–81.
36. Пат. 186023 Российская Федерация, МПК51 G02B 13/16, 9/34. Объектив для прибора ночного видения / Хацевич Т. Н., Волкова К. Д., Дружкин Е. В., Мордвин Н. Н.; заявитель и патентообладатель ООО «Конструкторское бюро «Луггар» № 2018131202/28 ; заявл. 29.08.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 36. – 14 с.

37. Пат. 2276799 Российская Федерация, МКП G02B 13/14, 9/60. Объектив для ближней ИК-области спектра / Скляр С. Н., Склярова А. И.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Красногорский завод им. С. А. Зверева». – № 2004137662/28 ; заявл. 23.12.2004 ; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14. – 8 с.

38. Медведев А. В., Гринкевич А. В., Князева С. Н. Перспективные направления развития оптико-электронной техники и техники ночного видения. – Ростов Великий : ООО «Ростовский оптико-механический завод», 2012. – 960 с.

39. Пат. 2368923 Российская Федерация, МКП G02B 9/62, 11/32, 13/14. Объектив для приборов ночного видения / Козловский С. М., Ходосевич В. В., Ходосевич В. М., Ходосевич С. В. ; заявители и патентообладатели Козловский С. М., Ходосевич В. В., Ходосевич В. М., Ходосевич С. В. – № 2005112066/28 ; заявл. 22.04.2005 ; опубл. 27.10.2006, Бюл. № 27. – 8 с.

40. Пат. 2218585 Российская Федерация, МКП G02B 9/60, 13/14. Линзовый объектив прибора ночного видения / Хацевич Т. Н., Журавлев П. В., Косолапов Г. И.; заявитель и патентообладатель Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники СО РАН. – № 2002107187/28 ; заявл 20.03.2002 ; опубл. 10.12.2003, Бюл. № 34. – 14 с.

41. Практические достижения в технике ночного видения / Медведев А. В., Гринкевич А. В., Князева С. Н. – Ростов Великий : ООО «Ростовский оптико-механический завод», 2009. – 944 с.

42. CN 102096176A China, G02B 13/14, 13/00, 7/10. Prior Pub. Date: 2010.12.15 ; Date of Patent 2011.06.15. – 6 с.

43. Patent Application Publication US 2002/0048080. G02B 13/14. Large numerical aperture objective lens and night vision optical device using the same / Yukiko Nagatoshi, Saitama City (JP), Fumio Watanabe, Kumagaya City (JP); Correspondence Address: Arnold International P.O. BOX 585, Great Falls, VA 22066 (US). Priority Data 17.07.2001; Pub. Date 25.04.2002. – 6 с.

44. Patent Application 1-2001-001106-6. KR. Objective lens system for night vision glasses / Jae-Sun Kim; EO System CO., LTD. – Registration Number of General Power of Attorney 2003-013658-5; Application Date 27.03.2003. – 15 с.

45. Пат. 2261461 Российская Федерация, МКП G02B 17/08. Светосильный зеркальнолинзовый объектив / Мельникова Н. Н., Грудзино Ю. Б., Давиденко В. П.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Лыткаринский завод оптического стекла». – № 2004125619/28 ; заявл. 24.08.2004 ; опубл. 27.09.2005, Бюл. № 27. – 5 с.

46. Николаев Д. Н. Электронно-оптические преобразователи. История развития и виды поколений // Доклады ТУСУРа. – 2007. – № 1(15). – С. 29–33.

47. Гибин И. С., Котляр П. Е. Гибридные автоэмиссионные фотокатоды (обзор) // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 5, № 5. – С. 497–506.

48. Научно-производственное предприятие «Силар» – URL: <http://www.silar.ru/spectrals> (дата обращения 30.06.2021).

49. Хацевич Т. Н. Прикладная оптика : лабораторный практикум. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 139 с.

50. Хацевич Т. Н. Медицинские оптические приборы. Физиологическая оптика : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 135 с.

51. Пат. 2042970 Российская Федерация, МКП G02B 25/00. Светосильный окуляр с большим передним отрезком / Бездидько С. Н., Гришина Л. И.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа «Красногорский завод». – № 2004125619/28 ; заявл. 24.08.2004 ; опубл. 27.09.2005, Бюл. № 27. – 5 с.

52. Пат. 2105335 Российская Федерация, МКП G02B 25/00. Окуляр с удаленным выходным зрачком / Медведев А., Гринкевич А.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Ростовский оптико-механический завод». – № 95120143/28 ; заявл. 28.11.1995 ; опубл. 20.02.1998. – 5 с.

53. Пат. 2439631 Российская Федерация, МКП G02B 25/00. Окуляр / Шишкин И., Ольшанский А.; заявитель и патентообладатель Иностранное частное производственное унитарное предприятие «Белтекс Оптик» компании «Сайбир Оптикс» (BY). – № 2010134205/28 ; заявл. 16.08.2010 ; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 8 с.

54. KR 1020040084219A, G02B 23/00. Eyepiece lens system for night vision glasses / 10-2003-0019125, Priority Data 2003.03.27; Pub. Date 2004.10.06. – 13 с.

55. JP 5646440 B2, G02B 25/00,13/18. Eyepiece / P 2011-252282; Priority Data 2011.11.18; Pub. Date 2014.11.14 – 16 с.

56. Кулакова Н. А., Насыров А. Р., Несмелова И. М. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра // Оптический журнал. – 2010. – № 77 (5). – С. 34–40.

57. Хацевич Т. Н. Оптика для тепловизионных приборов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. научн. конгресс : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 5, Ч. 1. – С. 36–39.

58. Прогнозирование параметров матричных фотоприемных устройств / А. И. Патрашин, И. Д. Бурлаков, М. Д. Корнеева, В. В. Шабаров // Успехи прикладной физики. – 2014. – № 1(2). – С. 50–59.

59. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Приемники излучения тепловизионных приборов // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 203–207.

60. Якушенков Ю. Г. Тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3(79). – С. 11–14.

61. Яковлев О. Тепловидение и его применение в системах охраны и обеспечения безопасности // Алгоритм безопасности. – 2008. – № 3. – С. 76–78.

62. Ураков А. Л., Фишер Е. Л. Температурное контрастирование тканей тела человека улучшает их инфракрасную визуализацию // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2016. – № 6. – С. 884–886.

63. Козлов С. Д., Насыров А. Р., Нигматуллина Н. Г. Вариообъективы для тепловизионных приборов наблюдения // Оптический журнал. – 2017. – № 84 (3). – С. 53–56.

64. Гаршин А. С. Особенности расчета трехлинзовых инфракрасных объективов, работающих с охлаждаемыми приемниками // Оптический журнал. – 2016. – № 83 (4). – С. 38–43.

65. Насыров А. Р. Методы атермализации оптических систем тепловизионных приборов // Оптический журнал. – 2017. – № 84 (3). – С. 57–59.

66. Пат. 2629887 Российская Федерация, МПК51 G02B 13/14. Светосильный трехлинзовый объектив для ИК-области спектра / Белоусов А. И.;

заявитель Белоусов А. И., патентообладатель Акционерное общество «Швабе – Оборона и Защита». – № 2016135400 ; заявл. 30.08.2016 ; опубл. 04.09.2017, Бюл. № 25. – 16 с.

67. Пат. 2583338 Российская Федерация, МПК51G02В 13/14. Атермализованный светосильный объектив ИК-диапазона / Бушмелев Н. И., Погорельский С. Л., Просвирнов Р. А., Шилин А. А.; заявитель Бушмелев Н. И., Погорельский С. Л., Просвирнов Р. А., Шилин А. А.; патентообладатель Акционерное общество «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова». – № 2015106635/28 ; заявл. 27.02.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13. – 10 с.

68. Волосов Д. С. Фотографическая оптика: теория, основы проектирования, оптические характеристики : учеб. пособие для киновузов. – М. : Искусство, 1978. – 671 с.

69. Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. Исследование объективов для малогабаритных тепловизионных приборов с позиций модели двухкомпонентного объектива // Вестник СГУГиТ, 2018. – Т. 23, № 2. – С. 245–261.

70. Пат. 115514 Российская Федерация, МПК51 G02В 13/14. Объектив для ИК-области спектра / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В.; заявитель и патентообладатель Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – № 2012100981/28 ; заявл. 11.01.2012 ; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. – 2 с.

71. Пат. 125732 Российская Федерация, МПК51 G02В 23/00. Прицел тепловизионный / Дружкин Е. В., Трясов Ю. А.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Производственное объединение "Новосибирский приборостроительный завод"» (ОАО «ПО "НПЗ"»). – № 2012135920/28 ; заявл. 21.08.2012 ; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7. – 2 с.

72. Пат. 125734 Российская Федерация, МПК51 G02В 23/12. Тепловизионный наблюдательный прибор / Дружкин Е. В., Трясов Ю. А.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Производственное объединение "Новосибирский приборостроительный завод"» (ОАО «ПО "НПЗ"»). – № 2012131825/28 ; заявл. 24.07.2012 ; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7. – 2 с.

73. Пат. 2477502 Российская Федерация, МПК51 G02В 9/38. Светосильный объектив с угловым полем не менее 25 градусов для тепловизора (варианты) / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В.; заявитель и патентообладатель

Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – № 2011133724/28 ; заявл. 10.08.2011 ; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7. – 22 с.

74. Пат. 134671 Российская Федерация, МПК51 G02В 9/38. Светосильный объектив для ИК-области спектра / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В.; заявитель и патентообладатель Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – № 2013137050/28 ; заявл. 06.08.2013 ; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. – 2 с.

75. Пат. 2538067 Российская Федерация, МПК51 G02В 9/62. Светосильный объектив с изменяемой величиной поля зрения для тепловизора (варианты) / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В.; заявитель и патентообладатель Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – № 2013128063/28 ; заявл. 18.06.2013 ; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 19 с.

76. Пат. 154577 Российская Федерация, МПК51 G02В 9/34. Светосильный объектив для ИК-области спектра / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Оптическое Расчетное Бюро». – № 2015112712/28 ; заявл. 07.04.2015 ; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. – 2 с.

77. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н., Бровка Н. В. Тепловизионный прибор для медицинских целей // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82, № 7. – С. 15–18.

78. Медведев А. В., Гринкевич А. В., Князева С. Н. Практические достижения в оптико-электронной технике. – Ростов Великий : ООО «Ростовский оптико-механический завод», 2010. – 736 с.

79. Пат. 192401 Российская Федерация, МПК G02В 13/14, 9/34. Светосильный инфракрасный объектив / Левандовская Л. Е., Полищук Г. С., Сокольский М. Н., Хитрик А. С., Быстров В. А.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «ЛОМО». – № 2019113244 ; заявл. 29.04.2019 ; опубл. 29.04.2019, Бюл. № 26. – 9 с.

80. Пат. 115514 Российская Федерация, МПК51 G02В 13/14. Объектив для ИК-области спектра / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В.; заявитель и патентообладатель Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – № 2012100981/28 ; заявл. 11.01.2012 ; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. – 2 с.

81. Пат. 2386155 Российская Федерация, МПК G02В 9/34, 13/14. Светосильный объектив / Щеглов С. И., Зарубин В. П., Зубок С. Н.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Красногорский

завод им. С.А. Зверева». – № 2008147021/28 ; заявл. 28.11.2008 ; опубл. 10.04.2010, Бюл. № 10. – 6 с.

82. Patent Application Publication US 2017/0139188. United States, G01J 5/08, G02B 9/16. Far infrared imaging lens set, objective lens and fire source detector / Jiaying LI, Chaoming ZHOU, Bo SUN, Hai HUANG, Yuqing CHEN, Yunfeng GAO. ; Applicant: HAN'S LASER TECHNOLOGY INDUSTRY GROUP CO., LTD. – Appl. No.: 15/322,557; PCT Filed 07.08.2014; Pub. Date 18.05.2017.

83. Patent Application Publication US 2015/0146284. United States, G01J 5/08, G02B 9/16. Lens for infrared cameras / Koji Kawaguchi.; Applicant: TAMRON CO., LTD. ; Appl. No.: 14/611,979; PCT Filed 02.02.2015; Pub. Date 28.05.2015.

84. Сайт компании TYDEX. – URL: <https://www.tydexoptics.com/ru/> (дата обращения 30.06.2021).

85. Официальный сайт производственной компании Электростекло. – URL: <http://www.elektrosteklo.ru/Crystals.htm> (дата обращения 30.06.2021).

86. Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 284 с.

87. US 7835071. United States Patent, G02B 13/14. FAR-INFRARED CAMERA LENS, LENS UNIT, AND IMAGING APPARATUS / Tatsuya Izumi ; Assignee: Sumitomo Electric Industries, LTD, Osaka-shi (JP) ; Appl. No.: 12/076,335 ; Filed: 17.03.2008 ; Prior Pub. Date 12.03.2009 ; Date of Patent 16.11.2010.

88. Прикладная оптика : учеб. пособие / Дубовик А. С., Апенко М. И., Дурейко Г. В. и др. – М. : Недра, 1982. – 612 с.

89. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ. М. В. Васильченко ; под ред. А. И. Горячева. – М. : Мир, 1978. – 414 с.

90. Михалюта М. А., Хацевич Т. Н. Широкоугольный светосильный объектив для тепловизионной камеры // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – Т. 1. – С. 128–134.

91. Mann A. Infrared Optics and Zoom Lenses. – SPIE Press, 2000. – Vol. TT42. – Bellingham, Washington, USA. – 140 p.

92. Турыгин И. А. Прикладная оптика – М. : Машиностроение, 1966. – 431 с.
93. Aberration Theory Made Simple. Second Edition : Теория aberrаций – это просто! / Пер с англ. ; гл. ред. русской серии д.т.н., проф. Васильев В. Н. – СПб. : СПГУ ИТМО, 2011. – 230 с.
94. Романова Г. Э., Пысь Г. Исследование абберационных свойств и возможности пассивной атермализации оптических систем, работающих в области 8–12 мкм систем // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13-25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – Т. 2. – С. 10–17.
95. Чан Куок Туан. Разработка и исследование линзовых объективов для тепловизионных приборов : автореф. дис. ...канд. техн. наук / Чан Куок Туан. – СПб., 2008. – 23 с.
96. Ульянова Е. О., Шатунов К. П. Термокомпенсация в оптической системе тепловизионного прибора // Прикладная физика, 2012. – Т. 2. – С. 116–120.
97. Киселева Ю. С., Хацевич Т. Н. Обоснование требований к объективам тепловизионных каналов, размещаемых на летательных аппаратах // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – Т. 1. – С. 173–180.
98. Пат. 2629890 Российская Федерция, МПК51 G02В 13/14, 9/34. Инфракрасный объектив с пассивной атермализацией / Белоусов А. И.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Швабе – Оборона и Защита». – № 2016123317 ; заявл. 10.06.2016 ; опубл. 04.09.2017, Бюл. № 25. – 15 с.
99. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Реализация общетехнических и специальных требований при разработке малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов // Приборы. – 2018. – № 1. – С. 43–50.
100. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2013. – № 3. – С. 1–13.

101. Тарасов В. В., Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Современные проблемы оплотехники : учеб. пособие. – М. : МИИГАиК, 2014. – 82 с.
102. Гаршин А. С. Особенности расчета трехлинзовых инфракрасных объективов, работающих с охлаждаемыми приемниками // Оптический журнал. – 2016. – Т.83, № 4. – С. 38–43.
103. Ульянова Е.О. Оптические системы для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 8–12 мкм // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 6. – С. 14–19.
104. Пат. 2434256 Российская Федерация, МПК G02B 13/14, 9/60. Светосильный широкоугольный линзовый объектив для инфракрасной области спектра / Лебедев О. А., Сабинин В. Е., Солк С. В.; патентообладатели Федеральное государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико – электронных приборов и систем (ФГУП НИИКИ ОЭП). – № 2010134736/28 ; заявл. 12.08.2010 ; опубл. 20.11.2011, Бюл. № 32. – 8 с.
105. Пат. 2419113 Российская Федерация, МПК G02B 13/14, 9/64. Оптическая система с вынесенной апертурной диафрагмой для среднего ИК диапазона спектра / Хацевич Т. Н., Терешин Е. А. ; патентообладатели Хацевич Т. Н., Терешин Е. А. – № 2009130270/28 ; заявл. 06.08.2009 ; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14. – 20 с.
106. Пат. 2379723 Российская Федерация, МПК G02B 13/14, 9/60. Светосильный объектив с вынесенными зрачками для ИК области спектра / Терешин Е. А., Хацевич Т. Н., Ковтуненко Е. В.; патентообладатель Институт физики полупроводников СО РАН. – № 2008134733/28 ; заявл. 25.08.2008 ; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2. – 13 с.
107. Пат. 2525463 Российская Федерация, МПК G02B 13/14, 13/16. Оптическая система тепловизионного прибора / Балоев В. А., Иванов В. П., Рагинов С. В., Скочилова И. А.; патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение» Государственный институт прикладной оптики (ОАО «НПО ГИПО»). – № 2013114939/28 ; заявл. 03.04.2014 ; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19. – 6 с.
108. US 7136235, Int. Cl. G02B 9/00. Optical apparatus / Anthony John Kirkham ; assignee Thales Optics Ltd. – Date of patent 14.11.2006.

109. US 6424460, Int. Cl. G02B 15/14. Dual field-of-view objects system for the infrared / Anthony John Kirkham; assignee Pilkington PE Limited. – Date of patent 23.07.2002.

110. US. 6423969, Int. Cl. G08B 13/14. Dual infrared band objective lens / Max Amon ; assignee Lockheed Martin Corporation. – Date of patent 23.07.2002.

111. Пат. 2355003 Российская Федерация, МПК G02B 17/08. Оптическая система для формирования изображения объекта в двух полях зрения / Киселев М. В., Малеев Н. М., Михайлов В. Н.; патентообладатель Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (ФГУП «ПО «УОМЗ»). – № 2007132525/28 ; заявл. 28.08.2007 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13. – 12 с.

112. Пат. 187815 Российская Федерация, МПК G02B 13/14, 13/18, 9/06. Двухлинзовый светосильный объектив для ИК-области спектра / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В., Мордвин Н. Н., Волкова К. Д.; патентообладатель ООО «Конструкторское бюро «Луггар». – № 2018136171 ; заявл. 12.10.2018 ; опубл. 19.03.2019, Бюл. № 8. – 10 с.

113. Пат. 187832 Российская Федерация, МПК G02B 13/14, 13/18, 9/06. Двухлинзовый светосильный объектив для инфракрасной области спектра / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В., Мордвин Н. Н., Волкова К. Д. ; заявитель и патентообладатель ООО «Конструкторское бюро «Луггар». – № 2018136280 ; заявл. 15.10.2018 ; опубл. 19.03.2019, Бюл. № 8. – 9 с.

114. Терешин Е. А., Хацевич Т. Н. Алгоритм эффективного проектирования многокомпонентных систем для инфракрасного спектрального диапазона / VIII Междунар. конф. «Прикладная оптика-2008» : сб. материалов (Санкт-Петербург, 20–24 октября 2008 г.). – СПб. : Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, 2008. – С. 69–73.

115. Хацевич Т. Н. Оптические системы современных тепловизионных приборов // Наука и технологии: вызовы и перспективы : сб. материалов Междунар. конф., 20 ноября 2017 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. – С. 3–7.

116. Хацевич Т. Н., Греченевский А. С. Исследование схем объективов с вынесенным выходным зрачком для тепловизионных приборов // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 259–275.

117. Греченевский А. С., Хацевич Т. Н. Структура объектива тепловизионного прибора с охлаждаемым приемником // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-19. XV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 6, № 2. – С. 20–27.

118. SCORPIO MW 640 x 512 – 15 μm pitch – МСТ. – URL: <https://www.lynred.com> (дата обращения 30.06.2021).

119. Греченевский А. С., Хацевич Т. Н. Разработка объектива тепловизионной камеры // Калашниковские чтения [Электронный ресурс] : VI Всероссийская научно-практическая конференция, 7 ноября 2019 г. (В рамках II Молодежного форума студентов и курсантов оборонных специальностей вузов России «С именем Калашникова», 6–8 ноября 2019 г.) / [Оргкомитет: Ю. Б. Брызгалов, С. А. Писарев, Н. П. Устинова]. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2019. – 16,7 Мбайт (PDF). – С. 295–304.

120. ГОСТ Р 58566–2019. Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний. – Введ. 27.09.2019. – М. : Стандартинформ, 2019. – 27 с.

121. Patent Application Publication US 2021/0033866. United States, G02B 25/00, 1/04. Eyepiece optical system and head – mounted display / Hongpeng Cao (CN) ; Jianfei Guo (CN) ; Huajun Peng (CN) ; Shenzhen Nade Optical Co., Ltd, Shenzhen (CN). – No. 16/920406 ; Prior Pub. Date 02.07.2020 ; Prior Pub. Date 04.02.2021.

122. Patent Application Publication US 2020/0033586 A1. United States, G02B 9/12, 13/18. Eyepiece and display apparatus / MAMORU SUZUKI (JP) ; TAKEO ARAI (JP) ; TAKATOSHI MATSUYAMA (JP) ; SONY CORPORATION, TOKYO (JP). – No. 16 / 500,968 ; Prior Pub. Date 05.03.2018 ; Date of Patent 30.01.2020. – 24 p.

123. Кулакова Н. А., Насыров А. Р., Несмелова И. М. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 5. – С. 34–42.

Учебное издание

Хацевич Татьяна Николаевна

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Редактор *Е. К. Деханова*

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 26.01.2022. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 9,07. Тираж 65 экз. Заказ 1.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.