

На правах рукописи

Шилин Аркадий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
АТЕРМАЛИЗОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ
С МАТРИЧНЫМ ПРИЕМНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 05.11.16 – **Информационно-измерительные и управляющие
системы (в промышленности)**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула, 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель

кандидат технических наук
Погорельский Семен Львович

Официальные оппоненты:

Венедиктов Владимир Юрьевич
доктор физико-математических наук,
доцент,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина),
кафедра «Лазерные измерительные и
навигационные системы»,
профессор

Лапо Лина Михайловна
кандидат технических наук,
ОАО «Ленинградское оптико-механическое
объединение»,
ведущий конструктор

Ведущая организация:

**ОАО «Научно-производственное
объединение «Государственный институт
прикладной оптики»**

Защита состоится «24» декабря 2014 г. в «11⁰⁰» часов на заседании диссертационного совета Д.212.271.07 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, просп. Ленина д.92, 9 – 101)

С диссертацией можно ознакомиться на сайте и в библиотеке Тульского государственного университета (300012, г. Тула, просп. Ленина д.92, ссылка на диссертацию <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-07/shilin-aa>).

автореферат разослан «6» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Данилкин Федор Алексеевич

1. Общее содержание работы.

Актуальность темы. Тепловидение – это направление в технических измерениях, изучающее физические основы, методы и приборы, обеспечивающие возможность наблюдения объектов с различной радиационной температурой поверхности. Приборы, которые позволяют фиксировать распределение радиационной температуры объектов, называют тепловизионными приборами (тепловизорами). Современные тепловизоры способны решать множество задач военного и гражданского назначения: видеонаблюдение и рекогносцировка подразделений противника, целеуказание для высокоточного оружия, мониторинг и охрана особо важных объектов, выявление скрытых бункеров и скрытых очагов пожаров, проверка состояния электрооборудования, контроль технологических линий, поиск и оценка теплопотерь в конструкциях сооружений, обнаружение утечек из газопроводов и пр.

Постоянно расширяющийся круг задач, для решения которых привлекаются тепловизионные средства визуализации, а также успехи полупроводниковой технологии создания приемников излучения стимулировали в последнее десятилетие появление большого количества несканирующих тепловизионных приборов, т.е. тепловизоров с матричным приемником излучения, расположенным в фокальной плоскости оптической системы прибора. Многообразие существующих тепловизионных систем способствовало выпуску большого количества публикаций, посвященных вопросам создания схем построения, конструкций и изучения параметров тепловизионных систем, среди которых, как наиболее фундаментальные и значимые можно выделить работы авторов Ю.Г. Якушенкова, Р.М. Алеева, В.П. Иванова, В.И. Курта, В.В. Тарасова.

Исследовательскими работами и вопросами в области модернизации тепловизионных приборов в настоящее время занимается ряд ведущих университетов России, таких как: Московский Государственный Университет Геодезии и Картографии (ФГБОУ ВПО МИИГАиК); Санкт-Петербургский Университет Информационных Технологий, Механики и Оптики (НИУ ИТМО); Новосибирский Национальный Исследовательский Государственный Университет (НИУ НГУ), Казанский (Приволжский) федеральный университет (ФГАОУ ВПО КФУ). Среди отраслевых институтов России, которые помимо разработки теории имеют обширный опыт создания тепловизионных систем, стоит отметить научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (ОАО «НПО ГИПО») и центральный научно-исследовательский институт «ЦИКЛОН» (ОАО «ЦНИИ Циклон»), внесших значительный вклад в развитие тепловидения.

Для решения широкого спектра задач к современным несканирующим тепловизионным приборам предъявляются высокие требования по разрешающей способности, чувствительности и надежности функционирования в различных условиях окружающей среды. Среда распространения излучения может существенно влиять на оптический сигнал, ослабляя поток излучения и снижая контраст изображения. Чаще всего такой средой является земная атмосфера, которая содержит не только поглощающие и рассеивающие излучение атмосферные газы (азот, кислород, водяные пары, углекислый газ, озон, угарный газ, окислы азота и т.д.), но и аэрозольные частицы природного или промышленного происхождения. Состав атмосферы и ее оптические характеристики непостоянны и зависят от различных

факторов, например таких, как давление, влажность, температура, которые оказывают влияние не только на оптический сигнал, проходящий через атмосферу, но и на сам тепловизионный прибор. При этом воздействие изменения температуры на оптическую систему тепловизионного прибора может привести к значительному искажению хода лучей в системе.

При повышении температуры изменяются как показатель преломления оптических сред, так и линейные размеры оптических элементов. В результате перечисленных изменений меняется фокусное расстояние и ход лучей в оптическом приборе, что приводит к увеличению абберационного кружка рассеяния и смещению плоскости наилучшего изображения оптической системы относительно чувствительной поверхности приемника излучения. Это приводит к ухудшению качества изображения – одного из важнейших параметров для всех видов информационно-измерительных систем, которые строят изображение объекта наблюдения. В тепловизионных приборах, где средняя величина яркости картины подавляется таким образом, чтобы на изображении были видны только изменения яркости относительно среднего уровня, ухудшение качества изображения особенно критично, т.к. приводит к неверному определению и средней величины яркости и ее изменения относительно среднего уровня.

Учитывая, что современные тепловизионные приборы часто работают в широком диапазоне температур окружающей среды, который может достигать ± 50 °С и более, компенсация термических aberrаций (атермализации) является одной из основных задач, решаемых при разработке оптических систем тепловизионных приборов.

Таким образом, тепловизионные приборы, строящие изображение при помощи матричного приемника излучения, являются объектом исследования.

Предметом исследования являются методы компенсации влияния термических aberrационных искажений изображения в тепловизионных приборах.

Цель работы – повышение качества изображения, получаемого с тепловизионного прибора, при изменении температуры за счет минимизации влияния термических aberrационных искажений, т.е. решение задачи атермализации. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

- произведён анализ существующих подходов к решению задачи атермализации и методов расчета смещения фокальной плоскости под воздействием температуры;
- проведен анализ свойств оптических материалов, применяемых для проектирования тепловизионных приборов;
- проведен анализ характеристик современных матричных приемников излучения;
- разработана методика расчета атермализованной многокомпонентной оптической системы тепловизионного прибора.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен критерий оценки влияния термических aberrаций на оптическую систему тепловизионного прибора, основанный на применении принципа таутохронности, обоснована целесообразность его использования.
2. Предложен метод выбора материалов оптических элементов для пассивной атермализации многокомпонентной оптической системы тепловизионного прибора.

3. Определены схемы построения оптических систем, при использовании которых возможно создание пассивно атермализованной оптической системы тепловизионного прибора.

Практическая ценность заключается в следующем:

1. Предложена методика расчета тепловизионного тракта, которая позволяет сократить время на проектирование многокомпонентной атермализованной оптической системы тепловизионного прибора.

2. Предложена методика выполнения сравнительной оценки тепловизионных приборов по геометрическому и энергетическому разрешению, которая требует минимум параметров для расчета и дает результаты, приближенные к реальным значениям.

3. Предложены базовые оптические схемы пассивно атермализованных оптических систем тепловизионных приборов с возможностью оптимизации параметров под заданные техническим заданием значения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Критерий оценки влияния термических аберраций на оптическую систему тепловизионного прибора, основанный на применении принципа таутохронности. В качестве оценки выполнения принципа таутохронности предложено контролировать изменение оптической разности хода лучей при изменении температуры.

2. Метод выбора материалов оптических элементов для пассивной атермализации многокомпонентной оптической системы тепловизионного прибора, который основан на применении компонента из материала с отрицательным температурным коэффициентом изменения показателя преломления в комбинации с компонентами из материалов с малым показателем дисперсии и с большим значением показателя преломления.

3. Схемы построения оптических систем для создания многокомпонентных пассивно атермализованных тепловизионных систем, в которых минимизировано влияние аберраций на ход лучей, что позволяет получить высокое качество изображения.

Методологической и теоретической основой работы послужили методы математической статистики и математического моделирования с применением ЭВМ, физического моделирования в лабораторных условиях, теория проектирования оптико-электронных систем, теория оптических систем, теория аберраций и дифракционного формирования оптического изображения, теория вероятностей.

Достоверность теоретических положений подтверждена результатами расчетов в программе оптического моделирования.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы при проектировании изделий ОАО «КБП», что отражено в акте внедрения результатов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- XI Всероссийская научно-техническая конференция «Техника XXI века глазами молодых ученых и инженеров» ТулГУ. – Тула, 2012г.
- Региональный конкурс «Тульские мастера» ТулГУ. – Тула, 2012г.
- Региональный форум «Инженеры будущего» СоюзМаш России. – г. Уфа, 2013г.

Публикации результатов. Содержание результатов диссертационной работы отражено в 6 печатных работах, в том числе 3 в периодическом издании, рекомендованном ВАК, и патенте на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 109 страницах машинописного текста, включающих в себя 46 рисунков, 21 таблицу и приложения на 3 листах, а также список использованной литературы из 99 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении к диссертационной работы отражена актуальность работы, обозначены объект, предмет, методы и задачи исследования, дана общая характеристика работы, определены общие положения, выносимые на защиту, а также отмечена научная новизна полученных результатов.

В первой главе дано определение тепловизионного прибора как объекта исследования, показана необходимость решения задачи пассивной атермализации тепловизионного прибора и проведен анализ существующих методов расчета смещения фокальной плоскости под воздействием температуры, рассмотрены недостатки представленных методов.

Обобщенная структурная схема информационно-измерительной системы, составной частью которой является тепловизионный прибор, приведена на Рисунке 1.

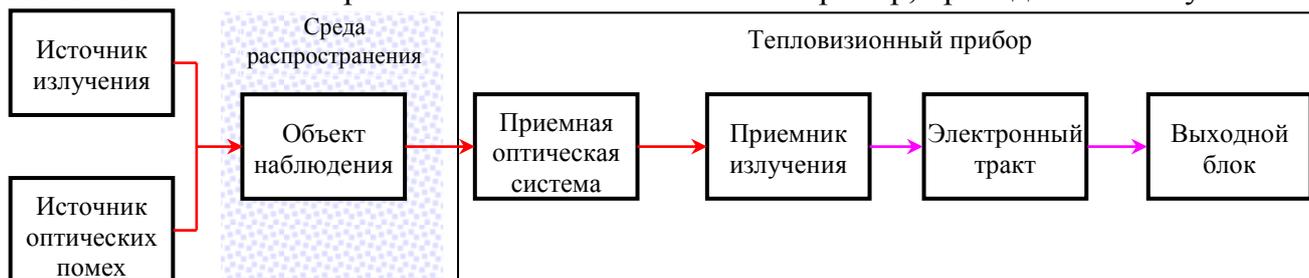


Рисунок 1. Структурная схема информационно-измерительной системы на базе тепловизионного прибора.

Тепловизионными приборами (ТПВП) называются оптико-электронные приборы, которые работают в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне длин волн и преобразовывают энергию теплового излучения целей в электрические сигналы. Различают наблюдательные и измерительные ТПВП. Тепловизионный наблюдательный прибор – оптико-электронный прибор, предназначенный для бесконтактного (дистанционного) наблюдения, измерения и регистрации пространственного/пространственно-временного распределения радиационной температуры объектов, находящихся в поле зрения прибора. Тепловизионный измерительный прибор, кроме перечисленного, формирует временную последовательность изображений и определяет температуры поверхности объекта по известным коэффициентам излучения и параметрам съемки (температура окружающей среды, пропускание атмосферы, дистанция наблюдения и т.п.).

Дальность действия ТПВП увеличивается при увеличении теплового контраста цели, который определяется разностью энергии излучения цели и окружающего фона. Дальность действия также зависит от температуры и площади излучающей поверхности цели и фона, чувствительности приемного устройства и метеорологической дальности видимости (МДВ), и колеблется от нескольких

километров до десятков километров. К достоинствам тепловизионных приборов можно отнести возможность их применения в любое время суток. Недостатком является малая информативность изображения из-за невысокой разрешающей способности тепловизионных систем, по сравнению с телевизионными. Условно ИК-диапазон можно разделить на три рабочих области, совпадающих с окнами прозрачности атмосферы:

- ближний инфракрасный диапазон длин волн (1-2 мкм);
- средний инфракрасный диапазон длин волн (3-5 мкм);
- дальний инфракрасный диапазон длин волн (8-14 мкм).

В данной работе рассмотрены тепловизионные приборы, работающие в среднем и дальнем ИК-диапазоне длин волн. Их проектирование имеет свои особенности, обусловленные, например, такими факторами, как различные наборы оптических материалов и типы приемников излучения. Эти особенности выдвигают ряд требований к конструкции оптической системы (ОС), которые должны учитываться при проектировании ТПВП, и изложены в диссертационной работе.

Поскольку задача атермализации ОС известна давно, на данный момент существует несколько способов ее решения: активный (использование управляемого перемещения элементов относительно оптической оси) и пассивный (использование комбинации материалов оправ оптических элементов и их корпусов, применение дифракционных элементов, выбор комбинации различных типов материалов для изготовления оптических элементов).

Наибольшее количество дополнительных возможностей и стабильность характеристик при изменении температуры дают способы активной атермализации. И в системах, для которых согласно техническому заданию предусмотрено наличие обратной связи в контуре управления, способы активной атермализации являются естественным выбором. Однако для ТПВП, в которых обратная связь отсутствует или время работы системы ограничено в малых пределах, введение способов активной атермализации является необоснованным увеличением сложности, габаритов, массы и стоимости конструкции. К этой группе, прежде всего, относятся малогабаритные ТПВП, такие, например, как системы круглосуточного мониторинга или оповещения, оптические координаторы для головок самонаведения (ГСН) или беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В этом случае, наибольшими преимуществами обладают способы пассивной атермализации ОС путем подбора оптических материалов или применения дифракционных элементов, позволяющие избежать усложнения конструкции и увеличения массогабаритных параметров системы в целом. Однако использование дифракционных элементов помимо высокой стоимости изготовления обладает рядом недостатков, среди которых можно выделить как наиболее значимые: снижение передаваемой энергии за счет потерь на краях дифракционных элементов и высокие требования к допускам на установку элемента при сборке. Компенсация перемещения фокальной плоскости ОС подбором материалов линз подобных недостатков не имеет и является, по мнению автора, наилучшим вариантом устранения термических аберраций, который и будет подробно рассмотрен в данной работе.

Г.Г. Слюсаревым было предложено для исправления термических аберраций в видимом диапазоне подбирать сорта стекол так, чтобы их коэффициенты термооптической постоянной (V) были пропорциональны коэффициентам Аббе (ν).

Действительно, в видимом диапазоне все стекла значительно отличаются друг от друга по своим характеристикам, что позволяет комбинировать множество сортов

для выполнения указанного условия. Но в случае, когда набор оптических материалов не обладает большой вариативностью, что характерно для среднего и (особенно) дальнего инфракрасного диапазонов длин волн, даже приближенное выполнение условия пропорциональности не позволяет компенсировать термические aberrации.

Дж. Райсес в своей работе предлагает графо-аналитический метод выбора оптических материалов, основанный на одновременном обеспечении условий ахроматизации и атермализации трехкомпонентной оптической системы ТПВП. Для этого необходимо составить график, на котором в ортогональной системе координат (V, θ) откладываются точки, соответствующие значениям коэффициента термооптической постоянной материала по оси абсцисс и значениям произведения коэффициента Аббе на коэффициент термооптической постоянной материала по оси ординат (θ) . Сам метод заключается в том, что для трехкомпонентной системы оптимальный результат достигается в том случае, если треугольник, образованный при соединении прямыми линиями точек (V, θ) , соответствующих материалам, из которых изготовлены линзы, будет иметь наибольшую площадь.

Однако данный метод представляет только одно решение задачи и не выявляет всех возможных комбинаций материалов. На Рисунке 2 представлен график (V, θ) показателей материалов для дальнего инфракрасного диапазона длин волн. Как следует из приведенного графика, система из германия, селенида цинка и КРС-5 (ограниченная треугольником №1) должна обладать наилучшей температурной стабильностью.

Но проведенные расчеты аналогичной системы показывают, что вариант ОС из арсенида галлия, сульфида цинка и бромида цезия (ограничен треугольником №2) обладает схожими параметрами в том же диапазоне рабочих температур, хотя имеет гораздо меньшую площадь фигуры.

Приведенный пример демонстрирует ряд недостатков данного метода. Во первых, графо-аналитический метод дает только одно решение задачи и не учитывает всех его возможных вариантов. Во вторых, поскольку решение можно получить только для триплета, метод не применим к проектированию многокомпонентных систем.

Учитывая вышесказанное, можно заключить, что существующим методам исправления термических aberrаций присущ ряд недостатков и ограничений,

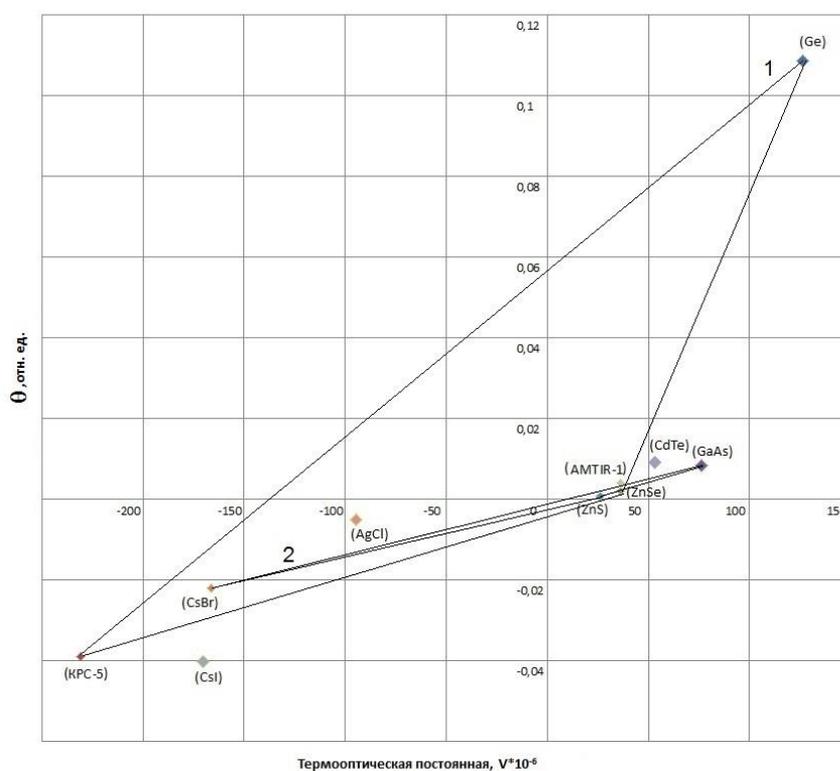


Рисунок 2. График (V, θ) показателей оптических материалов для дальнего инфракрасного диапазона длин волн

которые значительно усложняют проектирование атермализованных многокомпонентных тепловизионных систем.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с решением задачи атермализации оптической системы. В качестве критерия оценки влияния термических aberrаций на оптическую систему рассмотрен принцип таутохронности, предложена математическая модель его расчета и обоснована целесообразность его применения. Рассмотрены свойства оптических материалов для дальнего и ближнего ИК-диапазона длин волн и проведен анализ характеристик современных матричных приемников излучения (МПИ).

Из приведенных в диссертационной работе данных по оптическим материалам следует, что необходимо использовать материалы с большим коэффициентом преломления и небольшой дисперсией в комбинации с материалами с высокой дисперсией для создания пассивно атермализованной ОС с малыми хроматическими aberrациями.

Согласно приведенным в диссертационной работе данным по характеристикам современных МПИ, размер пикселя приемника излучения для диапазона 3 – 5 мкм равен 15 – 20 мкм, а для диапазона 8 – 14 мкм он составляет 17 – 25 мкм. Это, в частности, означает, что проектируемая оптическая система должна обладать хорошей aberrационной коррекцией, поскольку в случае, когда длина волны сопоставима с размером пикселя, большое влияние на качество изображения оказывает явление дифракции.

Учет условия таутохронности при расчетах, основанных на вычислении функции рассеяния точки (ФРТ) и модуля оптической передаточной функции (МПФ), позволяет оценить влияние термических aberrаций на ход лучей в оптической системе, которая строит изображение на чувствительной поверхности приемника излучения с минимальными aberrациями в нормальных условиях. Обычно, строгого выполнения условия таутохронности достичь не удастся, поэтому условно к его соблюдению приравнивают случаи, когда оптическая разность хода лучей не превышает величины определенного предела Δ .

Учитывая, что наибольшее влияние на качество изображения окажет дифракция, допуск на предельные значения возможной оптической разности хода лучей (Δ_{np}), при которых не произойдет значительного ухудшения изображения при изменении температуры, должен быть весьма строгим. Для его определения воспользуемся формулой Марешаля, которая позволяет рассчитать число Штреля (St) для оптической системы:

$$St = \frac{h(0)}{h_0(0)} \approx 1 - 4 \pi^2 [\overline{W^2} - (\overline{W})^2], \quad (1)$$

где $h_0(0)$ – значение ФРТ в ее максимуме при отсутствии aberrаций, а $h(0)$ – при их наличии, \overline{W} – среднее значение волновой aberrации по зрачку, а $\overline{W^2}$ – средний квадрат волновой aberrации, при этом разность $[\overline{W^2} - (\overline{W})^2]$ будет определять дисперсию волновой aberrации по зрачку. Учитывая, что средний квадрат деформации волнового фронта равен корню квадратному из дисперсии волновой aberrации, можно определить допуск на него для определенного значения числа Штреля. Таким образом, для значения $St \geq 0,8$ (т.е. полагая, что ОС практически не подвержена влиянию aberrаций) из выражения (1) получим:

$$\Delta_{np} \leq 0,071 \cdot \lambda. \quad (2)$$

Сами же значения среднеквадратичного отклонения (с.к.о.) оптической разности хода лучей (σ) можно определить по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

где x_i – i -ое значение оптической разности хода осевого луча с внеосевым, n – количество внеосевых лучей, а \bar{x} – среднее арифметическое значений оптической разности хода осевого луча с внеосевыми.

Оценим действенность разработанного критерия. Для этого рассмотрим две оптические системы ТПВП, обеспечивающие высокое качество изображения в нормальных условиях, при том, что первая является неатермализованной, а у второй влияние термических аберраций компенсировано методом подбора материалов, описанным в Главе 3.

На Рисунке 3 представлено изменение с.к.о. оптической разности хода лучей σ в зависимости от значений температуры для центра поля зрения первой системы, а на Рисунке 4 – для центра поля зрения второй (пассивно атермализованной) ОС.

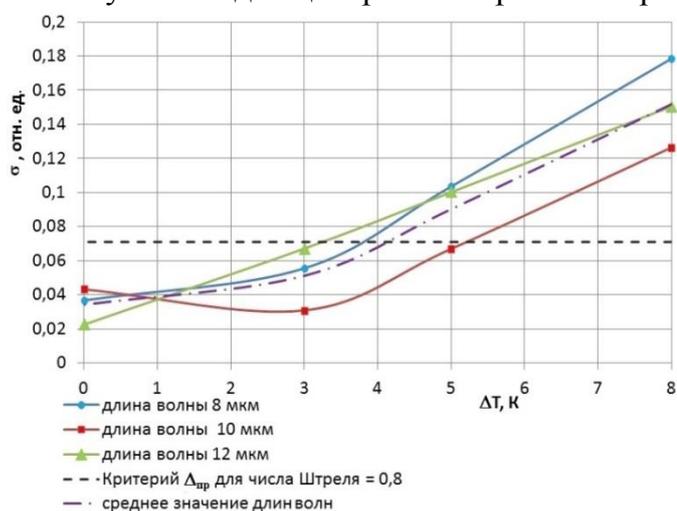


Рисунок 3. График изменения с.к.о. оптической разности хода лучей σ в зависимости от изменения температуры ΔT для неатермализованной системы

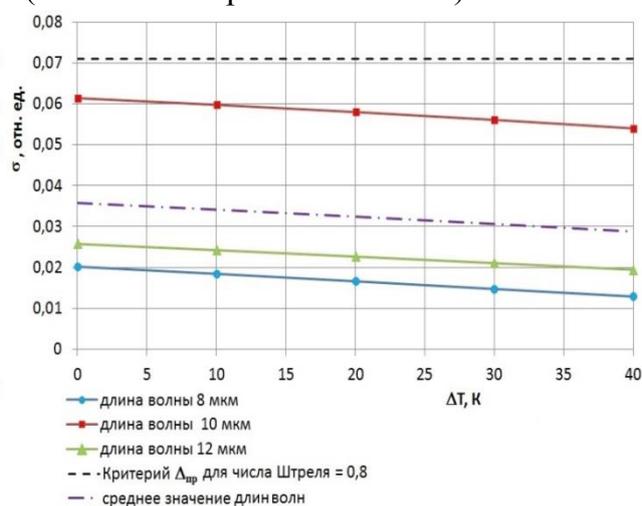


Рисунок 4. График изменения с.к.о. оптической разности хода лучей σ в зависимости от изменения температуры ΔT для атермализованной системы

Как следует из Рисунка 3, значения с.к.о. оптической разности хода лучей σ находятся в пределах обозначенного допуска при изменении температуры всего на несколько единиц градусов, тогда как графики с.к.о. оптической разности хода лучей σ на Рисунке 4 демонстрируют стабильность значений в пределах выбранного критерия $\Delta_{пр} = 0,071 \cdot \lambda$ в широком диапазоне температур. Приведенный пример доказывает целесообразность применения условия таутохронности для оценки оптических систем ТПВП на подверженность влиянию термических аберраций.

В третьей главе проведен анализ характера влияния составляющих термооптической постоянной на выполнение условия таутохронности, разработана методика расчета ТПВП, применение которой позволяет минимизировать время на создание атермализованной многокомпонентной оптической системы тепловизионного прибора. Определены варианты оптических схем, при использовании которых возможно построение пассивно атермализованных ТПВП, а также сформулированы рекомендации по проектированию тепловизионных приборов.

Рассмотрим графики изменения оптической разности хода лучей в зависимости от их удаленности от оптической оси для линз со световым диаметром 50 мм и фокусным расстоянием 100 мм, выполненных из различных материалов. Для этого построим график оптической разности хода лучей при нормальной температуре +20 °С, потом аналогичный график при температуре +10 °С с учетом обеих составляющих термооптической постоянной: коэффициентов температурного коэффициента изменения показателя преломления (β) и температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Далее, построим график оптической разности хода лучей для линзы при температуре +10 °С без учета влияния температурного коэффициента изменения показателя преломления, затем – без учета влияния ТКЛР. Для наглядной иллюстрации выявленных изменений полученные данные изобразим на обобщенном графике, где по вертикальной оси будем откладывать значения оптической разности хода осевого луча с внеосевыми Δ в нормированных координатах относительно длины волны, а по горизонтальной - нормированные координаты чувствительной поверхности МПИ от минус 1 до +1, расположенной в фокальной плоскости ОС.

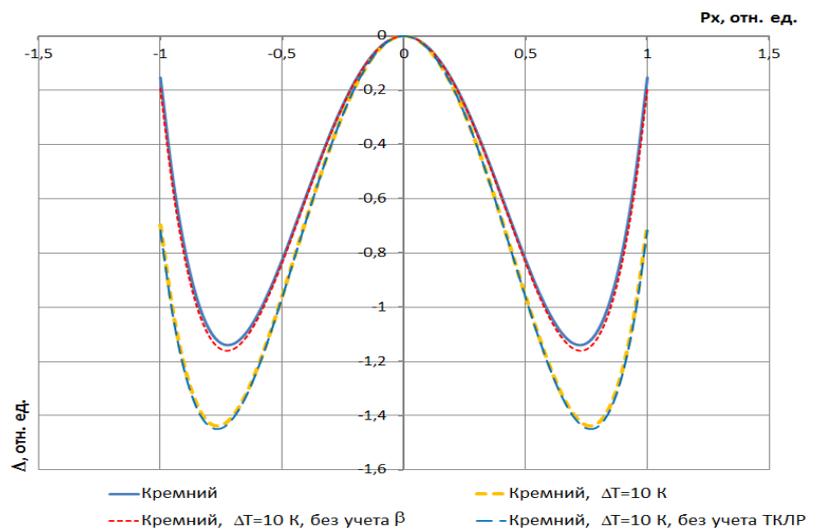


Рисунок 5. График оптической разности хода лучей в линзе из кремния для длины волны 4 мкм.

На Рисунках 5 – 7 представлены графики оптической разности хода лучей для длины волны 4 мкм, построенные для линз из кремния, германия и КРС-5 соответственно.

Из представленных графиков видно, что такие материалы, как германий и кремний, имеющие небольшое значение ТКЛР по сравнению с β , имеют большую подверженность термическим aberrациям от температурного коэффициента изменения показателя преломления. В то время у материалов, схожих по типу с КРС-5, которые имеют сопоставимые значения ТКЛР и β , указанные коэффициенты в пропорциональной доле влияют на подверженность линзы термическим aberrациям.

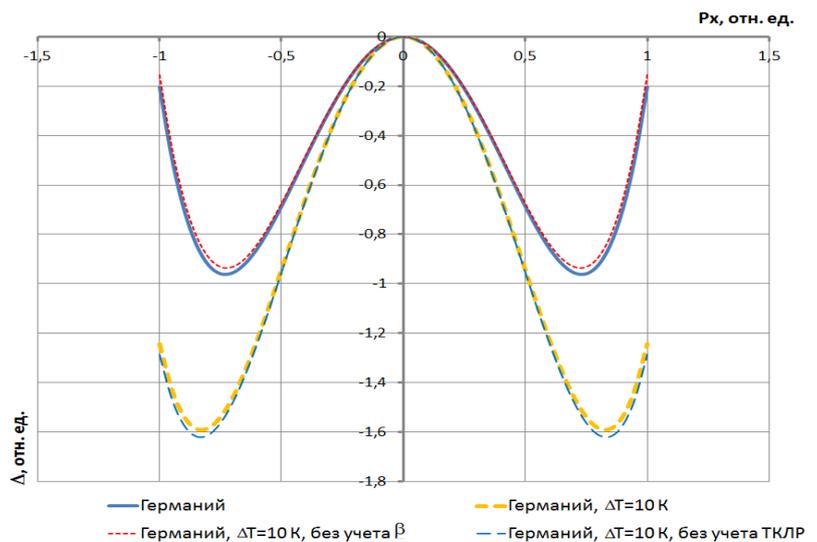


Рисунок 6. График оптической разности хода лучей в линзе из германия для длины волны 4 мкм

Аналогичная картина складывается для линз, работающих в дальнем ИК-диапазоне длин волн. Поэтому при выборе материалов для атермализации необходимо учитывать одинаковую природу возникновения термических aberrаций, т.е. для упрощения расчетов стараться использовать материалы, у которых влияние на ход лучей в большей мере обусловлено температурным коэффициентом изменения показателя преломления.

Стоит отметить, что представленные графики также наглядно демонстрируют каким образом оптические элементы с отрицательным значением коэффициента β материала могут быть использованы в качестве компенсатора термических aberrаций. В то время как на графиках для линз из кремния и германия значения оптической разности хода лучей при понижении температуры смещаются вниз вдоль оси Δ , на графиках для линз из КРС-5 заметно их смещение вверх вдоль оси Δ . При этом, смещение для КРС-5 значительно больше, чем для кремния и германия и в среднем, и в дальнем ИК-диапазонах длин волн.

Поэтому, чтобы упростить расчет на создание атермализованной многокомпонентной оптической системы ТПВП, следует придерживаться следующего метода:

– Для спектрального диапазона 8 – 14 мкм в качестве первого элемента используют положительную линзу, выполненную из материала с большим значением показателя преломления. В качестве второго – положительную (очень редко – отрицательную) линзу из материала с отрицательным температурным коэффициентом изменения показателя преломления β . В качестве третьего элемента используют отрицательную линзу либо из материала с малым показателем дисперсии, либо из материала с большим значением показателя преломления (часто отличного от первого материала). При необходимости введения большего количества компонентов системы для борьбы с aberrациями, условие для третьего элемента возможно распространить и на четвертый, а в качестве пятого ввести линзу из материала с отрицательным β или из материала с малым показателем дисперсии. При этом в качестве материалов для элементов с большой оптической силой следует выбирать те, у которых значительное влияние на изменение хода лучей под воздействием температуры вызвано одной составляющей термооптической постоянной (т.е. значением коэффициента β). Таким образом второй и третий элементы будут работать как оптические компенсаторы температуры: второй – за счет отрицательного значения коэффициента β , а третий – за счет отрицательного значения оптической силы (Рисунок 8).

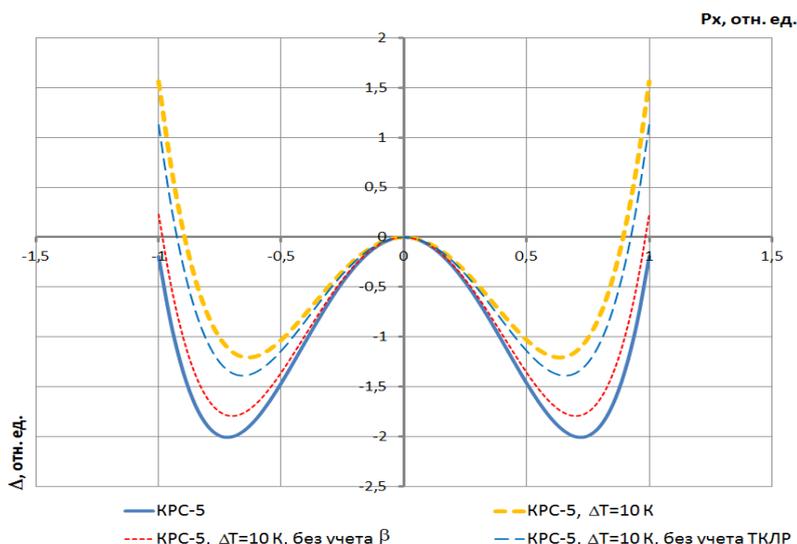


Рисунок 7. График оптической разности хода лучей в линзе из КРС-5 для длины волны 4 мкм

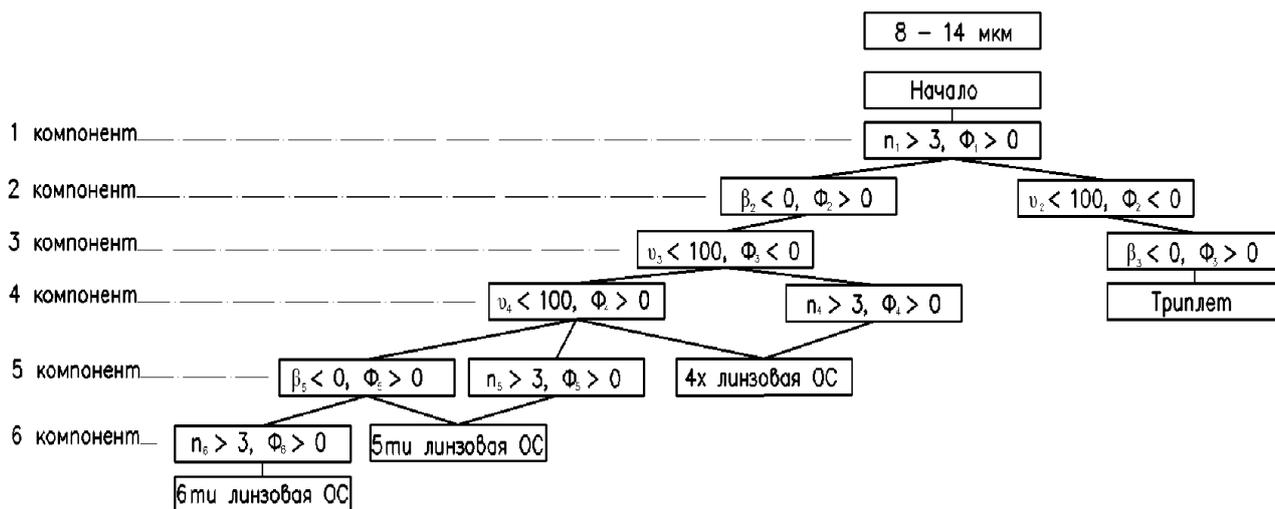


Рисунок 8. Графическое представление метода выбора материалов для диапазона 8 – 14 мкм

– Для спектрального диапазона 3 – 5 мкм действенной является другая конфигурация (Рисунок 9). В качестве первого компонента используют положительную линзу, выполненную из материала с большим значением показателя преломления. В качестве второго компонента – отрицательную линзу, выполненную также из материала с большим значением показателя преломления. В качестве третьего компонента используют положительную линзу из материала с отрицательным температурным коэффициентом изменения показателя преломления β или из материала с меньшим значением коэффициента преломления и большим показателем дисперсии, чем у материала второго компонента. При необходимости введения большего количества компонентов системы, в качестве четвертого элемента можно использовать положительную линзу из материала с температурным коэффициентом изменения показателя преломления β больше нуля, а в качестве пятого элемента – положительную линзу из материала либо с $\beta < 0$, либо с большим показателем преломления. При этом в качестве материалов для элементов с большой оптической силой следует выбирать те, у которых значительное влияние на изменение хода лучей под воздействием температуры вызвано одной составляющей термооптической постоянной (т.е. значением коэффициента β). В этом случае, второй и третий элементы будут работать как оптические компенсаторы температуры: второй – за счет отрицательного значения оптической силы, а третий за счет отрицательного значения коэффициента β .

В Таблице 1 представлены варианты оптических схем для среднего и дальнего ИК-диапазонов длин волн, полученные в соответствии с предложенным методом. Полученные тепловизионные системы являются пассивно атермализованными и обеспечивают построение изображения высокого качества на чувствительной поверхности матричного приемника излучения в широком диапазоне температур.

Рекомендации для линзовой системы также применимы и для проектирования линзовой составляющей зеркально-линзовой системы.

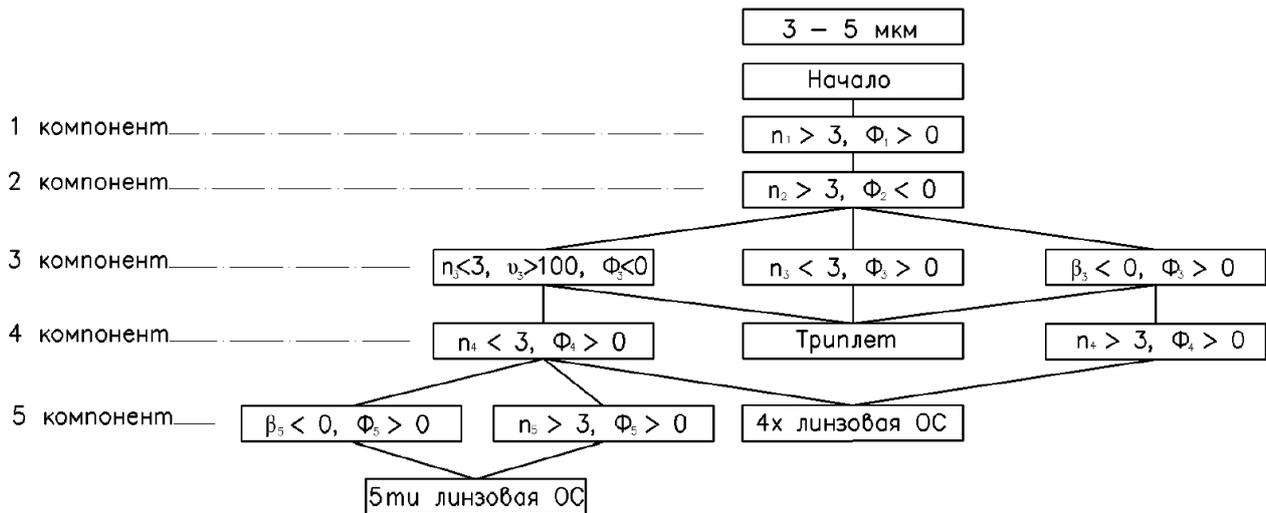


Рисунок 9. Графическое представление метода выбора материалов для диапазона 3 – 5 мкм

Таблица 1. Варианты оптических схем для обеспечения пассивной атермализации ОС ТПВП

Спектральный диапазон, мкм	Варианты материалов *	Конфигурация знаков оптических сил компонентов
3 – 5	Si / Ge / KPC-5	+ / - / +
	Si / Ge / ZnSe	+ / - / +
	Si / Ge / ZnSe / Si	+ / - / + / +
	Si / Ge / ZnS	+ / - / +
	Si / Ge / AgCl	+ / - / +
8 – 14	Ge / ZnSe / KPC-5	+ / - / +
	Ge / KPC-5 / ZnSe / Ge	+ / + / - / +
	GaAs / KPC-5 / ZnS / GaAs	+ / + / - / +
	GaAs / CsBr / ZnS / GaAs	+ / + / - / +
	GaAs / AgCl / ZnS / ZnS / GaAs	+ / + / - / - / +

* - как правило, атермализацию ОС дает комбинация из первых трех материалов, однако, для уменьшения хроматических, сферических и полевых aberrаций (т.е. уменьшения размеров aberrационного кружка рассеяния) следует использовать весь набор указанных материалов.

Также в диссертационной работе предложена методика выполнения сравнительной оценки параметров ТПВП по геометрическому и энергетическому разрешению, которая использует минимальное количество известных параметров. Для сравнения отношения сигнал/шум двух ТПВП предложено использовать формулу

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = k \cdot k_D \cdot \frac{\mu_1 \cdot K_2^2}{\mu_2 \cdot K_1^2} = 1, \quad (4)$$

Где η – отношение сигнал/шум, $k = \tau_{01} / \tau_{02}$ – коэффициент подобия пропускания оптической системы, $k_D = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_1^*(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_2^*(\lambda) d\lambda$ – коэффициент подобия удельной обнаружительной способности МПИ, а $K = f' / D$ – диафрагменное число первого и второго ТПВП соответственно.

Достоверность предложенной формулы проверена экспериментом. Его суть заключалась в оценке изменения отношения сигнал/шум ТПВП с фокусным расстоянием 100 мм и МПИ формата 640x480 с размером пикселя 17 мкм при различных значениях относительного отверстия оптической системы.

На Рисунке 10 представлены графики изменения отношения сигнал/шум (η_1 / η_2) в зависимости от значений относительного отверстия D/f' . При этом η_1 соответствует отношению сигнал/шум для относительного отверстия равного 1, а η_2 – для измененного относительного отверстия.

Как следует из представленного графика расхождение в значениях измеренных и расчетных значений отношения сигнал/шум невелико, поэтому предложенная формула применима для проведения сравнительной оценки значений сигнал/шум двух ТПВП.

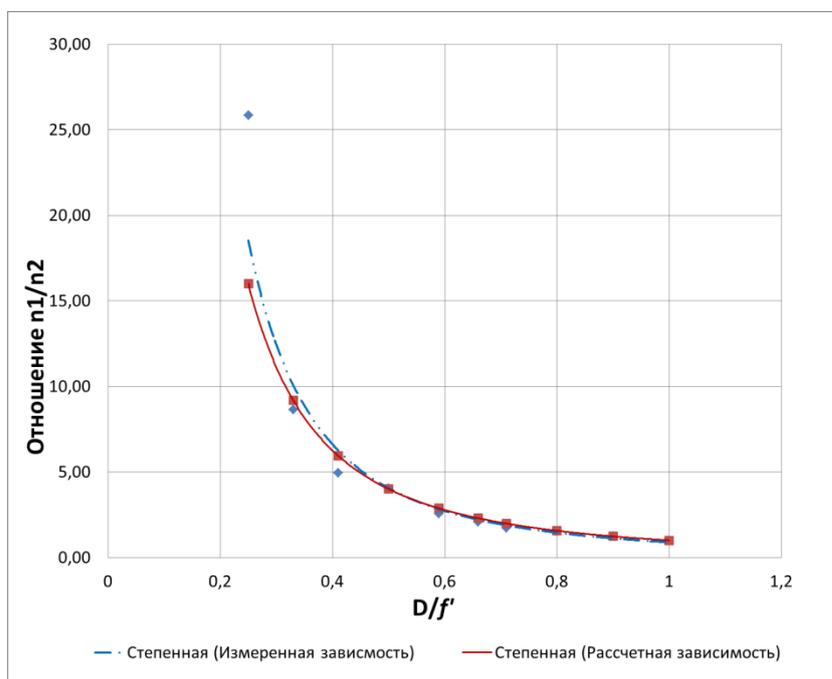


Рисунок 10. Графики зависимости отношения сигнал/шум (η_1 / η_2) от значений относительного отверстия ОС ТПВП

В главе четыре приведены модели пассивно атермализованных оптических систем ТПВП, спроектированных при помощи варианты оптических схем, которые были представлены в Главе 3. Расчет производился в программе оптического моделирования для отношения $D/f' \approx 1$, поскольку в этом случае возможно применение как охлаждаемых, так и неохлаждаемых матричных приемников излучения. При необходимости отношение D/f' может быть увеличено или уменьшено без значительных усилий. В качестве материала оправ и корпуса оптических элементов для всех случаев выбран титан, однако, реализация представленных ОС возможна и на базе других стандартных материалов, используемых в приборостроении, при незначительной корректировке радиусов линз и расстояний между ними.

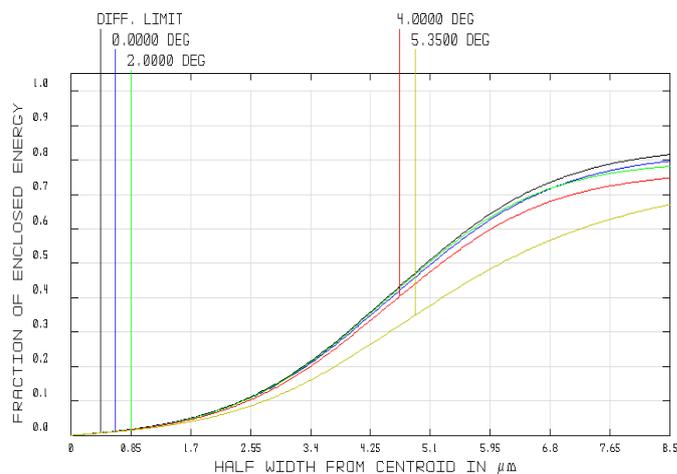
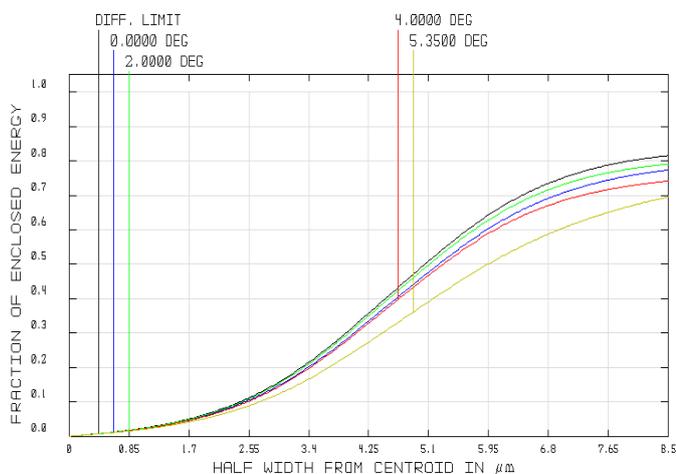
В приведенных моделях ОС ТПВП минимизировано влияние аберраций при построении изображения, отсутствуют асферические поверхности. Полученные варианты ОС ТПВП отличаются простотой изготовления, сборки и юстировки, а их значения модуля передаточной функции и концентрации передаваемой энергии близки к дифракционному максимуму. При незначительном падении концентрации энергии обеспечивается работоспособность приведенных оптических систем в диапазоне температур $\pm 50^\circ$.

На Рисунках 11 и 12 представлены графики модуля передаточной функции и функции рассеяния точки для приведенного примера оптической схемы атермализованной ОС для диапазона 8 – 14 мкм (Таблица 2).

Данные по изменению значения с.к.о. оптической разности хода лучей (σ) приведены в виде среднего арифметического значения Δ_{cp} , в расчет которого вошли значения σ по центру и краю поля зрения при нормальной, минимальной и максимальной температуре, измеренные для основной длины волны, соответствующей середине выбранного спектрального диапазона.

Таблица 2. Характеристики объектива из германия, КРС-5 и селенида цинка

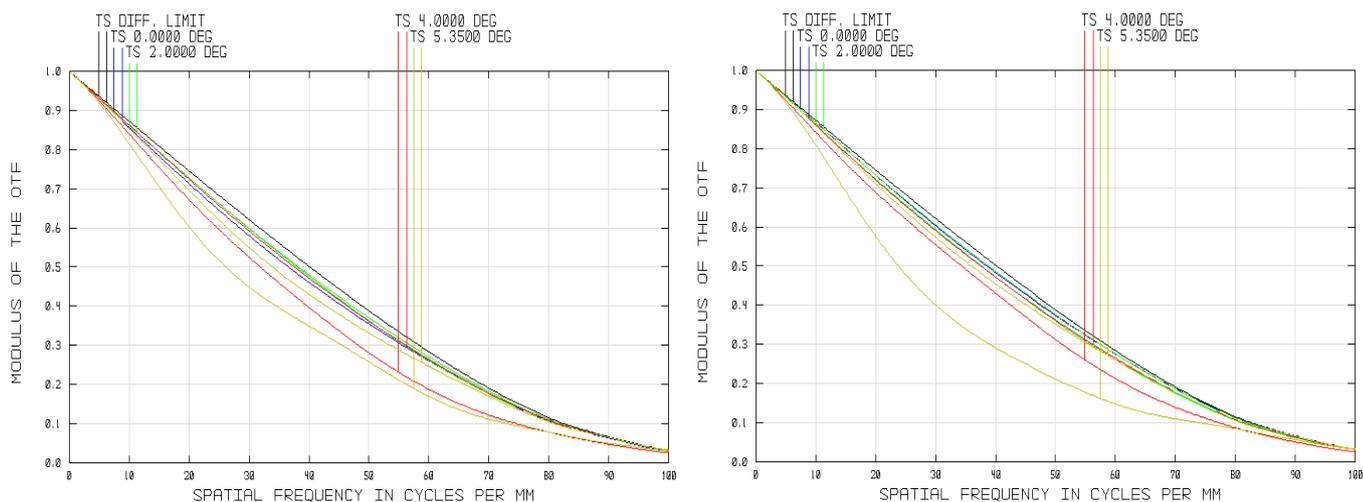
Материал линз	Фокусное расстояние системы, мм	Относительное отверстие $D_{вх}/f'$	Полный угол поля зрения, 2ω , °	Δ_{cp}	Толщина (длина между линзами), мм	Радиус кривизны, мм	Фокусное расстояние элемента, мм
Германий	60	1 : 1	$\pm 5,35$	0,065	6	72,27	120,24
					(13)	84,72	
КРС-5					6	52,93	129,34
					(13)	70,52	
Селенид цинка					7	132,06	-113,44
					(27,28)	70,02	
Германий	3,5	21,44	45,41				
	9,54	22,32					



а)

б)

Рисунок 11. График значений функции рассеяния точки ОС из германия, КРС-5 и селенида цинка в диапазоне 8 – 14 мкм: а – при температуре -50°C, б – при +50 °C



a)

б)

Рисунок 12. График значений модуля передаточной функции ОС из германия, КРС-5 и селенида цинка в диапазоне 8 – 14 мкм: а – при температуре -50°C , б – при $+50^{\circ}\text{C}$

О достоверности результатов свидетельствует и то, что на основании исследований, проведенных для выполнения данной диссертационной работы, в соавторстве был получен патент РФ №2506616 на изобретение «Светосильный объектив ИК-области», а также в коллективе авторов подана заявка на патент «Метод пассивной атермализации ИК-объектива».

В заключении сформулированы основные теоритические и практические результаты, полученные в ходе работы над диссертацией:

1) Проведен анализ существующих методов расчета смещения фокальной плоскости под воздействием температуры. На его основании показаны недостатки представленных методов и сделан вывод о предпочтительности расчета атермализованной оптической системы при помощи точных тригонометрических формул.

2) Предложен критерий оценки влияния термических aberrаций на оптическую систему тепловизионного прибора, основанный на применении принципа таутохронности, предложена математическая модель его расчета и обоснована целесообразность его применения. В качестве оценки выполнения принципа таутохронности предложено использовать изменение оптической разности хода лучей в зависимости от температуры.

3) Изучены свойства оптических материалов, показаны различия в их характере пропускания длин волн дальнего и среднего ИК-диапазона, показана возможность использования материалов с отрицательным температурным коэффициентом изменения показателя преломления и сформулированы рекомендации по учету разницы расчетных и реальных значений показателя преломления при проектировании ТПВП.

4) Проведен обзор применения матричных приемников излучения и анализ характеристик современных МПИ и сформулированы исходные данные для расчета и оценки атермализованной оптической системы тепловизионного прибора.

5) Изучен характер влияния составляющих термооптической постоянной на выполнение условия таутохронности при изменении температуры, что позволило предложить применение материалов с отрицательным температурным

коэффициентом изменения показателя преломления в качестве пассивных оптических компенсаторов термических аберраций.

6) Предложен метод выбора материалов оптических элементов для пассивной атермализации многокомпонентной оптической системы тепловизионного прибора. На его основе разработана и представлена методика расчета ТПВП, применение которой позволяет минимизировать время на создание атермализованной многокомпонентной оптической системы тепловизионного прибора, что подтверждено результатами расчетов в среде оптического моделирования. Сформулированы рекомендации по проектированию тепловизионных приборов.

7) Определены оптические схемы, при использовании которых возможно построение пассивно атермализованных ТПВП для работ в среднем и дальнем ИК-диапазоне длин волн.

8) Предложена методика выполнения сравнительной оценки параметров ТПВП по геометрическому и энергетическому разрешению, которая требует минимум параметров для расчета и дает результаты, приближенные к реальным значениям, что доказано при помощи эксперимента.

9) На основании расчетов предложены базовые варианты оптических схем атермализованных ОС ТПВП для дальнего и среднего ИК-диапазонов длин волн с возможностью оптимизации параметров под заданные техническим заданием значения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Шилин А.А. Пассивная атермализация малогабаритных оптических систем в дальнем ИК-диапазоне / А.А. Шилин, С.Л. Погорельский // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. – № 7. – С. 196 – 201**

2. **Шилин А.А. Обзор пассивных оптических ГСН для поражения наземных тактических целей / А.А. Шилин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. – № 7. – С. 202 – 209**

3. **Шилин А.А. Критерий оценки влияния термических аберраций на оптическую систему тепловизионного прибора / А.А. Шилин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. – № 7. – С. 244 – 249.**

4. Шилин А.А. Реализация оптической системы малогабаритной тепловой пассивной головки самонаведения на основе неохлаждаемой микроболометрической матрицы / А.А. Шилин // Сборник материалов XI Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов» – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012г.–С. 79 – 85.

5. Шилин А.А. Пассивная атермализация оптической системы тепловизионного прибора / А.А. Шилин, С.Л. Погорельский // Системы ВТО. Создание, применение и перспективы. – Тула: изд-во ОАО «КБП», 2014. – №2. – с. 102 - 108.

6. Патент РФ №2506616 на изобретение «Светосильный объектив ИК-области», МПК⁹G02B13/14;G02B9/34, авторов Шилина А.А., Погорельского С.Л., Бушмелева Н.И., Просвирнова Р.А. Заявка подана 17 июля 2012г., зарег. 10 февраля 2014г., патентообладатель ОАО «КБП».