

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 681.7(075.8)+535.31

**АРТЮХИНА
НИНА КОНСТАНТИНОВНА**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЗЕРКАЛЬНЫХ
АНАСТИГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук
по специальности 05.11.07 –
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Минск, 2012 г.

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный консультант

Шкадаревич Алексей Петрович,

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, директор научно-технического центра «ЛЭМТ» БелОМО

Официальные оппоненты:

Кухарчик Петр Дмитриевич,

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, ректор Белорусского государственного педагогического университета им. М. Танка;

Аваков Сергей Мирзоевич,

доктор технических наук, директор НП РУП КБТЭМ-ОМО;

Беляев Борис Илларионович,

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом аэрокосмических исследований НИИ прикладных физических проблем им. А.И Севченко Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация

Белорусский государственный университет

Защита состоится **29 июня 2012 г.** в 14¹⁵ часов на заседании совета по защите диссертаций Д02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете (220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, кор. 1, ауд.202).

Тел. ученого секретаря (8017) 2930717; e-mail: aantoshyn@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан _____ мая 2012 года

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций

кандидат физико-математических наук, доцент

А.А. Антошин

Репозиторий БНТУ

ВВЕДЕНИЕ

Республика Беларусь относится к числу тех немногих стран, где проводятся работы по полному циклу создания оптических приборов, включая расчет оптических систем. Одним из приоритетных является направление прикладных научных исследований «Оптическое и электронное приборостроение (ОЭП), информационные технологии и системы», создающих основу дальнейшего развития высоких технологий в стране; в рамках этого направления предполагается создание новейших высокоэффективных приборов для различных областей науки и техники. В последнее десятилетие наблюдается широкое развитие «двойных» технологий: достижения ОЭП внедряются в разработки военного и гражданского применения. К основным тенденциям концептуального развития современного ОЭП относится исследование принципов моделирования и совершенствование элементной базы для практической реализации оптических приборов.

Актуальность проблемы моделирования и разработки зеркальных систем определена возможностью использования их в широком спектральном диапазоне из-за отсутствия хроматических aberrаций, потенциальной возможностью увеличения апертуры, сокращения габаритов, снижения весовых характеристик, а также рядом других достоинств. Астрономическая оптика, космическая геодезия, аэрокосмический мониторинг Земли и околоземного пространства, УФ микроскопия, экология, метеорология, медицина – далеко не полный перечень областей науки и техники, где зеркальная оптика играет первостепенную роль. Область применения непрерывно расширяется: третье поколение ОЭП, основой которых являются матричные многоэлементные приемники излучения, чувствительные в двух или нескольких спектральных диапазонах, усиленно разрабатывается в последние годы; в космической оптической индустрии необходимость дальнейшего повышения линейного разрешения на поверхности Земли приводит к созданию четвертого поколения космических объективов – анастигматов-апохроматов.

Интенсивное развитие оптической отрасли требует улучшения оптических характеристик в направлении увеличения угловых полей, эффективных площадей входного зрачка, повышения качества изображения. К настоящему времени накоплен значительный потенциал по разработке и исследованию зеркальных систем, окончательный выбор схемного решения с различным числом зеркальных элементов для конкретной задачи предполагает более детальное сравнение по массогабаритным характеристикам, по степени устранения паразитных засветок, сложности контрольных схем, точностным требованиям к поверхностям, их взаимному расположению и т.д. Проведенный

комплексный анализ теоретических основ, практики расчета и изготовления выявил ряд важных проблем, касающихся габаритного и абберационного расчета зеркальных схем. Канонические схемы имеют исправленную сферическую абберацию и кому, поле зрения которых ограничено астигматизмом. Увеличение числа зеркал приводит к увеличению числа коррекционных элементов с целью получения нужного качества изображения. Недостатками современных многозеркальных систем являются большие габариты, технологические трудности изготовления сложных асферических поверхностей, значительное экранирование и виньетирование. Из-за ряда факторов, например, закрытого характера, сведения о моделях зеркальных анастигматов часто носят достаточно общий характер, не позволяя разработчику нового ОЭП воспользоваться ими.

В силу вышесказанного, развитие расчетно-методической базы для проектирования зеркальных анастигматических систем (ЗАС) различной степени сложности; в первую очередь систем с количеством зеркал более трех, проведение поиска оригинальных схем с децентрированными, изопланатическими и панкратическими элементами является актуальной задачей исследований, решение которой позволит создать комплекс новых опtotехнических подходов, направленный на оптимизацию проектирования и разработок в области ЗАС, используемых для создания широкого класса оптических и оптико-электронных приборов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006-2010 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005 г. №512: «7.6. оптические, электронные приборы и оборудование, включая лазерно-оптическое оборудование и технологии; аналитическое оборудование и приборы контроля качества и сертификации, опто-, микро- и наноэлектронные системы и устройства». Тематика диссертационной работы была включена в планы НИР Белорусского национального технического университета, утверждаемые Советом университета и согласованные с Министерством образования Республики Беларусь: ГБ 06-285 «Разработка новых лазерных материалов, перспективных зеркальных систем и технологии оборудования высокоточной обработки оптических стекол и монокристаллов» (2006–2010 гг.), «Разработка новых активных и пассивных сред твердотельных лазеров, оптико-электронных

элементов и модулей космических аппаратов, технологий обработки поверхностей аксионов и медных зеркал» (2011–2015 гг.). Диссертационная работа выполнялась в соответствии с заданиями, входящими в государственную комплексную программу научных исследований «Развитие физических основ и разработка новых оптических, лазерно-оптических и оптико-электронных приборов, систем, материалов и технологий» («Фотоника») 2006–2010 гг., а также в рамках международных проектов: НИР СПбГУ ИТМО № 15010 «Исследование особенностей взаимодействия оптического излучения с элементами лазерных систем и биологическими объектами» (2008–2009 гг.).

Цель и задачи исследования

Цель настоящей диссертационной работы – моделирование и поиск новых схем зеркальных анастигматических систем, развитие расчетно-методической базы и создание инженерно-технических методов для исследования и разработки зеркальных анастигматов, в том числе для аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), систем теплового сканирования и лазерных систем.

Достижение поставленной цели включало решение следующих *задач*:

1. Комплексный анализ схемных решений зеркальных систем для целей анастигматической коррекции и разработка последовательности и структуры моделирования ЗАС, позволяющей определить технические характеристики новых зеркальных композиций с учетом качества коррекции аберраций и сложности конструктивного решения.

2. Развитие расчетно-методической базы для исследования базовых моделей многозеркальных систем различных конфигураций: коррекционные возможности, расчеты деформаций зеркальных поверхностей, экранирование, виньетирование, использование изопланатических, панкратических и децентрированных элементов; выработка принципов использования композиционных методов с последующей компьютерной оптимизацией и подходов методологии параметрического и аберрационного расчета многозеркальных систем при разработке усовершенствованных методик моделирования ЗАС.

3. Разработка универсальной концептуальной модели аберрационного и параметрического габаритного расчета ЗАС в области Зейделя, методик синтеза и расчета базовых и коррекционных модулей, алгоритмов и программ инженерно-технических расчетов, применяемых на различных этапах проектирования оптических систем-анастигматов.

4. Исследование элементов ЗАС, разработка принципов и классификационных подходов для анализа характеристик, предельных возможностей и формулы выбора зеркальных анастигматов для создания системы отбора промышленных моделей, позволяющих получать схемные решения светосильных объективов с увеличенным полем зрения.

5. Осуществление поиска новых схемных решений в области зеркальных систем (создание план-анастигматов, анализ ЗАС из четырех зеркал с зеркальными моноблоками, анализ прямых и реверсивных двухзеркальных ЗАС с четырьмя отражениями лучей от зеркал, моделирование трехзеркальных афокальных ЗАС и объективов, создание зеркальных систем с переменными характеристиками, с изопланатическими и децентрированными элементами).

6. Проверка предложенной методологии на примерах создания новых моделей ЗАС и разработка методик технологической адаптации и комплексной оценки качества изображения, используемых при создании каталогов и архивов зеркальных систем.

Объект и предмет исследований

Объектом исследования в работе являются зеркальные системы, их качественная и количественная оценка габаритных и аберрационных параметров. *Предмет* исследований – система базовых и оптимизационных моделей, структура и содержание элементов, позволяющих улучшить оптические характеристики зеркальных анастигматических систем.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный комплекс оптотехнических подходов, направленный на оптимизацию проектирования и разработок в области ЗАС, позволяет осуществить рациональный выбор оптимальных схем построения зеркальных объективов различных конфигураций в части габаритных характеристик, центрального экранирования, использования асферических поверхностей при создании широкого класса оптико-электронной аппаратуры.

2. Разработанные алгоритмы эффективного проектирования, использующие параксиальные модели и новые условия нормировки параметрического расчета, определяемые относительными отверстиями зеркал, при учете центрального экранирования, согласования положений зрачков и габаритных ограничений, позволяют минимизировать объем расчетных работ при моделировании ЗАС; создавать перспективные базовые модели по аберрационным свойствам – с дополнительной коррекцией монохроматических аберраций: план-коррекцией (кривизны изображения) и ортоскопической

(дисторсии); по конструктивным – с удобным для исследования размещением приемника изображения.

3. Разработанные теоретические основы моделирования новых схем ЗАС, использующих деформированные несферические, децентрированные и концентрические зеркальные поверхности, обеспечивают разработку объективов-анастигматов с улучшенными габаритными соотношениями и оптическими характеристиками: полем зрения, эффективной площадью входного зрачка, качеством изображения: компактные объективы с моноблоком из первого и третьего зеркал; двухзеркальные схемы с двойным отражением от зеркал; четырехзеркальные схемы с моноблоком из первого и четвертого зеркала; трехзеркальные длиннофокусные объективы с конфигурацией, использующей «ломающие» ход лучей плоские зеркала.

4. Новые зеркальные системы, использующие в своей конфигурации только сферические поверхности, увеличивают накопленный потенциал расчетно-методической базы моделирования зеркальных систем: системы с концентрическими элементами (двухзеркальный концентрический объектив с четырьмя отражениями с вынесенной плоскостью изображения, трехзеркальный концентрический объектив с дополнительным плоским зеркалом) позволяют обеспечить высокую светосилу; двухзеркальный панкратический объектив – трехкратный перепад фокусного расстояния.

5. Новые методики, алгоритмы и программы (расчет деформаций несферических поверхностей, расчет бленд и диаграмм виньетирования, расчет зависимостей между изменениями аберраций и параксиальными характеристиками, программа интеграции Opal-Zemax, программы для расчета и корректировки нелинейного закона движения компонентов панкратических систем, алгоритм моделирования солнцезащитных бленд оптико-электронных звездных аппаратов и ряд др.) позволяют осуществлять моделирование, рациональную каталогизацию технологически адаптированных зеркальных систем.

Личный вклад соискателя

Основные положения, результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы получены соискателем самостоятельно. Автором сформулированы научные проблемы, цель работы, осуществлена постановка задач, исследованы и разработаны выносимые на защиту модели, методики, алгоритмы и закономерности. Автором диссертационной работы самостоятельно разработаны: алгоритмы; комплекс методик исследований и оценка корректности; теоретическое обоснование постановки задач; разработка концепции и методологии; классификация; выбор и построение теоретических

адаптационных моделей; анализ и оценка характеристик и обобщение полученных результатов.

Включенный в диссертационную работу материал отражает личный вклад автора в выполненных исследованиях. Часть расчетных и экспериментальных данных, программных продуктов получена в ходе работ по бюджетным и договорным НИР при участии сотрудников БНТУ, ОАО «Пеленг», ЗАО «Янсар» и других организаций. Участие автора и соавторов определено в отчетах по НИР, актах, справках и т.п.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 52-й–54-й НТК БГПА (Минск, 1997, 1999, 2000 гг.), X Республиканской НТК (Гродно, 2002 г.), VIII Республиканской НТК (Минск, 2003 г.), 3-м–6-м Международном оптическом конгрессе «Оптика XXI век», VI-й–IX-й конференциях «Прикладная оптика», международной конференции «Оптика и образование» (Санкт-Петербург, 2004, 2006, 2008, 2010 гг.), на 60-й–64-й НТК БНТУ «Новые направления развития приборостроения» (Минск, 2004–2006, 2008, 2010 гг.), 3-й, 5-й, 6-й международной НТК «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2005, 2007, 2008 гг.), VII-й, X-й международной НТК «Приборостроение: состояние и перспективы» (Киев, 2008, 2011 гг.), международной НПК «Управление инновационной деятельностью в образовании и производстве» (Минск, 2008 г.), 1-й–3-й международной НТК «Приборостроение» (Минск, 2008–2010, гг.), 2-й–4-й международной СНТК «Новые направления развития приборостроения» (Минск, 2009–2011г.г.).

Опубликованность результатов диссертации

Материалы диссертационной работы представлены в 82 публикациях, из них – 1 монография (14,1 а. л), 31 статья в журналах, входящих в Перечень ВАК (12,1 а. л.), 2 статьи в сборниках научных статей, 19 статей в сборниках материалов научных конференций, 6 учебных пособий, 12 авторских свидетельств и патентов и 11 тезисов докладов. Без соавторства опубликованы 1 монография, 12 статей в журналах, 1 статья в сборниках статей, 2 статьи в сборниках материалов научных конференций, тезисы докладов – 4.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации – 381 страница, в том числе основной текст – 199

страниц, 50 рисунков и 39 таблиц – 34 страницы; библиографический список (370 наименований, в том числе публикаций соискателя 82) – 28 страниц; 12 приложений– 120 страниц (в том числе 60 рисунков, 30 таблиц).

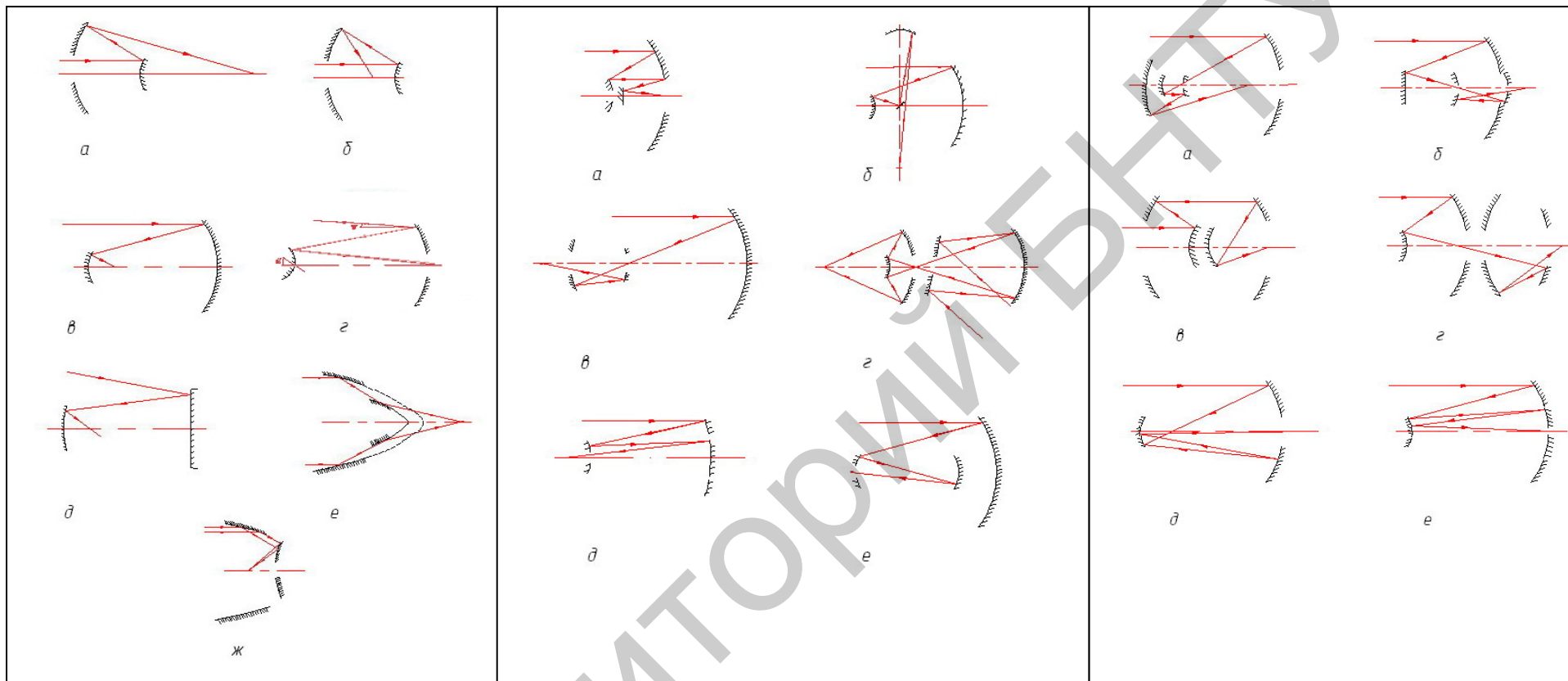
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении и общей характеристике работы дана оценка состояния научных достижений в области моделирования и разработки схем зеркальной оптики [1], определены направления развития исследований в данной области, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, описана структура работы.

Первая глава «Обзор и перспективы развития зеркальных анастигматов» посвящена анализу современных схемных решений центрированных систем–анастигматов из двух, трех и четырех зеркал, некоторых подходов к объектам исследования, определены базовые модели, определены перспективы развития [1, 21, 24, 44]. Рассмотрены системы с децентрированными, изопланатическими и панкратическими элементами. Дан аналитический обзор литературных источников по типам зеркальных схем; рассмотрение систем проведено по степени усложнения конструкции.

В разделе 1.1 рассмотрены основные принципы построения базовых классических модулей из двух зеркал, апланатические комбинации зеркал с асферическими поверхностями, где исправлены сферическая аберрация и кома, поле зрения ограничено астигматизмом. Проанализированы некоторые схемы зеркальных анастигматов (рисунок 1 а, б); показаны оригинальные решения систем, составленных с применением внеосевых, наклонных и децентрируемых зеркальных элементов. Двухзеркальные системы используются в рентгеновской технике: схема Шварцшильда (рисунок 1, в), в спектральных приборах: система Боуэна, «зеркальный Шмидт» (рисунок 1, а, д), в космической технике – предфокальный апланат Ричи-Кретьена (рисунок 1, з). Новые схемы имеют необычную асферическую форму зеркал (рисунок 1, е, ж), работают при больших углах падения лучей (до 45°) или используют planoидные элементы (рисунок 1, д), которые можно использовать как дифракционную решетку в спектрографах. Дан анализ аберрационных возможностей и оптимизации параметров двухзеркальных систем [19, 25, 29, 32, 55].

В разделе 1.2 дана структура типов, установлены принципы построения схем из трех зеркал [24]: они обладают хорошими габаритными соотношениями, но неудобным расположением приемника изображения.



a – система Боуэна; *б* – система Вине;
в – система К. Шварцшильда;
г – объектив Ричи–Кретьена;
д – система «зеркальный Шмидт»;
е, ж – объективы Т. Якушковой
Рисунок 1 – Схемы из 2-х зеркал

a – система И. Крыжановского,
 Г. Цукановой; *б* – объектив Д. Корша;
в – схема Мейнела; *г* – объектив «Тезей»;
д – объектив Рамсея-Хатта;
е – объектив Ю. Пименова
Рисунок 2 – Схемы из 3-х зеркал

a – схема В. Чуриловского, Н. Тульевой;
б – система ЛОМО;
в, г – объективы с моноблоком;
д – объектив И. Гашкина, Н. Янушко;
е – объектив Д. Корша
Рисунок 3 – Схемы из 4-х зеркал

Репозиторий БНТУ

В компактных конструкциях с моноблоком из нечетных зеркал присутствует кривизна поля, которая препятствует применению современных приемников (фотодиодных, ПЗС-матриц и линеек) – их целесообразно использовать как сканирующие (рисунок 2, а). Широкое развитие в астрографической технике получила система из трех асферических зеркал с промежуточным изображением – схема Корша (рисунок 2, б). Использование базового модуля с промежуточным изображением после первого зеркала (рисунок 2, в) позволяет создавать светосильные системы (1:2,5) с угловым полем зрения ($2\omega = 5^\circ$) с дифракционным качеством изображения в дальней ИК-области. В объективе (рисунок 2, г) 100% экранирование (возможна работа только в схеме с плоским зеркалом); удобное расположение приемника, но большие габариты ($l = 2f''$).

Установлено, что попытки улучшить оптические характеристики приводят к необходимости использования асферических профилей высокого порядка на трех зеркалах в современных разработках, при этом асферичность может достигать 0,4–0,5 мм при градиенте 10 мкм/мм [24]. Системы рассчитывают для довольно высоких оптических характеристик: $D/f' = 1: 1,8$, $2\omega = 5,4^\circ$ с качеством изображения, близким к дифракционному в видимой области спектра, но большим экранированием – линейный коэффициент $\varepsilon = 0,58$. В компактных схемах (осевая длина $l = 0,4f''$) с первым и третьим асферическими зеркалами, имеющими общую подложку (рисунок 2, д), обеспечивается угловой размер кружка рассеяния $2''$ в пределах поля $2\omega = 4^\circ$ при $D/f' = 1: 2$. Для крупногабаритной оптики перспективны системы со сферическим главным зеркалом: коррекция aberrаций осуществляется с помощью малых зеркал, имеющих асферические профили высокого порядка (рисунок 2, е). Отмечено, что эффективность увеличения оптических характеристик в новых типах ЗАС с децентрированным входным зрачком и planoидных системах невелика.

В разделе 1.3 проведен системный анализ принципов построения схем из четырех зеркал, сформулированы их характеристики; установлено, что в системах обеспечена апланатическая и анастигматическая коррекция aberrаций, удобное положение приемника изображения; недостатками могут быть большие габариты, технологические трудности изготовления сложных асферических поверхностей, значительное экранирование и виньетирование.

В области схемных решений четырехзеркальных анастигматов определены модули, обладающие увеличенным углом поля зрения и высокой светосилой, требуемые при регистрации излучения слабых и достаточно протяженных объектов [1, 3, 6, 39]. Проанализированы системы из четырех зеркал по степени усложнения конструктивного решения [21]; определён выбор исследований их возможных построений, установлено использование двухзеркальных корректоров aberrаций для классических схем (рисунок 3, а), компенсатора из

сферических зеркал с равными радиусами, афокальной насадки со сферическим главным зеркалом ($D/f' = 1:0,7$) для большого космического ИК телескопа; где три малых зеркала – асферические с очень сложной формой профилей.

Построение конфигураций многозеркальных систем с корректором полевых aberrаций (ПК) в концепции двухступенчатой оптики (ДО) дает много преимуществ: упрощает систему бленд, дает эффективную и удобную точку в схеме для размещения световых фильтров, фокальных компенсаторов, сканирующих элементов, поляризаторов, преобразователей изображения и т.д. Длиннофокусные системы по схеме ДО очень компактны, но имеют небольшие поля и светосилу, к примеру, объектив (рисунок 3, б) имеет ПК, работающий с увеличением $\beta = 6,9^x$, и характеристики: $l=0,1f'$, $2\omega=1,3^\circ$, $D/f' = 1:10$. Существуют модификации на основе базовой схемы Грегори, рассчитанные для малых полей при $D/f' = 1:2$ с зеркалами асферического профиля.

Рассмотрены перспективные варианты с моноблоком из двух зеркал (рисунок 3, в, г), выделена группа систем с разнесенными вершинами зеркал с ПК из двух зеркал, расположенным за пределами базового модуля. Компактные схемы (рисунок 3, д, е) имеют чрезвычайно короткую длину ($0,1 f'$) и удобное положение плоскости изображения. В объективе Корша с совмещенными вершинами четных и нечетных зеркал осуществлена коррекция четырех aberrаций за счет большой асферичности третьего и четвертого зеркал: пятно рассеяния имеет угловой размер менее $0'',026$ по размеру невиньетированного поля $30'$ для $D/f' = 1:13,2$, но не исправлена кривизна изображения.

В разделе 1.4 проведен анализ многозеркальных децентрированных схем. Проектирование в области децентрированных систем значительно расширилось благодаря новым способам компьютерной оптимизации; возможность реализации обусловлена применением осесимметричных и внеосевых зеркал с асферическими поверхностями высоких порядков, обеспечивающими хорошее качество изображения для высоких оптических характеристик. Установлено направление четырехзеркальных систем, которые нашли широкое применение в конфигурациях ДО, формируемых двумя частями, и которые устраняют недостаток трехзеркальных децентрированных схем расположения плоскостей предмета и изображения по одну сторону от зеркал, используя дополнительное зеркало в качестве полноценного коррекционного оптического элемента.

Попытки избавиться от асферических элементов, что особенно актуально в связи с внеосевыми зонами зеркал, приводят к увеличению количества зеркальных поверхностей в децентрированных системах (до восьми поверхностей). Дальнейшее развитие схем направлено на улучшение формы поля изображения и параметров качества за счет использования неосесимметричных поверхностей и введения смещений и наклонов зеркал.

В разделе 1.5 рассмотрены сложные и составные зеркальные системы на основе афокальных схем; зеркальные системы с переменными характеристиками, в том числе панкратические [1]. Рассмотренные системы решают некоторые нетрадиционные современные задачи оптотехники.

Во второй главе «Современное состояние методологической базы расчета зеркальных систем» выполнено исследование комплекса современных методов абберационного расчета, описывающих как алгебраические математические решения, возможные в области 3-го порядка, так и композиционные, основанные на синтезе базовых моделей и коррекционных компонентов. На основе абберационного анализа найден подход, позволяющий установить новые схемные решения с использованием наиболее рациональных черт моделирования ЗАС.

В разделе 2.1 сформулирована концепция выбора методов абберационного расчета: проб, алгебраического и комбинированного.

В разделе 2.2 даны предложения по терминам и обозначениям абберационных расчетов [22], представлены примеры несоответствия стандартам. Дано описание зеркальных систем и условий нормировки согласно дидактической концепции, основанной на тщательном определении величин и основных понятий, связанных с компьютеризацией проектирования.

В разделе 2.3 предложена методология корректного описания основных абберационных уравнений для монохроматических аббераций 3-го порядка (разложение Зейделя, коэффициенты B, K, C, D, E , модифицированные суммы $\sum I, \sum II, \sum III, \sum IV, \sum V$): учет дидактической концепции и правила знаков, рекомендации по терминам и новым абберационным обозначениям, вывод формул преобразованных абберационных коэффициентов 3-го порядка B_0, K_0, C_0, D_0, E_0 , содержащих коррекционный параметр σ_s (деформация зеркальной поверхности), используемых в абберационной модели ЗАС [9, 15, 39].

В разделе 2.4 сформулированы общие правила синтеза зеркальных систем, дана оценка абберационных свойств базовых моделей, позволяющая компоновать системы, избегая введения ненужных элементов и поверхностей; выработаны основные принципы использования композиционных методов с последующей компьютерной оптимизацией [58, 59]. Разработаны методики построения ЗАС на основе анализа использования априорной информации синтеза и композиции [2, 10, 29, 43].

Отдельный раздел 2.5 – оптотехника несферических поверхностей (НП), которые позволяют улучшить качество изображения, повысить оптические характеристики систем, упростить их конструкцию, уменьшить габаритные размеры и массу поверхностей [1, 57]. Установлено отсутствие доступной, адаптированной методологии расчета деформаций зеркальных НП,

коррекционных параметров ЗАС, которые базируются на фундаментальных принципах классификации с одной стороны и современных инженерных технологиях с другой. Отмечена практика современных расчетов ЗАС, содержащей сферические и несферические поверхности по двум методикам: с использованием преобразованных сумм Зейделя [22] и абберационных полиномов III порядка B_0, K_0, C_0, D_0, E_0 («коэффициентов с нулями») [3, 15].

В разделе 2.6 описан метод диаграммы коррекционных пластинок Burch, применение которого особенно удобно при исследовании и классификации чисто зеркальных систем. Идея метода использована в работе при создании методики расчета эффективного светового отверстия и диаграмм виньетирования в зеркальных системах [26, 56, 59].

Третья глава «Классификационный анализ и оптимизация методик расчета зеркальных анастигматов» освещает методические аспекты классификации зеркальных систем и определяет основные эффективные методики расчета зеркальных анастигматов.

В разделе 3.1 установлена структура классификационных подходов для анализа характеристик, предельных возможностей, формулировки рекомендаций по выбору базовой модели [1, 2, 12, 29, 32, 38], осуществляемому на основе эвристического опыта с учетом оптических характеристик, конструктивных условий, назначения, коррекционных возможностей и последующей оптимизации [58]. Составлены параметрические таблицы, приведена классификация трехзеркальных анастигматов [24] и методик их расчета [1, 27, 43, 48]. Предложена классификация и установлены новые типы и модификации четырехзеркальных анастигматов с моноблоком из двух зеркал [5, 16, 33], схемные решения которых относятся к группе компактных систем [1, 3, 21]. Определены условия апланатической и анастигматической коррекции ($B_0 = K_0 = C_0$). На основе комплексного анализа классифицированных систем установлены перспективные базовые модели, обладающие увеличенным углом поля зрения и высокой светосилой в условиях обеспечения удобного размещения плоскости изображения.

Для системного поиска промышленных модулей проведена классификация в зависимости от размера второго зеркала; предложены классификационные параметры M и N (рисунок 4). $M = \frac{f'_{12}}{S_3}$ определяет положение третьего зеркала относительно фокуса F'_2 системы из первых двух зеркал ($M > 0$ – предфокальное расположение относительно F'_2 ; $M < 0$ – зафокальное, т.е. $1/M = h_3$); $N = \frac{S'_3}{S_4}$ характеризует изменение сходимости лучей после третьего зеркала – отношение высот h_3 и h_4 .

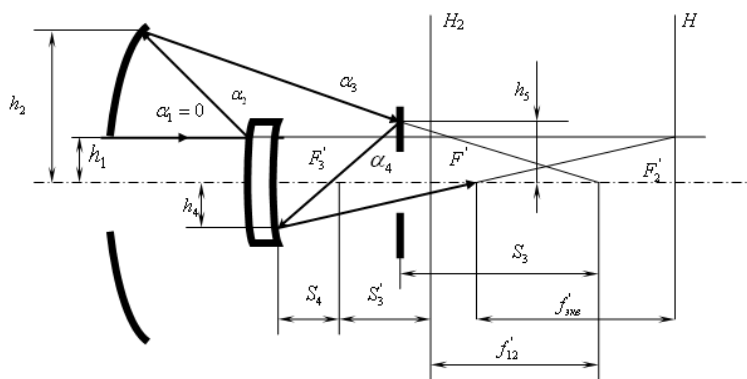


Рисунок 4 – Параметрическая схема объектива с моноблоком из двух зеркал

В схемах I класса (4R–1b) использована базовая схема Кассегрена в реверсивном построении: размер 2-го зеркала принципиально больше диаметра входного зрачка; в схемах II класса размеры зеркал не превышают этот диаметр (шифр 4R–1b).

Раздел 3.2 посвящен оптимизации методик расчета ЗАС. Предложен алгоритм, составленный на основе абберационных полиномов 3-го порядка, которые позволяют получить несколько решений расчета деформаций σ_s для анастигматов с четырьмя отражениями [9], которые могут быть использованы при проектировании новых схем с количеством зеркал более трех. В результате анализа уравнений абберационной коррекции получено условие исправления кривизны изображения системы из трех и четырех зеркал [5, 34]. Рассмотрены ЗАС с совпадающими вершинами нечетных зеркал (M_1 и M_3).

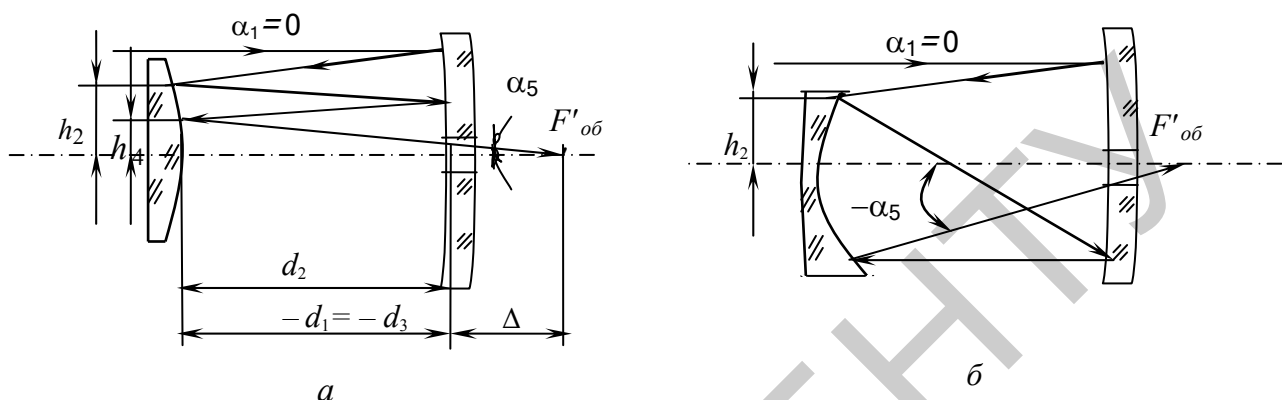
Раздел 3.3. посвящен методике расчета диаграмм виньетирования и принципам построения светозащитных бленд [1] в зеркальных анастигматах. При анализе «паразитных» лучей учтен посторонний свет, который многократно отражается от зеркал. Предложена методика расчета бленд. Даны алгоритмы габаритного и параметрического расчета бленд [26, 56, 59].

Методика построения диаграмм виньетирования основана на теоретическом положении [1,54], по которому любой оптический элемент, находящийся в пространстве изображений или в одном из промежуточных пространств, может быть заменен своим параксиальным изображением в пространстве объектов (кривизна элемента не учитывается, диаметр элемента (зона y) сохраняется, изображение переносится с увеличением s'/s). Переносимые элементы являются математической фикцией: пучки лучей могут не проходить физически, но элементы эффективны в светозащите. Предложен графический анализ площади действующего отверстия [59], когда суммируется влияние отдельных элементов (параксиальных изображений) в пространстве объектов и рассматривается эффективность защиты плоскости изображения.

Четвертая глава «Двухзеркальные системы с двойным отражением от зеркал» рассматривает новую группу объективов [1, 7, 13, 17, 18, 36, 40], которая позволяет создавать компактные схемы, имеющие технологические и

конструктивные преимущества по сравнению со схемами с разнесенными вершинами зеркальных поверхностей.

Раздел 4.1 описывает двухзеркальные объективы с двойным проходом лучей между зеркалами.



$$a - h_2 > 0, h_3 > 0, h_4 > 0; \quad b - h_2 > 0, h_3 < 0, h_4 < 0$$

Рисунок 5 – Двухзеркальные системы с четырьмя отражениями

Создана модель предфокальной ЗАС (рисунок 5, а), получены расчетные параметрические формулы габаритов и коррекции aberrаций:

$$\frac{1}{\alpha_2} \left[(\alpha_4 + \alpha_3)^4 \sigma_1 + (\alpha_4^2 - \alpha_3^2)^2 \right] - (\alpha_3 + \alpha_2) \left[(\alpha_3 + \alpha_2)^2 \sigma_2 + (\alpha_3 - \alpha_2)^2 \right] \times$$

$$\times (1 - \alpha_2 d) - \frac{(1 - \alpha_2 d)}{(\alpha_3 + \alpha_2)} \left[(1 + \alpha_4)^4 \sigma_2 + (1 - \alpha_4^2)^2 \right] + \alpha_2^3 (1 + \sigma_1) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{(\alpha_3 + \alpha_4)(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)}{\alpha_2(1 - \alpha_2 d)} \left[(\alpha_3 + \alpha_4)^2 \sigma_1 + (\alpha_4 - \alpha_3)^2 \right] - (1 + \alpha_4) \left[(1 + \alpha_4)^2 \sigma_2 + (1 - \alpha_4)^2 \right] \times$$

$$\times \frac{(\alpha_2 + \alpha_3)(\alpha_2 + \alpha_4 + 1) + \alpha_4(1 + \alpha_4)}{(\alpha_3 + \alpha_4)(\alpha_3 + \alpha_2)} - (\alpha_3 + \alpha_2)^3 \sigma_2 - (\alpha_3^2 - \alpha_2^2)(\alpha_3 - \alpha_2) - 2/d = 0. \quad (2)$$

$$d(1 - \alpha_4) \frac{(\alpha_2 + \alpha_3)(\alpha_2 + \alpha_4 + 1) + \alpha_4(1 + \alpha_4)}{(\alpha_3 + \alpha_4)} - d(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)(\alpha_3 - \alpha_4) +$$

$$+ \frac{d^2(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)^2}{4\alpha_2(1 - \alpha_2 d)} \left[(\alpha_4 + \alpha_3)^2 \sigma_1 + (\alpha_4 - \alpha_3)^2 \right] - \frac{d^2}{4(\alpha_3 + \alpha_2)} \left[(1 + \alpha_4)^2 \sigma_2 + (1 - \alpha_4)^2 \right] \times$$

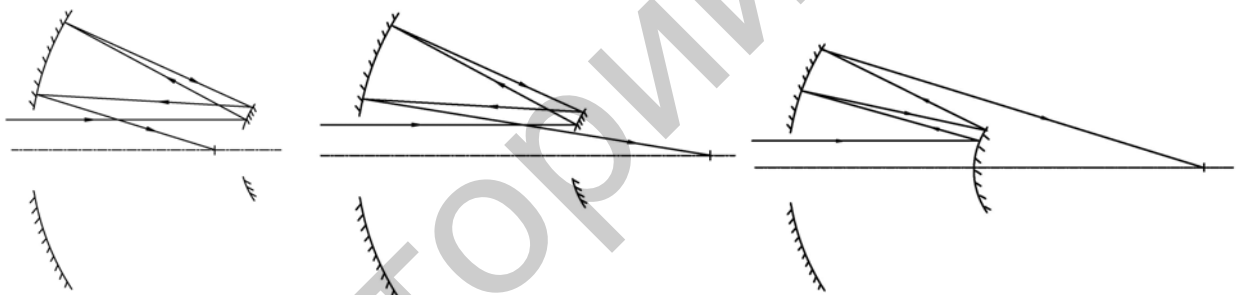
$$\times \left[\frac{(\alpha_2 + \alpha_3)(\alpha_2 + \alpha_4 + 1) + \alpha_4(1 + \alpha_4)}{(\alpha_3 + \alpha_4)} \right]^2 - 2(\alpha_3 + \alpha_2^2 d) + d(\alpha_3^2 - \alpha_2^2) = 0. \quad (3)$$

Предложены методики оптимизации конструкторских и aberrационных параметров с учетом экранирования, дающих вариантное обеспечение двумя способами: компьютерная оптимизация и уточненный габаритно-aberrационный расчет. Для первого способа разработан ряд оптимизационных

модулей, включающих изменение списков варьируемых и постоянных параметров; для второго способа составлены системы уравнений с неизвестными параметрами $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, d, \sigma_1$ и σ_2 , решение которых осуществлено в компьютерных пакетах. Разработаны базовые схемы ЗАС [77, 80].

Для объектива с внеосевыми зеркалами (рисунок 5, б) созданы прикладные программы поиска базовых модулей, даны алгоритмы параметрического расчета габаритов и абберационной коррекции. Выбор базовых схем для системы и варианты решения определены для различных значений параметра h_2 , определяющего экранирование, при учете отрицательных корней абберационных уравнений ($B_0 = K_0 = C_0 = D_0$). Моделирование двухзеркальных нетиповых анастигматов проведено в диапазоне $D/f = 1: 1 - 1: 5$ (наилучшая конфигурация 1:2). Исследование коэффициента E_0 позволило найти схему с коррекцией пяти монохроматических аббераций 3-го порядка при $D/f > 1/2$.

Раздел 4.2 представляет новые объективы с двойным отражением от зеркал с внутренним и внешним фокусом [7, 17, 18], схемы которых выполнены в реверсивном построении (рисунок 6).



а – схема с внутренним фокусом; б – схема с внешним фокусом; в –
концентрическая схема

Рисунок 6 – Реверсивные объективы с двойным отражением от зеркал

Получено параметрическое уравнение для габаритных характеристик реверсивного объектива с двойным отражением от зеркал

$$d_1^2 - d_1(2\delta + \varepsilon + 1) + (1 + \delta)(\delta - \varepsilon^2) = 0. \quad (4)$$

Предложена методика расчета, использующая систему уравнений, связывающих абберационные коэффициенты с геометрическими параметрами оптической системы [15]. При больших абсолютных значениях σ_1 и σ_2 всегда сказываются абберации высших порядков, что приводит к необходимости увеличения коэффициента ε .

В процессе абберационного расчета исследование закономерностей получаемых решений и выбор базовых модулей проведен с использованием

минимизации линейных коэффициентов экранирования (5) и технологичности зеркальных НП, определяемой деформациями поверхностей σ_1 и σ_2 .

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{h_1}{h_5} = \frac{1}{1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d - \alpha_4 d + d} \\ \varepsilon_2 &= \frac{h_4}{h_1} = 1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d - \alpha_4 d \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Разработаны два базовых модуля с наименьшей асферичностью поверхностей (рисунок 6, а, б): первое решение – схема с габаритами $l = 1,4 f'$; второе – компактная схема ($l = 0,82 f'$) с вынесенным приемником изображения, но линейное экранирование $\varepsilon = 0,67$ [13]. Условие Петцваля соблюдено в схеме со сферическими поверхностями ($r_1 = r_3, r_2 = r_4$) [18, 77], которая отличается малым влиянием aberrаций высших порядков, лучшим качеством изображения в пределах поля $2\omega = 6^\circ$ и простотой конструкции при малых габаритах. При фокусном расстоянии $f' = 200$ мм, относительном отверстии $D/f' = 1:4$ на оси частота 100 л/мм передается с контрастом 0,77.

Раздел 4.3 представляет зеркальный анастигмат, составленный из изопланатических концентрических элементов [7, 35]. Предлагаемый объектив [75] можно рассматривать как усовершенствованную концентрическую схему Боуэна с уменьшенными габаритами: поперечные размеры уменьшены в 1,5 раза, продольные – в 2,5 при одинаковом значении f' . Использование двойного отражения позволяет получить габариты $l = 0,8f'$ (рисунок 6, в); при этом плоскость изображения значительно вынесена за пределы оптической схемы ($\delta = 2,5f'$). Такое преимущество дает возможность размещения сканирующих элементов, фильтров, различных приемников излучения. Радиус кривизны поверхности изображения равен фокусному расстоянию ($D_0 - C_0 = 1$); кома, астигматизм и дисторсия отсутствуют. Составлено параметрическое уравнение aberrационной коррекции сферической aberrации:

$$4\alpha_2^2 - 2\alpha_2 - 5 = 0, \quad (6)$$

которое дает два варианта, различающихся по углу α_2 .

Расчет вариантов объектива проведен через требуемое изменение коэффициента Зейделя S_1 для определения значения α_2 (остаточная сферическая aberrация базовой модели представляет собой чистую aberrацию 5-го порядка). Базовый модуль для оптимизации вариантов имеет параметры: $\alpha_2 = (1 + \sqrt{21})/4$, $\alpha_3 = 0,5$, $\alpha_4 = 1,895644$, $h_2 = 2,116502$, $h_3 = 1,711615$, $h_4 = 3,233030$ при нормировке $h_1 = 1,0$, $\alpha_5 = 1$.

Экранирование оценивается линейным коэффициентом

$$\varepsilon = \frac{h_3}{S' + d}. \quad (7)$$

С учетом коэффициентов масштабирования для продольных и поперечных размеров получен объектный модуль объектива [1, 75] с $f=200$ мм:

$$\begin{aligned} r_1 = r_3 = 286,32 \text{ мм}; & \quad d_1 = -d_2 = d_3 = -159,6 \text{ мм}; & \quad h_1 = 50 \text{ мм}; \\ r_2 = r_4 = 445,91 \text{ мм}; & & \quad h_2 = 105,825 \text{ мм}; \\ S' = 323,3 \text{ мм}; & & \quad h_3 = 85,825 \text{ мм}; \\ & & \quad h_4 = 161,65 \text{ мм}, \end{aligned}$$

Объектив достаточно светосилен, поле зрения системы ограничивается кривизной поверхности, может достигать 15° и более в зависимости от допустимого виньетирования, потери света возникают из-за экранирования (порядка 50% по площади). Дополнительным достоинством объектива является ортоскопичность, т.е. отсутствие дисторсии.

Для эффективного выбора базовых моделей, обеспечивающих минимизацию расчетных работ при выполнении проектов, позволяя наилучшим образом выбирать базовые схемы, разработана концепция архивации, основанная на комплексной оценке качества изображения и принципах каталогизации, исходя из количества отражений и вида зеркал [1, 3, 17, 21, 24, 36, 46, 48, 51, 53]. Составлены каталоги, где представлены двух-, трех- и четырёхзеркальные системы, включая афокальные и децентрированные базовые объектные модули с указанием расчетных данных и характеристик, полученных после целого ряда расчетов и составления предварительных таблиц габаритных и аберрационных алгоритмов (рисунок 7).

Пятая глава «Четырёхзеркальные системы-анастигматы с моноблоком из двух зеркал». В главе рассмотрены объективы с моноблоком из первого и четвертого зеркал с четырьмя отражениями. Наличие двойного зеркала делает конструкцию компактной.

В разделе 5.1 рассмотрены анастигматы (рисунок 3,в), в котором первое зеркало всегда выпуклое, второе вогнутое, а третье и четвертое зеркала могут иметь поверхности любой формы (угол α_3 всегда положителен, а α_4 произволен). Проведено моделирование двух дополнительных модификаций, когда система из первых двух зеркал становится афокальной ($\alpha_3 = 0$, $h_2 = h_3$). Созданы схемы с промежуточным изображением [16], в которых третье зеркало расположено на оптической оси после эквивалентного фокуса системы из первых двух зеркал: конструктивное условие разработки: $h_3 < 0$; при этом углы: $\alpha_3 > 0$, $\alpha_4 < 0$ – IV тип, $\alpha_4 = 0$ – III тип. Установлены схемы зеркальных анастигматов с план-коррекцией. В работах [4, 6] описаны модели практически

реализуемых вариантов I и II типа (с учетом экранирования, виньетирования и защиты плоскости изображения от постороннего света). Условия нормировки для входных координат $\alpha_1 = 0$, $h_1 = 1$ в системах: нечетного типа $f' = \alpha_5 = -1$; четного типа $f' = \alpha_5 = 1$.

Окончательные варианты объективов, которые могут быть адаптированы к промышленному применению, получены в результате коррекции аберраций высших порядков при учете виньетирования оправами и отверстиями зеркал и блендами. Базовые схемы 2b-I с малым третьим зеркалом целесообразно моделировать для характеристик: $D/f' = 1:2 - 1:3$, $2\omega = 6^\circ$; использование 3-го плоского зеркала приводит к следующей форме зеркал: первое – гиперболическое, второе – эллиптическое, четвертое – параболическое. При увеличении светового диаметра 3-го зеркала поле зрения увеличивается, но светосила уменьшается. Базовая модель $h_2 = h_3$ позволяет обеспечить хорошее качество изображения для $D/f' = 1:6$, $2\omega = 10^\circ$ при допустимых энергетических характеристиках. Объективы типа 2b-II высокосветосильны ($D/f' = 1:1$), а модификации $h_2 = h_3$, $\alpha_3 = 0$ обеспечивают большой угол поля зрения: в системе с третьим и четвертым сферическими зеркалами $2\omega = 15^\circ$, при этом второе зеркало – эллипсоид с небольшой деформацией от сферы, а первое – профиль третьего порядка [6]. Объективы типа 2b-III предлагается моделировать для характеристик $D/f' = 1:3$, $2\omega = 7^\circ$; получая форму зеркал: 1-го и 3-го – гиперболическую, 2-го – эллиптическую с малым коэффициентом деформации [16]. Кружок рассеяния на оси порядка 0,02 мм; остаточные аберрации астигматизма и кривизны поля $Z'_M = Z'_S = -0,0002$ мм для края изображения, а максимальная величина волновой аберрации $N = -0,16\lambda$. Объективы типа 2b-IV, имеющие зеркала с НП (первое гиперболическое, второе и третье – эллиптические), наименее светосильны, их оптические характеристики: $D/f' = 1:5$, $2\omega = 4^\circ$, волновые аберрации на оси $0,05\lambda$. Коэффициенты $\varepsilon = 0,34 - 0,42$ для различных вариантов, при увеличении h_2 имеем уменьшение ε . Малые остаточные аберрации и наличие высокой разрешающей способности открывают широкие возможности по применению объективов в оптических приборах, работающих в широкой области спектра: спутникового сканирования земной поверхности, теплового сканирования. Спектральный диапазон применения ограничивается областью спектральной чувствительности фотоприемника и областью работы отражающих покрытий.

В разделе 5.2. развита теория выноса полевых корректоров (ПК) аберраций из 3-го и 4-го зеркал с произвольными поперечными размерами в схемах с

моноблоком с целью увеличения поля зрения, где наибольший диаметр зеркальных компонентов определен размером входного зрачка. Объекты исследования из этого класса систем рассмотрены в концепции ДО (рисунок 3, з), когда эквивалентное фокусное расстояние $f'_{\text{сист}} = \Gamma_{\text{ТС}} f'_{\text{фок.об.}}$ или $f'_{\text{сист}} = \beta f'_{\text{фок.об.}}$, где $\Gamma_{\text{ТС}}$, β – видимое или линейное увеличение 2-й ступени. Выполнено моделирование двух типов систем этого класса [3, 5, 39], в которых одиночные зеркала меняют форму своей поверхности от вогнутой до выпуклой, проходя планоидный (плоский) профиль. При попытке уменьшить число НП неизбежно возрастает роль конструктивных параметров. Отмечено, что в зависимости от знака α_5 возможны две разновидности объективов каждого типа с двумя модификациями.

Базовые параметры зеркальной системы с параллельным ходом лучей между двумя ступенями, получены из условия апланатической коррекции. Анастигматическая модель описывается абберационными уравнениями коррекции трех монохроматических aberrаций 3-го порядка для схемы с промежуточным изображением [15].

Формулы алгоритма параметрического расчета

$$\begin{cases} \alpha_2^3 = \frac{h_2 \alpha_4^3 - (1 - \alpha_4)^2 (1 + \alpha_4)}{h_2 - 1} \\ d_2 = \frac{2(P_1 d_1 h_2 - P_4 d_3 h_2) - h_2^2}{2P_1 (1 - h_2)} \end{cases} \quad (7)$$

определяют углы α_2 и α_4 , являющиеся зависимыми параметрами; учтен коэффициент $\varepsilon = h_2$, влияющий на MTF. Решение задачи устранения сферической aberrации для различных значений ε проводят с помощью вспомогательных компьютерных программ; при вычислении конструктивных параметров учтено дополнительное условие $\sum_{s=1}^3 d_s > 0$.

Отличие методики расчета от применяемых ранее состоит в том, что при $\alpha_3 \neq 0$ параметр d_2 не используется для компенсации aberrаций: все значения толщин d_s (в том числе и d_2) определены при заданных значениях углов α_s и высот h_s , но используется дополнительный параметр $h_3 \neq h_2$. В алгоритме найдена связь между углами, определяющая осевые габариты и конструктивные параметры системы с минимальным числом коэффициентов асферики. Получены формулы деформации 3-го зеркала и высоты h_2 , связанной с коэффициентом экранирования ε :

$$\sigma_3 = \frac{-\frac{h_2 h_3}{2} + P_1 d_1 h_3 + P_3 d_2 h_3 - P_4 d_3 h_2 - P_4 d_2}{h_3 T_3 d_2}; \quad h_2 = \frac{(\alpha_3 + \alpha_2) h_3}{(\alpha_2 + \alpha_4 - 1) h_3 + \alpha_3 + \alpha_4}. \quad (8)$$

Уравнением анастигматической коррекции является выражение (9):

$$\begin{aligned} & h_3^2 \left[(\alpha_3 + \alpha_2)^2 a - (\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_2 + \alpha_4 - 1)d + \frac{P_1}{\alpha_2} \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} \right) (\alpha_2 + \alpha_4 - 1)^2 \right] + \\ & + h_3 \left[(\alpha_3 + \alpha_2)^2 b - (\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_4 + \alpha_3)d - (\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_2 + \alpha_4 - 1)e + 2 \frac{P_1}{\alpha_2} \times \right. \\ & \times \left. \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} \right) (\alpha_2 + \alpha_4 - 1)(\alpha_4 + \alpha_3) \right] + \left[-(\alpha_3 + \alpha_2)^2 c - (\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_4 + \alpha_3)e + \frac{P_1}{\alpha_2} \times \right. \\ & \times \left. \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} \right) (\alpha_4 + \alpha_3)^2 \right] = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где вспомогательные независимые переменные определяются формулами:

$$\begin{aligned} a &= \frac{P_1}{\alpha_2^2} - \frac{P_4}{\alpha_4^2} + \alpha_2 - \frac{1}{\alpha_4} + \alpha_4, \quad \text{при} \quad c = \frac{P_4}{\alpha_3 \alpha_4} + \frac{P_4}{\alpha_4^2}; \quad h_3 \neq -\frac{(\alpha_4 + \alpha_3)}{\alpha_2 + \alpha_4 - 1}; \\ e &= \frac{P_1}{\alpha_2 \alpha_3} - \frac{P_4}{\alpha_3 \alpha_4}; \quad b = \frac{P_1}{\alpha_2 \alpha_3} - \frac{P_4}{\alpha_3 \alpha_4} - \frac{2P_4}{\alpha_4^2} - \frac{1}{2\alpha_3} + \alpha_3 - \frac{1}{\alpha_4} + \alpha_4; \\ d &= \frac{2P_1}{\alpha_2^2} + \frac{P_1}{\alpha_2 \alpha_3} - \frac{P_4}{\alpha_3 \alpha_4} + \alpha_2 - \frac{1}{2\alpha_3} + \alpha_3. \end{aligned}$$

Использование методики позволило создать высокосветосильный объектив, который запатентован. Его характеристики: $2\omega = 6^\circ$, $D/f' = 1:1$ для $f' = 100\text{мм}$ при $\varepsilon = 0,5$. Уравнения асферических зеркал (*2-го и **3-го) в пределах точности, достигаемой при расчете aberrаций 3-го порядка, имеют вид: * $y^2 + z^2 = -255,768x - 7,455x^2$; ** $y^2 + z^2 = 232,064x + 1,790x^2$.

Среди систем типа 1b-II перспективен модуль ($2\omega = 6^\circ$; $D/f' = 1:1$), обеспечивающий план-анастигматическую коррекцию за счет параметров α_2 и h_2 при выполненном условии Петцваля $D_0 = 0$, причем возможен плоский профиль третьего зеркала [78].

Шестая глава «Композиции на базе афокальных систем» посвящена системам с переменными характеристиками, которые моделируются на основе афокальных систем и базовых модулях из двух и трех зеркал для дискретной перемены и зеркальных панкратических систем.

В разделе 6.1 рассмотрены афокальные системы с двухзеркальным базовым модулем, расположенным конфокально с вогнутым параболическим

зеркалом и устраняющим его кому и астигматизм [8, 10]. Из условия коррекции сферической aberrации определяется деформация гиперболического зеркала при учета деформаций параболических зеркал:

$$\sigma_2 = - \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{\alpha_2 + \alpha_3} \right)^2, \text{ где } \alpha_2 = - \frac{\delta \Gamma^2 + \sqrt{\delta \Gamma^2 [\delta \Gamma^2 - 4(1 - \Gamma)] - 4\Gamma(1 - \Gamma)^2}}{2[(1 - \Gamma) + \Gamma \delta]}.$$

Условие Петцваля, описываемое уравнением параметров $\alpha_2 - \frac{1 + \alpha_2}{h_2} + \Gamma = 0$ выполняется подбором радиусов при учете центрального экранирования: коэффициент $\varepsilon = 1 / \left(\frac{h_2}{h_4} \left(1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_3} \right) + \frac{\alpha_2}{2N} \right)$ учитывает размеры дополнительного плоского зеркала. Объектный модуль конструктивных параметров схемы в нормированных величинах

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{2}{\alpha_2}, \\ r_2 &= \frac{2}{\Gamma + \alpha_2}, \quad d_1 = \frac{\Gamma - 1}{(\Gamma + \alpha_2)\alpha_2}, \\ r_3 &= \frac{2}{\Gamma}, \quad d_2 = -d_1. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Разработан алгоритм эффективного проектирования, где использованы новые условия нормировки, учитывающие требования технологичности.

$$\alpha_3 = \frac{\Gamma \delta' + \sqrt{\Gamma^2 \delta' [\delta' - 4(\Gamma - 1)] - 4\Gamma(1 - \Gamma)^2}}{2\Gamma[\Gamma - 1 + \Gamma \delta']}. \quad (11)$$

Предложено условие композиции систем с совмещенными вершинами нечетных зеркал ($-d_1 = d_2$): $\alpha_3 = \frac{1}{\sqrt{-\Gamma}}$ и принцип построения компактных систем при $\delta \leq 0$ [10] по условию $2N \geq -\Gamma\alpha_3$.

Предложенная методика расчета может использоваться при расчете афокальных ЗАС любого типа, к примеру, трехзеркальной телескопической системы [14, 37], в которой второй компонент выполнен в виде вогнутой эллиптической отражающей поверхности, геометрические фокуса которой совмещены соответственно с фокусами параболических зеркал. Базовый модуль на основе схемы Грегори, имеющей промежуточное изображение, обеспечивает возможность защиты изображения от лучей постороннего света с помощью диафрагмы (центрального отверстия в третьем компоненте).

Даны рекомендации по применению модулей: схемы при $\delta \leq 0$ обеспечивают малое экранирование ($\varepsilon = 0,2-0,35$) для увеличений $\Gamma = (-6)-(-10)^X$, углового поля $2\omega = 1-2^\circ$; компактными являются схемы с третьим зеркалом, оптическая ось которого перпендикулярна оси базового модуля – их целесообразно конструировать для малых увеличений, причем возможность использования в схемах ДО ограничена из-за малого $(0,2f'_{1,2})$ удаления выходного зрачка от последней поверхности; схемы, обеспечивающие вынос плоскости промежуточного изображения за пределы схемы, имеют $2\omega = 1-1,5^\circ$ при $\varepsilon \geq 0,25$ и работают с увеличением $\Gamma = (-6)-(-9)^X$, возможно их использование в качестве насадок в системах с дискретной переменной характеристик в приборах специального назначения. Установлено, что обеспечивается план-коррекция.

В разделе 6.2 даны параметрические расчеты систем с дискретной переменной характеристик и панкратического двухзеркального объектива. Рассмотрена группа схем с афокальной насадкой для 3–4 дискретных значений характеристик при варьировании свободных параметров α_2 и h_2 , т.е. Γ . Система галилеевского типа с $\Gamma > 0$ дает прямое изображение; имеет малые продольные габариты и меньший коэффициент кривизны поля D_0 . Для фокусирующего компонента предложены зеркальные объективы: зафокальный объектив [2, 19] и объектив [12], а для зеркально-линзовых композиций – объективы [71–74]. Возможно моделирование систем дискретной перемены параметров [20, 45] с афокальной насадкой $\Gamma < 0$, составленной из двух вогнутых параболоидов, дающих промежуточное изображение, с фокусирующим модулем на основе схемы Кассегрена ($f' > 0$) при апланатической коррекции aberrаций.

Разработана система с характеристиками $D/f' = 1:1,5$ и $2\omega = 1^\circ 10'$, обеспечивающая три дискретных значения эквивалентного $f'_{\text{сист}} = -150$ мм; -300 мм; -600 мм, при этом $\Gamma = 5^\times, 10^\times, 20^\times$, а $f'_{\text{фок.об}} = -30$ мм. Для f'_{max} осевые aberrации: размер кружка рассеяния – $0,003$ мм, неизопланатизм $\eta = 0,1\%$ [20]. Осуществлена взаимокompенсация кривизны изображения телескопической зеркальной системы с $\Gamma > 0$ и зафокального объектива [2], но дисторсия на краю изображения – $3,9\%$.

Для двухкомпонентной зеркальной панкратической системы изменение эквивалентной оптической силы осуществлено за счет переменного расстояния между компонентами [11], определяемого законами движения:

$$\text{для первого зеркала } \varphi_1 = ((r_2 / 2S'_1)f') + (r_1 / 2) - (r_1 r_2 / 4f');$$

$$\text{для второго зеркала } S'_2 = (r_2 / 2S'_1)(f' + S'_1) \text{ [13].}$$

Малые значения радиуса r_1 обеспечивают меньшее экранирование в схеме; линейный коэффициент которого

$$\varepsilon = 4 / (K(4 - r_1^2 \alpha_3^2) + 2r_1 \alpha_3). \quad (12)$$

Получены формулы, определяющие изменение конструктивных характеристик S_2 , S'_2 и d от значения f' , для двух подвижных зеркал с положительными радиусами кривизны, которые применимы к габаритному расчету любого типа зеркальной панкратики [45].

Удовлетворительное качество обеспечивается для трех позиций: относительных значений $f' = 1,0 - 2,5$, базовый объектив выбран из условия минимизации сферической aberrации B_0 , которое выполняется подбором конструктивных параметров r_1 и K :

$$B_0 = \frac{1}{r_1^3} [(0,125 \alpha_3^4 r_1^4 - \alpha_3^2 r_1^2)K + 2(K - 1)]. \quad (13)$$

Зеркальный панкратический объектив с механической компенсацией [76] имеет переменные оптические характеристики: $f' = 20-56$ мм; $D/f' = 1: 2-1: 5$ и $2\omega = 6-2^\circ$ и обеспечивает трехкратное изменение оптической силы. Он выгодно отличается от известных аналогов отсутствием асферических поверхностей.

Седьмая глава. «Трехзеркальные анастигматические системы» посвящена моделированию ЗАС, входящих в группу перспективных систем: компактные конструкции и системы, составленные из зеркальных изопланатических элементов.

В разделе 7.1. рассмотрены анастигматы с моноблоком из нечетных зеркал, имеющие промежуточное изображение (рисунок 7).

Зеркальные аналоги технологически не осуществимы из-за чрезмерно высоких относительных отверстий зеркал (порядка 1:0,3), при введении дополнительного плоского зеркала схема становится двухосевой и улучшает свои оптические характеристики [24, 27, 46, 48].

Предложена методика расчета, основанная на введении расфокусировки в ход лучей афокальных ЗАС, которая позволила создать конструкцию нового длиннофокусного объектива [79]. Оптическая схема соответствует концепции ДО [24]: первая ступень – двухзеркальный объектив, вторая (зеркало) работает в масштабе $\beta_3 = \frac{h_1}{f'_{1,2} \alpha_4}$, где $f'_{1,2}$ – фокусное расстояние первой ступени.

Создан алгоритм проектного расчёта, включающий этапы:

– расчет параметрических характеристик (радиусов кривизны r_1 , r_3 и высоты луча h_2) с использованием уравнений нулевого луча

$$\alpha_2 = \frac{h_1(\chi_1 - \chi_2)}{r_1\chi_1} + \frac{\chi_2\alpha_1}{\chi_1}; \quad h_2 = \frac{\chi_2\alpha_3 - \chi_3\alpha_2}{\chi_2 - \chi_3}r_2; \quad h_3 = \frac{\chi_3\alpha_4 - \chi_4\alpha_3}{\chi_3 - \chi_4}r_3;$$

– поиск сочетания параметров для выполнения условия $d_1 \approx -d_2$, при этом положительный угол α_3 определит выполнение условия план-коррекции третьего порядка для анастигмата, а именно

$$\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} \frac{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}{h_s} = \alpha_2 - (\alpha_3 + \alpha_2)/h_2 + (1 + \alpha_3)/h_3 = 0;$$

– расчет параметров σ_s асферизации второго и третьего зеркал из условия исправления комы и астигматизма: $K_0(\sigma_2, \sigma_3) = 0$, $C_0(\sigma_2, \sigma_3) = 0$;

– решение уравнения $B_0 = 0$ относительно деформации σ_1 первого зеркала, определяющей коррекцию сферической aberrации.

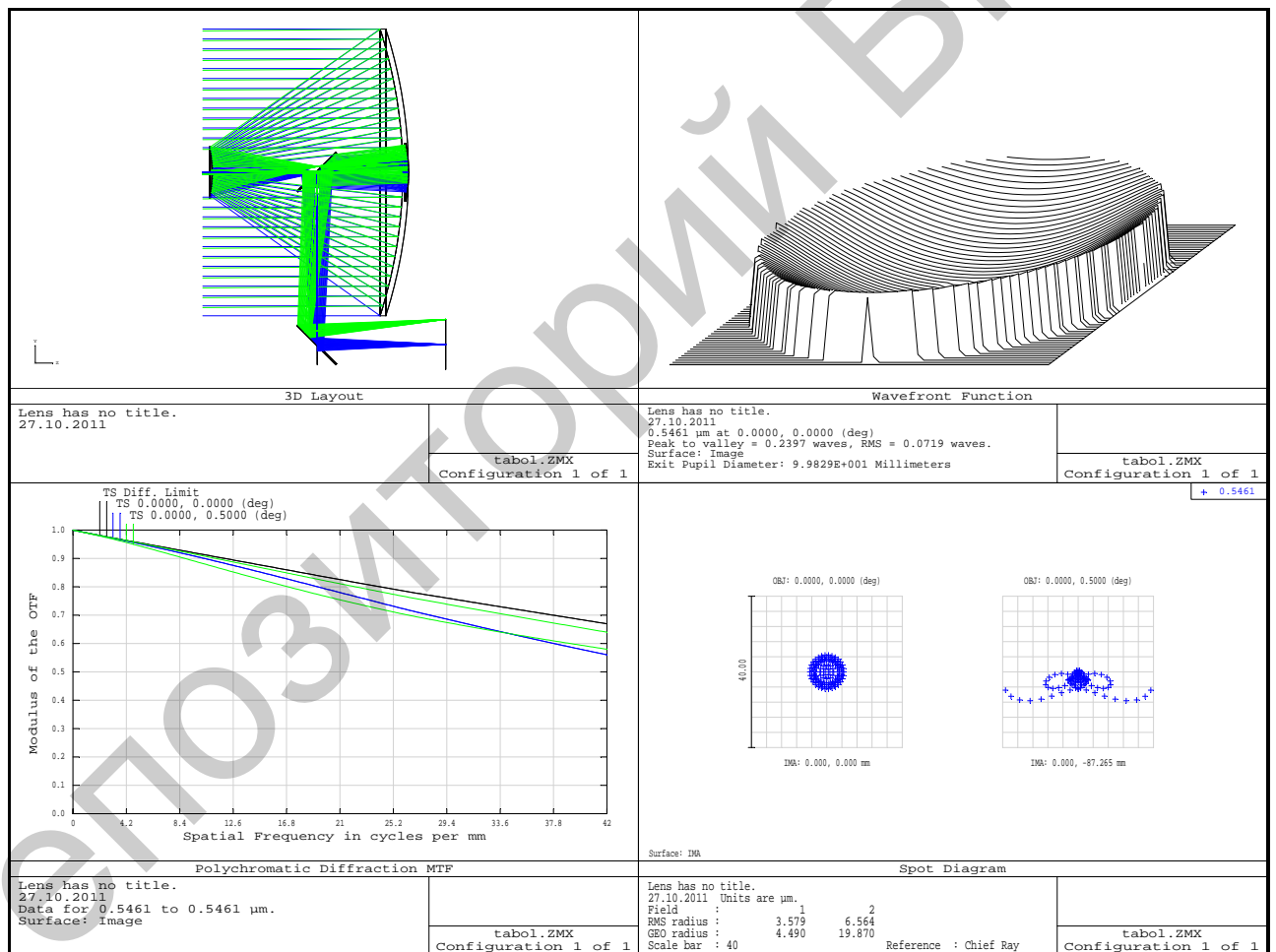


Рисунок 7 – Трехзеркальный объектив (расчеты в программной среде Zemax)

Алгоритм абберационного расчета использует систему алгебраических уравнений, решение которой осуществлено в программе Mathcad с дополнительными опциями. Для промышленной адаптации отбирают

конструктивно осуществимые схемы, которые имеют допустимое экранирование при учете кроме основного дополнительное за счет экранирования плоским зеркалом (рекомендуется коэффициент $\varepsilon = 0,3-0,5$). Описание объектного модуля и характеристики качества объектива (рисунок 7) представлены в каталоге [1].

Малые остаточные aberrации открывают широкие возможности по применению в аппаратуре ДЗВ высокого разрешения [23, 41] (разрешение 130 л/мм). В объективе получена ортоскопическая коррекция, дисторсия откорректирована варьированием параметров α_3 и h_3 (относительная величина менее 0,1%).

В разделе 7.2 представлены новые схемы концентрических объективов, определены композиции зеркальных компонентов методом синтеза путем модульного подхода, даны результаты моделирования и анализ aberrационных характеристик и габаритных параметров.

Методики расчета двухзеркальной схемы для произвольно расположенного предмета усовершенствованы за счет введения поправок в формулы параметрического расчета, позволяющих проводить поиск оптимального соотношения радиусов кривизны, определяющих наилучший выбор для базового модуля с учетом минимума aberrаций 3-го порядка. Получено решение уравнения внешних элементов (оптическая сила, отверстия, габариты, положения зрачков) для второго этапа моделирования, предложен комбинированный метод расчета.

Рассмотрен новый трехзеркальный анастигмат, составленный из изопланатических концентрических элементов, получены патенты [81, 82]. Дан принцип построения схемы, определены ее преимущества и особенности работы каждого компонента; предложена альтернативная схема с дополнительным плоским зеркалом, обладающая рядом преимуществ: меняя соотношения между радиусами r_2 и r_3 , т.е. увеличение β второго компонента, корригируется сферическая aberrация (по ходу действительного луча).

Объектив имеет промежуточный действительный фокус, дает прямое изображение вне системы [43], при этом $\Phi_1 = \Phi\beta$. Недостатком схемы является большая длина, быстро растущая при уменьшении β , исходя из равенства

$L = \left(\frac{1,5}{|\beta|} + 1 \right) f'$. Основные формулы алгоритма при увеличении $\beta_p = 1$:

– $S_2 = \frac{1}{\Phi_{II}}$; $S'_2 = S_2\beta = S'_F$; а расстояние между центром кривизны

поверхностей II компонента и промежуточным изображением равно f'_1 ;

– формулы $z + f_2 = S_2$, $\beta = -\frac{f_2}{z}$ (z – оптический интервал) определяют Φ_{II} ;

– радиусы кривизны: $r_1 = \frac{2}{\Phi_{II}}$; $r_2 = \frac{2}{-\Phi_{II} + \frac{2}{r_3}}$; $r_3 = \frac{2}{-\Phi_{II} + \frac{2}{r_2}}$

В разделе 7.3 проведен анализ абберационных свойств трехзеркальной нецентрированной системы, ее характеристик и габаритных параметров. Составлен алгоритм расчета с учетом анастигм

$$\tilde{d}^2 - \frac{\tilde{d}r_1}{2} \left(\frac{1}{\cos \varepsilon_1} + \cos \varepsilon_1 \right) + \frac{r_1^2}{4} - \frac{r_1 r_2 \sin^2 \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2}{4 \cos \varepsilon_1 \sin^2 \varepsilon_2} = 0. \quad (14)$$

– уравнение расчета трехзеркальной композиции $\tilde{d}_2 = \frac{b}{c}$, (15)

где $b = 2 \operatorname{tg} \varepsilon_2 r_2 S_2 t_2 + \operatorname{tg} \varepsilon_1 r_2^2 S_2 \cos \varepsilon_2 + ar_2 S_2 (2t_2 - r_2 \cos \varepsilon_2 - 2t_2 \cos^2 \varepsilon_2) -$
 $- 2 \operatorname{tg} \varepsilon_1 r_2 t_2 \cos \varepsilon_2 + \operatorname{tg} \varepsilon_1 r_2^2 \cos \varepsilon_2 + 2 \operatorname{tg} \varepsilon_2 \cos^2 \varepsilon_2 r_2 S_2 t_2 + \operatorname{tg} \varepsilon_1 r_2^2 t_2 \cos \varepsilon_2;$
 $c = (2 \operatorname{tg} \varepsilon_2 t_2 + \operatorname{tg} \varepsilon_1 r_2 S_2) (2S_2 \cos \varepsilon_2 - r_2) + 2 \operatorname{tg} \varepsilon_2 \cos \varepsilon_2 S_2 (2t_2 - r_2 \cos \varepsilon_2) - ar_2 t_2 \cos \varepsilon_2.$

– конструктивные параметры третьего зеркала при $S_3 = S_2' - \tilde{d}_2$, $t_3 = t_2' - \tilde{d}_2$:

$$r_3 = \frac{2(1 - \cos^2 \varepsilon_3)}{\cos \varepsilon_3} \frac{S_3 t_3}{S_3 - t_3} \quad (16)$$

Разработан алгоритм расчета базовых моделей нецентрированных зеркальных систем из трех и четырех зеркал, получены точные математические выражения условий анастигматической коррекции и исправления комы для заданных углов падения главного луча на поверхности зеркал и косой толщины \tilde{d} , определяющей их взаимное расположение. Разработана трехзеркальная композиция, учитывающая коррекцию астигматизма I порядка и комы II порядка, обеспечивающая заданные оптические характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан и реализован на практике ряд оптотехнических подходов, направленных на оптимизацию проектирования ЗАС, используемых для создания широкого класса оптических и оптико-электронных приборов. Приведены примеры применения оптотехнических решений при моделировании двухзеркальных анастигматов для лазерных систем фокусировки [2, 19, 29], микроскопии [7, 75], трехзеркальных план-анастигматов для аппаратуры ДЗЗ из космоса [8, 21, 27, 79], проектировании четырехзеркальных анастигматов для систем теплового сканирования и приборов радиометрического и пеленгационного типов [4–6, 16, 39, 78], спектральных приборов [7, 13, 18, 74, 77].

2. На основе проведенного комплексного анализа теоретических основ, практики расчета и изготовления [1, 21, 24, 25, 44] выявлен ряд важных проблем, возникающих в процессе разработки современных оптических зеркальных систем. Выделены и структурно определены их инженерные составляющие, включающие разработку методик и средств анализа базовых моделей зеркальных систем: введение коэффициента сложности, зависящего от экранирования, выноса изображения, от оптимального соотношения конструктивных параметров, а также использования изопланатических, панкратических и децентрированных элементов и других составляющих.

3. Предложены и рассчитаны новые типы объективов с различным количеством зеркальных поверхностей [78, 79, 80, 81], с учетом использования моноблоков из двух зеркал и введения деформаций несферических поверхностей для целей анастигматической коррекции.

4. Обоснована методология эффективного проектирования ЗАС, позволяющая увеличить поле зрения и светосилу системы при сохранении допустимого качества изображения; установлен приоритет конструктивности и технологичности перед аберрационной коррекцией за счет введения новых условий нормировки параметрических расчетов и компьютерного моделирования, реализованный при исследовании и разработке новых объективов-анастигматов, обладающих улучшенными оптическими характеристиками [1, 6, 13, 17, 27, 40, 78, 81].

5. Предложен и реализован комплекс современных методов расчета зеркальных систем, как алгебраических, так и композиционных, основанных на синтезе базовых моделей и коррекционных элементов. На основе аберрационного анализа найден подход, позволяющий установить новые схемные решения с использованием наиболее рациональных черт

проектирования зеркальной оптики [1, 5, 13, 15, 22, 43, 44]. Обоснован принцип создания универсальной концептуальной модели абберационного и параметрического расчетного алгоритма, содержащей в первом приближении элементы теории aberrаций 3-го порядка [1, 3, 9, 15, 29, 32, 39, 48]. Важным этапом предложенного алгоритма является оптимизация, на основе которой введены определенные функциональные зависимости между значениями aberrаций и технологическими допусками. Даны рекомендации по терминам и обозначениям aberrационных полиномов, необходимых для расчета различных элементов зеркальной оптики [22].

6. Созданы алгоритмы расчета деформаций несферических поверхностей – коррекционных параметров монохроматических aberrаций [9], которые реализованы в процессе моделирования четырехзеркальных анастигматов [1, 2, 5, 6, 16, 21, 36].

7. Установлена структура классификационных подходов для анализа характеристик, предельных возможностей и формулировки рекомендаций по выбору базовой модели [3, 25]. Составлены параметрические таблицы двухзеркальных систем [29], с помощью которых показано, что система из двух зеркал является анастигматом в случае, когда наряду с деформациями зеркальных поверхностей σ_1 и σ_2 используются коррекционные параметры: отношение оптических сил зеркал φ_1 / φ_2 или расстояние d между ними. Составлены и исследованы параметрические алгоритмы расчета трехзеркальных систем и обосновано, что за счет деформирования трех зеркальных поверхностей корригируют три основные монохроматические aberrации [24]. Осуществлена классификация и найдены параметрические характеристики различных вариантов, обладающих соотношениями, соответствующими конструктивным габаритам. Обосновано, что схемы с плоским полем изображения осуществимы только при очень сложной форме всех асферических зеркал. Показано, что для промышленной адаптации профиль одного из зеркал необходимо аппроксимировать к сферической форме, при этом анастигматическая коррекция при сохранении апланатизма системы становится возможной при выполнении определенной связи между параксиальными величинами, которая может привести к неудовлетворительному конструктивному решению и необходимости введения «ломающих» ход лучей плоских зеркал. Дана классификация и установлены новые типы и модификации четырехзеркальных анастигматов с моноблоком из двух компонентов, схемные решения которых относятся к группе компактных систем [3, 16]. На основе комплексного анализа классифицированных систем установлены перспективные базовые модели, обладающие увеличенным углом

поля зрения и высокой светосилой в условиях обеспечения удобного размещения плоскости изображения.

8. Сформулированы теоретические положения, основные принципы построения, разработана методология проектирования специальных бленд и других светозащитных элементов, создан алгоритм расчета бленд в зеркальных анастигматах и дана методика оценки виньетирования [1, 26, 31, 56], реализованная при моделировании солнцезащитных бленд оптико-электронных звездных аппаратов в ОАО «Пеленг».

9. Проведено моделирование и разработаны ЗАС с двумя проходами лучей между четными и нечетными зеркалами, имеющие совмещенные вершины поверхностей. Созданы прикладные программы поиска базовых схем ЗАС; созданы новые схемы-анастигматы [1, 6, 7, 13, 17, 18, 36, 40, 75, 77, 80]: зеркальная система с равными радиусами, двухзеркальный концентрический объектив с четырьмя отражениями, реверсивные объективы с внешним и внутренним фокусом и предфокальные объективы с двойным отражением от зеркал.

10. Для наиболее эффективного выбора базовых моделей разработана концепция архивации на основе комплексной оценки качества изображения и выполнения принципов каталогизации по разбиению классов на группы по признаку количества отражений от зеркал и вида самих зеркал. Составлены каталоги рассчитанных систем и объективов, в которые включены базовые объектные модули с указанием расчетных данных и характеристик [1, 3, 51, 55, 57, 58, 63, 64].

11. Установлено, что вынос корректора полевых аберраций в конфигурациях многозеркальных систем, созданных в концепции двухступенчатой оптики, за пределы базового модуля приводит к увеличению их полезного поля зрения. На этой основе исследован новый класс четырехзеркальных объективов, в которых наибольший диаметр компонентов определен размером входного зрачка. Сформулированы общие принципы создания анастигматических моделей, в которых зеркала монолита всегда вогнутые, а второе и третье зеркала меняют форму своей поверхности от вогнутой до выпуклой, проходя планоидный или плоский профиль, получены патенты на изобретения и полезные модели [78, 81]. Разработаны алгоритмы параметрического и аберрационного расчетов [5, 15, 39], апробированные на предприятии НП РУП «ЛЭМТ» и в ОАО «Пеленг».

12. Разработаны основные принципы моделирования трехзеркальных анастигматических афокальных систем с промежуточным изображением на основе модульного подхода, обоснована их рациональная классификация, показаны композиции с различными базовыми модулями [8, 10, 14].

Установлены основные принципы построения компактных систем, использующих вынос промежуточного изображения за габариты схемы, создан алгоритм эффективного проектирования. Методика моделирования использована при расчете систем с дискретной переменной характеристик любого типа [2, 12, 19, 20], а также для расфокусированных длиннофокусных систем [27, 46, 48, 79]. Получен патент на трехзеркальный анастигмат [79] с ортоскопической коррекцией (дисторсия менее 0,1%), который предполагается для применения в аппаратуре дистанционного зондирования Земли высокого разрешения [23, 41].

13. Разработаны методики комплексного исследования зеркальных систем с панкратическими, изопланатическими и децентрированными элементами; созданы программные среды для расчета систем с переменными характеристиками [47]. Предложена методика расчета двухзеркального панкратического объектива [11] с механической компенсацией. На основе разработанного алгоритма рассчитан панкратический объектив, обеспечивающий трехкратный перепад изменения эквивалентного фокусного расстояния, получен патент [76].

14. Проведено моделирование и разработаны усовершенствованные методики параметрического и абберационного расчета двухзеркальной концентрической системы, разработаны новые зеркальные объективы, составленные из изопланатических элементов [7, 49, 70], получен патент [82].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Научные результаты, полученные в диссертационной работе, в виде новых схемных решений, классификации четырехзеркальных анастигматов различных типов; принципов создания универсальной концептуальной модели абберационного и параметрического алгоритма расчета; теоретических основ оплотехники двух-, трех- и четырехзеркальных анастигматических систем; методологии расчета деформаций зеркальных поверхностей; методики проектирования бленд и алгоритмов оценки виньетирования; методики комплексного исследования зеркальных систем с изопланатическими, панкратическими и децентрированными элементами; предложений по терминам, обозначениям абберационных расчетов в зеркальной оптике могут быть реализованы в ряде вузов, готовящих специалистов по направлению «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы», а также в производстве и научных исследованиях в организациях оптической отрасли. Результаты проведенного комплекса исследований, оплотехнических подходов, решений и разработок в области моделирования ЗАС могут быть использованы

при создании широкого класса оптико-электронной аппаратуры различного назначения, в том числе комплексов ДЗЗ из космоса, УФ микроскопии, лазерных и ИК-систем, спектральных приборов. Разработанные методики параметрического расчета габаритов и коррекции аберраций ЗАС реализованы как прикладные алгоритмы, применение которых позволило создать патентные модели [75–82], которые могут быть технологически адаптированы и апробированы на отраслевых предприятиях.

Результаты исследований и расчетов нового двухзеркального объектива с панкратическими элементами внедрены при создании модульных специальных оптико-электронных приборов на предприятии «Янсар» (акт внедрения от 26.07.2005г.).

Алгоритм расчета конструктивных параметров и габаритных характеристик двухзеркальных анастигматов [69] использован при моделировании оптических систем фокусировки лазерного излучения в НИУ ИТМО (г. Санкт-Петербург) (акт внедрения от 30.10.2009г.).

Анастигматическая модель и алгоритмы параметрического и аберрационного расчетов зеркального объектива с четырьмя отражениями апробированы на предприятии НП РУП «ЛЭМТ» (г. Минск); дана положительная оценка использования, определяемая эффективностью моделирования четырехзеркальных объективов, позволяющей минимизировать сроки расчетных работ (акт внедрения от 10.02.2011 г.).

Результаты диссертационного исследования использованы в ОАО «Пеленг» при создании оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли из космоса в следующих проектах: «Разработка и изготовление макета объектива с проверкой оптической схемы и конструкции корпуса из углепластика», «Объектив приемного блока лазерного дальномера дистанционного зондирования Земли» для выбора оптимальных схем построения зеркальных объективов в части габаритных характеристик, выбора коэффициента центрального экранирования, использования асферических поверхностей для достижения безабберационной коррекции (акт внедрения от 28.02.2011г.).

Научно-технические результаты диссертации (методические рекомендации и прикладные алгоритмы) использованы в ряде вузов, готовящих специалистов по направлению «Оптотехника» (РФ) (отзыв ГУКиТ от 28.10.2008г., приложение Н) и «Оптико-электронные приборы» (Украина) (акт внедрения НТУ «Киевский политехнический институт» от 25.02.2012г., приложение Н), что обеспечивает модернизацию учебного процесса подготовки высококвалифицированных инженеров-оптиков.

На кафедре «Лазерная техника и технология» БНТУ выполнено внедрение в учебный процесс следующих результатов (акт внедрения от 11.02.2011г.): методик расчета деформаций зеркальных поверхностей и расчета защитных бленд, диаграмм виньетирования зеркальных систем, алгоритмов проектного расчёта многозеркальных анастигматов, которые используются при чтении лекций, в методических материалах для проведения лабораторных, практических занятий, курсового проектирования по дисциплинам «Теория и расчет оптических систем», «Техническая оптика», «Компьютерное проектирование оптических и лазерных систем», занятий с магистрантами и аспирантами.

Результаты диссертационной работы освещены в монографии [1], частично вошли в изданные учебные пособия [54, 56–59], конспекты лекций и методические пособия с упражнениями по решению задач [55], использованы автором при обучении студентов по специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» для дисциплин оптического цикла специализаций «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» и «Лазерные системы и технологии», что ориентирует на формирование у студентов дополнительных компетенций по актуальному направлению «Космическая оптика».

Научные результаты исследований по диссертационной работе и методические материалы рекомендуется развивать на приборостроительном факультете БНТУ, предложить к использованию на факультете радиофизики и компьютерных технологий и физическом факультете БГУ (РБ), а также на физическом факультет КНУ им. Т.Шевченко (г. Киев, Украина); на факультете оптико-электронных приборов МГТУ им. Н.Э. Баумана, на факультетах оптического приборостроения, аэрокосмических съемок и фотограмметрии МИИГАиК (г. Москва), на факультете приборов и систем кино и телевидения ГУКиТ, на факультете оптико-информационных систем и технологий НИУ ИТМО (г. Санкт-Петербург), на инженерно-технологическом факультете СГАУ им. С.П. Королева (г. Самара), на приборостроительных факультетах ГОУ ВПО СГГА и НГТУ (г. Новосибирск).

Научные исследования в области моделирования зеркальных анастигматических систем и практические разработки перспективных схем трех- и четырехзеркальных объективов с увеличенным полем зрения и светосилой рекомендуется реализовать в производстве и научных исследованиях в организациях оптической отрасли, занимающихся созданием оптико-электронной аппаратуры. В Республике Беларусь: БелОМО, ОАО «Пеленг», институт физики НАН Беларуси, РУП «КБТМ–ОМО», НП РУП «ЛЭМТ», РУП Приборостроительный завод «Оптрон», НИ РУП

«Геоинформационные системы», ИП «Белтекс Оптик», ЗАО «СОЛАР ЛС»; в РФ: НПО «Астрофизика», Главный астрономический институт им. П.К. Шенберга, Технологический парк космонавтики «Линкос» (г. Москва), НИИ телевидения, ГАО РАН (г. Санкт-Петербург), Институт Солнечно-Земной физики СО РАН (г. Иркутск), НИИ радиофизики (г. Н.Новгород), в Украине: Казенное предприятие специального приборостроения «Арсенал», НИИ Крымская обсерватория и ряде других предприятий.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

2. Артюхина, Н.К. Исследование двухзеркальных апланатических объективов / Н.К. Артюхина, А.В. Богатко // Вестник БНТУ. – 2003. – № 1. – С. 48–51.

3. Артюхина, Н.К. Классификация четырехзеркальных анастигматов с двойным зеркалом / Н.К. Артюхина, А. П. Шкадаревич // Доклады НАН Беларуси. – 2005. – Т. 49, № 1. – С. 43–46.

4. Артюхина, Н.К. Зеркальный объектив с планастигматической коррекцией / Н. К. Артюхина, К. К. Василенок, В. И. Крумкач // Известия БИА. – 2005. – № 1(19) – С. 30–34.

5. Артюхина, Н.К. Четырехзеркальные объективы с промежуточным изображением / Н.К. Артюхина // Вестник БНТУ. – 2005. – № 4 – С. 46–49.

6. Artyukhina, N.K. Mirror Recording system with a Large Field of View / N.K. Artyukhina, A.P. Shkadarevich // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2005. – Vol. 78, No 6. – P. 1231–1236.

7. Артюхина, Н.К. Система из двух сферических зеркал с двойным отражением / Н.К. Артюхина // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72, № 10. – С. 57–59.

8. Артюхина, Н.К. Зеркальная анастигматическая система / Н.К. Артюхина // Вести НАН. Серия физ.-техн. наук. – 2006. – № 4. – С. 57–59.

9. Артюхина, Н.К. Расчет деформаций несферических поверхностей в четырехзеркальных системах. / Н.К. Артюхина // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 3. – С. 102–105.

10. Артюхина, Н.К. Композиция зеркальной анастигматической афокальной системы / Н.К. Артюхина, Н.В. Корсак // Вестник БНТУ. – 2006. – № 1 – С. 41–44.
11. Артюхина, Н.К. Методика расчета панкратических зеркальных объективов / Н.К. Артюхина, А.П. Шкадаревич // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 2. – С. 82–85.
12. Артюхина, Н.К. Двухзеркальный анастигмат с плоским полем изображения / Н.К. Артюхина, А.В. Богатко // Вестник БНТУ. – 2006. – № 4. – С. 38–40.
13. Artyukhina, N.K. Corrected mirror systems with double reflection / N.K. Artyukhina, A.P. Shkadarevich // Journal of Applied Spectroscopy. – 2007. – Vol. 74, № 3. – P. 300–304.
14. Артюхина, Н.К. Расчет и исследование анастигматической зеркальной системы / Н.К. Артюхина, С.Я. Прислопский // Вестник БНТУ. – 2007. – № 1. – С. 42–46.
15. Артюхина, Н.К. Теоретические основы абберационной коррекции в четырехзеркальных объективах / Н.К. Артюхина // Доклады НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 4. – С. 81–85.
16. Артюхина, Н.К. Анастигматы с двойным зеркалом, имеющие действительное промежуточное изображение / Н.К. Артюхина // Вес. нац. техн. ун-та Украины «КПИ». Сер. Приборостроение. – 2007. – № 34. – С. 68 – 75.
17. Артюхина, Н.К. Компактные системы с четырьмя отражениями от зеркал / Н.К. Артюхина // Вес. нац. техн. ун-та Украины «КПИ». Сер. Приборостроение. – 2008. – № 35. – С. 42 – 48.
18. Артюхина, Н.К. Объектив с двойным проходом лучей / Н.К. Артюхина, А.В. Богатко // Известия вузов Рос. Фед.. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 1. – С. 69–70.
19. Артюхина, Н.К. Зафокальные и предфокальные зеркальные системы / Н.К. Артюхина, Э.П. Мицкевич // Вестник БНТУ. – 2008. – № 5. – С. 47–50.
20. Artyukhina, N.K. Mirror objectives with variable focal length / N.K. Artyukhina, A.P. Shkadarevich // Journal of Applied Spectroscopy. – 2009. – Vol. 76, № 3. – P. 427–432.
21. Артюхина, Н.К. Состояние и перспективы развития четырехзеркальных анастигматов / Н.К. Артюхина // Вес. нац. техн. ун-та Украины «КПИ». Сер. Приборостроение. – 2009. – № 37. – С. 14–22.
22. Артюхина, Н.К. Предложения по терминологии и обозначениям в абберационных оптических расчетах / Н.К. Артюхина // Метрология и приборостроение. – 2009. – № 2 – С. 21–24.

23. Артюхина, Н.К. Особенности построения видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли из космоса / Н.К. Артюхина, М.Н. Котов // Приборы и методы измерений. – 2009. – № 2 – С. 56–62.

24. Артюхина, Н.К. Параметрические характеристики и системный анализ принципов построения схем из трех зеркал / Н.К. Артюхина // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 1 – С. 40–43.

25. Артюхина, Н.К. Анализ схемных решений децентрированных двухзеркальных систем / Н.К. Артюхина // Вестник БНТУ. – 2010. – № 4. – С. 36–39.

26. Артюхина, Н.К. Принципы построения светозащитных бленд и методика расчета диаграмм виньетирования в четырехзеркальных анастигматах / Н.К. Артюхина // Вес. нац. техн. ун-та Украины «КПИ». Сер. Приборостроение. – 2010. – № 39. – С. 34–41.

27. Артюхина, Н.К. Трехзеркальный длиннофокусный объектив-анастигмат / Н.К. Артюхина, Н. Н. Тульева // Вести НАН. Серия физ.-техн. наук. – 2010. – № 4. – С. 93–99.

28. Артюхина, Н.К. Параметрическая оценка чувствительности оптической системы к погрешностям изготовления / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 1 – С. 25–29.

29. Артюхина, Н.К. Методика расчета новых композиций двухзеркальных анастигматических систем / Н.К. Артюхина, А.П. Шкадаревич // Доклады НАН Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 3. – С. 59–63.

30. Артюхина, Н.К. Моделирование солнцезащитных бленд оптико-электронных звездных аппаратов / Н.К. Артюхина, М.Н. Котов, В.И. Крумкач // Вес. нац. техн. ун-та Украины «КПИ». Сер. Приборостроение. – 2011. – № 41. – С. 21–25.

31. Артюхина, Н.К. Системный анализ принципов проектирования и классификация солнцезащитных бленд оптико-электронных звездных аппаратов / Н.К. Артюхина, В.И. Крумкач, М.Н. Котов, А.П. Иванов // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 4 – С. 13–19.

32. Артюхина, Н.К. Оптехника двухзеркальных анастигматов / Н.К. Артюхина // Вести НАН. Серия физ.-техн. наук. – 2012. – № 1. – С. 105–111.

Депонированные статьи, статьи в сборниках научных трудов и материалов конференций

33. Артюхина, Н.К. Светосильный зеркальный планастигмат / Н.К. Артюхина // Приборостроение. – 1989. – Вып. 11 – С. 34–37.

34. Артюхина, Н.К. К вопросу коррекции кривизны изображения в четырехзеркальных объективах / Н.К. Артюхина // Наука – образованию,

производству, экономике: материалы 2-й междунар. науч.-тех. конф.: в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2004. – Т.1. – С. 238–241.

35. Артюхина, Н.К. Зеркальная концентрическая система / Н.К. Артюхина, А.В. Богатко // Прикладная оптика 2004: материалы 6-й междунар. конф. Санкт-Петербург, 18-21 окт. 2004 г.: в 4 т. / ГОИ им. С.И. Вавилова [и др.]; редкол.: В. Б. Карасев [и др.]. – СПб., 2008. – Т. 1. – С. 255. – Т. 3. – С. 305.

36. Артюхина, Н.К. Зеркальные объективы с четырьмя отражениями / Н.К. Артюхина, А.В. Богатко, В.А. Марчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 3-й междунар. научн.-тех. конф.: в 2т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2006. – Т.1. – С. 273–276.

37. Артюхина, Н.К. Трехзеркальная анаберрационная телескопическая система / Н.К. Артюхина, С.Я. Прислопский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 6-й междунар. научн.-техн. конф., посвящ. 85-летию БНТУ, Минск, 5-30 апр. 2005 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: В.И. Шамкалович [и др.]. – Минск, 2005. – С. 23–26.

38. Артюхина, Н.К. Оптика осветительных устройств микроскопов / Н.К. Артюхина, Э.П. Мицкевич // Приборостроение: материалы 61-й науч.-тех. конф. преподавателей, научных работников, аспирантов, магистрантов и студентов приборостроительных специальностей, посвящ. 85-летию БНТУ, Минск, 15–30 апр. 2005 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: В.И. Шамкалович [и др.]. – Минск, 2005. – С. 26–32.

39. Артюхина, Н.К. Зеркальные объективы с двойным зеркалом / Н.К. Артюхина, Р.С. Гончаров // Приборостроение: материалы 62-й науч.-тех. конф. студентов, магистрантов, аспирантов, преподавателей и научных работников приборостроительных специальностей, Минск, апрель-июнь, 2006 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2007. – С. 19–29.

40. Артюхина, Н.К. Компактные зеркальные системы с четырьмя отражениями / Н.К. Артюхина // Оптика XXI век: материалы 4-го междунар. оптического конгресса, Санкт-Петербург, 16–20 окт. 2006 г.: в 4 т. / ГОИ им. С.И. Вавилова [и др.]; редкол.: В.Б. Карасев [и др.]. – СПб., 2006. – Т. 1. – С. 53.

41. Артюхина, Н.К. Анализ оптики видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли / Н.К. Артюхина, М.Н. Котов, В.А. Марчик // Новые направления развития приборостроения: материалы 64-й Республ. студ. науч.-техн. конф., Минск, 22-23 мая, 2008 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2008. – С. 6–8.

42. Артюхина, Н.К. Высокоапертурный объектив с зеркалом Манжена для ультрафиолетовой области спектра / Н.К. Артюхина, Э.П. Мицкевич //

Новые направления развития приборостроения: материалы 64-й Республ. студ. науч.-тех. конф., Минск, 22-23 мая, 2008 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2008. – С. 3–6.

43. Артюхина, Н.К. Композиция оптических систем из концентрических зеркал / Н.К. Артюхина, Н.А. Володько // Приборостроение – состояние и перспективы: материалы 7-й междунар. научн.-тех. конф., Киев, 22–23 апр. 2008 г. / Нац. техн. ун-т «КПИ» ; редкол: Г.С. Тымчик [и др.]. – Киев, 2008. – С.63–64.

44. Артюхина, Н.К. Перспективы развития современных зеркальных систем / Н.К. Артюхина // Приборостроение 2008: материалы 1-й междунар. науч.-техн. конф., Минск 12-14 ноября 2008 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: О.К. Гусев [и др.].– Минск, 2008. – С. 246–247.

45. Артюхина, Н.К. Зеркальные объективы с переменным фокусным расстоянием / Н.К. Артюхина, А.В. Богатко // Прикладная оптика 2008: материалы 7-й Междунар. конф., Санкт-Петербург, 20–24 окт. 2008 г.: в 4 т. / ГОИ им. С.И. Вавилова, ОО им. Д.С. Рождественского; редкол.: В.М. Арпишкин [и др.]. – СПб., 2008. – Т. 1. – С. 218.

46. Артюхина, Н.К. Трехзеркальный длиннофокусный объектив /Н.К. Артюхина, Н.Н. Тульева // Приборостроение 2009: материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 нояб. 2009 г. / Белорус. нац. техн. ун-т [и др.]; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – С. 246–247.

47. Артюхина, Н.К. Программы для расчета и корректировки закона движения компонентов панкратических систем / Н.К. Артюхина, Н.Е. Кунделева, В.А. Марчик // Приборостроение 2009: материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 нояб. 2009 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – С. 250–251.

48. Артюхина, Н.К. Трезеркальный объектив с промежуточным изображением / Н.К. Артюхина, Н.Н. Тульева // Оптика XXI век: материалы 6-го междунар. оптического конгресса, Санкт-Петербург, 18–21 окт. 2010 г.: в 3 т. / ГОИ им. С.И. Вавилова [и др.]; редкол.: В.М. Арпишкин [и др.]. – СПб., 2010. – Т. 1. – С. 283–287.

49. Артюхина, Н.К. Методика параметрического расчета трехзеркальной концентрической системы / Н.К. Артюхина, Н.В. Гусакова, Т.Р. Ключко // Приборостроение 2010: материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию БНТУ, Минск, 11-13 нояб. 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т [и др.]; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – С. 207–208.

50. Артюхина, Н.К. Зеркально-линзовые светосильные объективы с корректором Манжена / Н. К. Артюхина, Е. А. Приходько // Приборостроение–2010: материалы 3-й междунар. научн.-тех. конф., посвящ. 90-летию БНТУ,

Минск, 11-13 нояб. 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – С. 26–27.

51. Артюхина, Н.К. Программа для интеграции ППП Опал и ПП Zemax / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик // Приборостроение 2011 – состояние и перспективы: материалы 10-й междунар. науч.-тех. конф., Киев, 19–20 апр. 2011 г. / Нац. техн. ун-т «КПИ»; редкол: Г.С. Тымчик [и др.]. – Киев, 2011. – С.74–75.

52. Артюхина, Н.К. Светосильный зеркальный объектив для дальнего инфракрасного диапазона / Н.К. Артюхина, Т.Р. Ключко // Приборостроение 2011: материалы 4-й междунар. научн.-тех. конф., Минск, 16-18 нояб. 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2011 – С. 259–260.

53. Артюхина, Н.К. Моделирование трехзеркального внеосевого объектива без центрального экранирования в программной среде Zemax / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик, И. А. Мощенков // Приборостроение 2011: материалы 4-й междунар. научн.-тех. конф., Минск, 16-18 нояб. 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2011 – С. 260–261.

Учебно-методические пособия

54. Артюхина, Н.К. Теория оптических систем и техническая оптика: метод. пособие / Н.К. Артюхина; Мин-во высшего и среднего спец. образования БССР, БПИ. – Минск, 1985. – 21 с.

55. Артюхина, Н.К. Задачи с решениями по курсу «Теория оптических систем»: метод. пособие / Н.К. Артюхина, С.А. Пашкевич; Мин-во высшего и среднего спец. образования БССР, БПИ. – Минск, 1996. – 64 с.

56. Артюхина, Н.К. Теория и расчет оптических систем: учеб. пособие: в 2 ч. с грифом Мин-вом образ. Республики Беларусь / Н.К. Артюхина; Мин-во образования Респ. Беларусь, БНТУ. – Минск, 2004. – Ч. 1. – 134 с.

57. Артюхина, Н.К. Компьютерное проектирование оптических систем: учеб-метод. пособие: в 2 ч. с грифом УМО Республики Беларусь / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик; Мин-во образования Респ. Беларусь; БНТУ. – Минск, 2007. – Ч. 1: Анализ центрированных оптических систем. – 105 с.

58. Артюхина, Н.К. Компьютерное проектирование оптических систем: учеб-метод. пособие: в 2 ч с грифом УМО Республики Беларусь / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик; Мин-во образования Респ. Беларусь, БНТУ – Минск, 2007. – Ч. 2: Оптимизация центрированных оптических систем. – 62 с.

59. Артюхина, Н.К. Техническая оптика: учеб-метод. пособие с грифом УМО Республики Беларусь / Н.К. Артюхина; Мин-во образования Респ. Беларусь, БНТУ – Минск, 2009. – 43 с.

Тезисы докладов на конференциях

60. Артюхина, Н.К. Особенности расчета нецентрированных двухзеркальных систем с одной плоскостью симметрии / Н.К. Артюхина // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 53-й междунар. науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, аспирантов и студентов БГПА: в 7 ч. / Белорус. гос. политех. акад. – Минск, 1999 г. – Ч. 2 – С. 16.

61. Артюхина, Н.К. Классификация зеркальных анастигматов / Н.К. Артюхина, О.И. Панько // НИРС-2003: материалы VIII Республ. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов: Минск, 9–10 дек. 2003 г.: в 7 ч. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. Б.М.Хрусталеv [и др.]– Минск, 2003. – Ч. 2. – С. 105.

62. Артюхина, Н.К. Схемные решения зеркальных объективов с переменным фокусным расстоянием / Н.К. Артюхина, А.В. Богатко // НИРС-2003: материалы VIII Республ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 9–10 дек. 2003г.: в 7 ч. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. Б.М.Хрусталеv [и др.]– Минск, 2003. – Ч. 2 – С. 108.

63. Артюхина Н.К., Марчик В.А., Иванченко А.К., Володько Н.А. Асферические поверхности оптических элементов – расчёт технологических показателей // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 5-й междунар. науч.-тех. конф.: в 2т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: Б.М. Хрусталеv [и др.]– Минск, 2007. – Т.1. – С. 16–19.

64. Артюхина, Н.К. Опыт и перспективы использования программной системы ОПАЛ на кафедре «Лазерная техника и технология» БНТУ / Н.К. Артюхина, Н.Е. Кунделева, В.А. Марчик // Оптика XXI век: материалы 5-го междунар. опт. конгресса, Санкт-Петербург, 23–24 окт. 2008 г.: в 4 т. / ГОИ им. С.И. Вавилова [и др.]; редкол.: В.Б. Карасев [и др.]– СПб., 2008. – Т. 4. – С. 60.

65. Артюхина, Н.К. Принципы построения компактных схем многозеркальных объективов / Н.К. Артюхина, М.П. Демеш // Новые направления развития приборостроения: материалы 2-й междунар. студ. науч.-тех. конф., Минск, 22-24 апр. 2009 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: В.Л. Соломахо [и др.]– Минск, 2009. – С. 9.

66. Артюхина, Н.К. Графическая интерпретация оценки качества изображения в зеркальных объективах / Н.К. Артюхина, Д.В. Малышев, В.А. Марчик // Новые направления развития приборостроения: материалы 2-й междунар. студ. науч.-тех. конф., Минск, 22-24 апр. 2009 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: В.Л. Соломахо [и др.]– Минск, 2009. – С. 12.

67. Артюхина Н.К. Расфокусированная зеркальная афокальная система / Н.К. Артюхина, Н.Н. Тульева, А.А. Швец // Новые направления развития приборостроения: материалы 2-й междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, 22-24 апреля 2009г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол: В.Л. Соломахо [и др.]– Минск, 2009. – С.13.

68. Артюхина, Н.К. Параметрический синтез четырехзеркальных анастигматов / Н.К. Артюхина, Т.И. Грицкевич // Новые направления развития приборостроения: материалы 3-й междунар. студ. науч.-тех. конф., Минск, 21-23 апр. 2010г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2010. – С. 189.

69. Артюхина, Н.К. Использование программной среды Zemax для расчета оптических систем с учетом когерентного излучения / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик, К.Г. Суборев, С.В. Чергейко // Новые направления развития приборостроения: материалы 4-й междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 апр. 2011 г.: в 3т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Т.2 – Минск, 2011 г. – С. 37.

70. Артюхина, Н.К. Исследование зеркальных концентрических систем с различным числом отражений / Н.К. Артюхина, Н.В. Гусакова // Новые направления развития приборостроения: материалы 4-й междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 апр. 2011 г.: в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2 – С. 12.

Авторские свидетельства и патенты

71. Телеобъектив: а.с. 879539 СССР, МКИ G 02 В 13/02 / Н.К. Артюхина, Н.И. Куликовская, М.И. Слоущ, А.И. Хонинева, Н.А. Черняк. – № 2901193/18-10; заявл. 31.03.80; опубл.07.11.81 // Бюл. изобр. – 1981. – № 41.

72. Объектив с вынесенным зрачком: а.с. 905791 СССР, МКИ G 02 В 11/34 /Н.К. Артюхина, Н.И. Куликовская, М.И. Слоущ, А.И. Хонинева, Н.А. Черняк. – № 2921841/18-10; заявл. 07.05.80; опубл.15.02.82 // Бюл. изобр. – 1982. – № 6.

73. Ахроматический объектив: а.с. 907496 СССР, МКИ G 02 В 11/34/ Н.К. Артюхина, Н.И. Куликовская, М.И. Слоущ, А.И. Хонинева, Н.А.Черняк. – № 2948859/18-10; заявл. 02.07.80; опубл.23.02.82 // Бюл. изобр. – 1982. – № 7.

74. Объектив: а.с. 932443 СССР. МКИ G 02 В 11/34 /Н.К. Артюхина, Н.И. Куликовская, М.И. Слоущ, А.И. Хонинева, Н.А. Черняк. – № 2955868/18-10; заявл. 11.07.80; опубл. 30.05.82// Бюл. изобр. – 1982. – № 20.

75. Зеркальный объектив с четырьмя отражениями: пат. 4111 Респ. Беларусь G02В 17/02 / Н.К. Артюхина, Д.В. Константинов; заявитель БГПА. – № 960476; заявл. 24.09.96; опубл. 30.09.01 // Оф. бюл. – 2001. – № 3.

76. Зеркальный панкратический объектив: пат. 8485 Респ. Беларусь, МКИ G02В 17/02, 17/06 / Н.К. Артюхина, А.А. Богатко; заявитель БНТУ. – № а 20031041; заявл. 13.11.03; опубл. 30.06.05 // Оф. бюл. – 2006. – № 5.

77. Зеркальный объектив с четырьмя отражениями: пат. 9022 Респ. Беларусь G02В 17/06, 17/02 / Н.К. Артюхина, А.В. Богатко, Н.А. Толстик;

заявитель БНТУ. – № а 20040482; заявл. 27.05.2004; опубл. 12.12.06 // Оф. бюл. – 2007. – № 2.

78. Зеркальный объектив: пат. 4518 Респ. Беларусь, МКИ G02В 17/00 / Н.К. Артюхина; заявитель БНТУ. – № и 20070762; заявл. 01.11.07; опубл. 15.04.08 // Оф. бюл. – 2008. – № 6.

79. Зеркальный объектив: пат. 11762 Респ. Беларусь, МКИ G02В 17/02, 17/06 / Н.К. Артюхина; заявитель БНТУ. – № а 20070834; заявл. 05.07.03; опубл. 28.02.09 // Оф. бюл. – 2009. – № 1.

80. Зеркальный объектив с четырьмя отражениями: пат.6320 Респ. Беларусь, МКИ G02В 17/00 /Н.К. Артюхина, М.П. Демеш; заявитель БНТУ. – № и 20090981; заявл. 24.11.09; опубл. 30.06.10 // Оф. бюл. – 2010. – № 3.

81. Патент РБ № 7514 на полезную модель «Зеркальный объектив» / Артюхина Н.К. // Оф. бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы. – 2011. – № 4. – Заявка № и 2010 1063 – от 24.12.2010.

82. Патент РБ № 7427 на полезную модель «Зеркальный объектив» / Артюхина Н.К., Гусакова Н.В. // Оф. бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы. – 2011. – № 4. – Заявка № и 2010 – 1061 – от 24.12.2010.

РЭЗЮМЕ

Арцюхіна Ніна Канстанцінаўна

МАДЭЛІРАВАННЕ І РАСПРАЦОЎКА ЛЮСТРАНЫХ АНАСТЫГМАТЫЧНЫХ СІСТЭМ

Ключавыя словы – оптаэчніка, люстраная сістэма, карэкцыя аберацый, аптымізацыя, абнаўленне камп'ютарных праграм, разлік аптычных схем, анастыгматычных аб'ектываў, люстраны маналіт, зводка асноўных параметраў сістэмы, якасць выявы.

Аб'ект даследавання – якасная і колькасная ацэнка габарытных і аберацыйных параметраў люстраных сістэм. **Прадмет даследавання** – сістэма базавых і аптымізацыйных мадэляў, структура і змест элементаў, якія дазваляюць павысіць магчымасці і параметры новых аптычных і оптыка-электронных апаратаў.

Мэта працы – мадэліраванне і сістэматызацыя пошуку новых кампазіцый люстраных анастыгматычных сістэм, развіццё разлікова-метадычнай базы і стварэнне інжынерна-тэхнічных метадаў для даследавання і распрацоўкі такіх мадэляў.

Распрацаваны новыя схемныя рашэнні і класіфікацыя чатырохлюстраных анастыгматаў розных тыпаў; прынцыпу стварэння універсальнай канцэптуальнай мадэлі аберацыйнага і параметрычнага алгарытму разліку; тэарэтычныя асновы сістэматызацыі і праектаванне люстраных анастыгматычных сістэм; метадалогія разліку дэфармацый люстраных паверхняў; метадыка стварэння блэнд і алгарытм ацэнкі віньетыравання; метадыкі комплекснага даследавання люстраных сістэм з ізапланатычнымі, панкратычнымі і дэцэнтрычнымі элементамі; дадзены прапановы па тэрмінах і абазначэннях аберацыйных разлікаў люстранай оптыкі.

Вынікі рэалізаваны пры стварэнні оптыка-электроннай апаратуры дыстанцыйнага зандавання Зямлі з космасу і іншых даданняў у шэрагу прамысловых і навуковых прадпрыемстваў у краіне і за мяжой, выкарыстаны ў метадычных рэкамендацыях і прыкладных алгарытмах для вучэбнага працэса ў дысцыплінах аптычнага цыклу і праектных разліках шматлюстраных анастыгматаў, выкарыстанне якіх дазволіла стварыць патэнтныя мадэлі.

РЕЗЮМЕ

Артюхина Нина Константиновна

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЗЕРКАЛЬНЫХ АНАСТИГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ключевые слова – оплотехника, зеркальные системы, коррекция aberrаций, оптимизация, обновление компьютерных программ, расчет оптических схем, анастигматический объектив, зеркальный монолит, сводка основных параметров системы, качество изображения.

Объект исследований – зеркальные системы, их качественная и количественная оценка габаритных и aberrационных параметров. **Предмет** исследований – система базовых и оптимизационных моделей, структура и содержание элементов, позволяющих повысить функциональные возможности и оптические характеристики новых оптических и оптико-электронных приборов.

Цель работы – моделирование и систематизация поиска новых композиций зеркальных анастигматических систем, развитие расчетно-методической базы и создание инженерных методов для исследования и разработки таких моделей.

Разработаны новые схемные решения и классификация четырехзеркальных анастигматов различных типов; принципы создания универсальной концептуальной модели aberrационного и параметрического алгоритма расчета; теоретические основы систематизации и проектирования зеркальных анастигматических систем; методология расчета деформаций зеркальных поверхностей; методика проектирования блендов и алгоритм оценки виньетирования; методики комплексного исследования зеркальных систем с изопланатическими, панкратическими и децентрированными элементами; даны предложения по терминам и обозначениям aberrационных расчетов зеркальной оптики.

Результаты реализованы при создании оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли из космоса и других приложений в ряде промышленных и научных предприятий в стране и за рубежом, использованы в методических рекомендациях и прикладных алгоритмах для учебного процесса по дисциплинам оптического цикла и проектных расчетов многозеркальных анастигматов, применение которых позволило создать патентные модели.

SUMMARY

Nina K. Artioukhina

DESIGNING AND DEVELOPMENT OF MIRROR ANASTIGMAT SYSTEMS

Keywords: calculation optics, mirror systems, aberration correction, an optimization, optical design, refresh extension list, the anastigmatic objective, a catoptric lens, system summary graphic, image quality

The object of the research - the mirror systems, the qualitative and quantitative evaluation of the design factors and aberration parameters. **The subject** of the research - the basic and optimizing model systems, structure and contents of elements that allows improving the functional possibilities and optical data of new optical and optoelectronic instruments.

The thesis purpose - modeling and systematization of searching for new composition of the anastigmatic mirror systems, development accounting-methodical base and making the engineering methods for research and development of such models.

The new scheme decisions and classification of four-mirror anastigmats of the different types **are designed**; the principles of the creation to universal conceptual model aberration and parametric algorithm of the calculation; the theoretical fundamentals to systematizations and designing mirror anastigmatic systems; the methodology of the calculation of mirror surfaces asphere deformation constants; the methods of the designing baffles and algorithm of the vignetting factor estimation; the methodses of the complex investigation of the mirror systems with aplanatic, mirror zoom and decenter elements; offers are given on term and indications aberration calculation mirror optiess.

The results marketed when making optoelectronic instruments of the remote flexing the cosmos Earth and the other applications in row industrial and scientific enterprises in country and overseas, are used in methodical recommendation and applied algorithm for scholastic process on discipline of the optical cycle and design calculation multi- mirror anastigmats, which using has allowed to create the patent models.