

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

УДК 535.317

**ПЕРОСА ФЛОРЕС**  
**Лаура Виктория**

**ЗЕРКАЛЬНЫЕ АФОКАЛЬНЫЕ АНАСТИГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
С ПАРАБОЛИЧЕСКИМ ГЛАВНЫМ ЗЕРКАЛОМ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.11.07 - оптические и  
оптико-электронные приборы и комплексы

Минск, 2021

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель: **Артюхина Нина Константиновна**  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Лазерная  
техника и технология» БНТУ

Официальные оппоненты: **Зеневич Андрей Олегович**  
доктор технических наук, профессор,  
ректор учреждения образования  
«Белорусская государственная  
академия связи»

**Трапашко Георгий Алексеевич**  
кандидат технических наук,  
начальник отдела ОАО «Планар»

Оппонирующая организация: Научно-исследовательское учреждение  
«Институт прикладных физических  
проблем имени А. Н. Севченко»  
Белорусского государственного  
университета

Защита состоится «01» октября 2021 г. в 14<sup>15</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 в Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, ауд. 202.

Телефон ученого секретаря (017) 293-96-18, e – mail: D.02.05.17@bntu.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь совета по  
защите диссертаций Д 02.05.17,  
кандидат технических наук

Н.Н. Ризноокая

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время существенно расширился спектральный диапазон работы оптико-электронных приборов (ОЭП). Такие приборы решают разнообразные научно-технические задачи, что налагает определенные требования на выбор схем оптики и расчет оптических систем. На передовые позиции выходит зеркальная оптика. Широкое применение зеркальных систем обусловлено некоторыми их достоинствами: термической стабильностью, высоким разрешением в широком спектральном диапазоне, снижением весовых характеристик оптических систем и отсутствием дефектов изображения, возникающих из-за хроматических аберраций. Среди чисто зеркальных возможно построение фокусирующих систем (объективов), когда свойства паракиального изображения моделируются с помощью фокусного расстояния и афокальных систем, где эквивалентное фокусное расстояние бесконечно.

Основные направления современной оплотехники в области зеркальной оптики: поиск новых схемных решений, включая оригинальные схемы на основе нетрадиционных элементов, использование классических систем, как базовых модулей, в разрабатываемой композиции. Требуется улучшение технических характеристик зеркальной системы по полю зрения и апертуре, а также качества коррекции аберраций.

Исследования по разработке зеркальных систем широко опубликованы в работах белорусских и зарубежных ученых: основной акцент в них сделан на расчет фокусирующих объективов. Достаточно хорошо изучены двух- и трехзеркальные объективы, в области афокальных зеркальных систем получены отдельные варианты, которые не дают полного представления о возможности получения повышенных технических характеристик.

Вопросы по проектированию и моделированию зеркальных афокальных систем, касающиеся габаритного и аберрационного расчета, коррекции астигматизма и кривизны изображения, созданию инженерно-технических методик оценки центрального экранирования, виньетирования, защиты плоскости изображения от постороннего света, требуют дальнейшего исследования, поэтому дальнейшее изыскание в этой области своевременно и актуально.

В диссертационной работе поставлены и решены задачи по разработке новых композиций зеркальных афокальных анастигматических систем с параболическим главным зеркалом, а также созданию методик аберрационного и параметрического расчета, учитывающих видимое увеличение системы и относительное отверстие параболического зеркала.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы, утвержденным постановлением Совета министров Республики Беларусь от 20. 05. 2015 г., № 797: «Оптические, электронные приборы и оборудование, включая лазерно-оптическое оборудование и технологии;

аналитическое оборудование и приборы контроля качества и сертификации, опто-микро- и нано-электронные системы и устройства).

Тематика диссертационной работы была включена в планы научной работы Белорусского Национального Технического университета, утверждаемые Советом университета и согласованные с Министерством Образования Республики Беларусь. Результаты, полученные в диссертационной работе, связаны с выполнением научно-исследовательской работы: «Разработка новых лазерных материалов и твердотельных лазеров на их основе, светосильных объективов и зеркальных систем, технологии финишной обработки линз малой жесткости, аксиконов и оптических деталей лазерных гироскопов» (ГБ -16-246, 2016–2020 гг.).

Тематика научных исследований диссертационной работы рекомендована Национальным Центром оптических технологий (National center of optical technologies), г. Мерида, Венесуэла (Merida, Venezuela).

### **Цель и задачи исследования**

Цель работы – разработка новых композиций зеркальных афокальных анастигматических систем с параболическим главным зеркалом, а также создание методик абберационного и параметрического расчета, учитывающих видимое увеличение системы и относительное отверстие главного параболического зеркала.

Для осуществления вышеназванной цели в работе ставятся следующие взаимосвязанные задачи.

1. Провести анализ схем афокальных зеркальных систем с главным параболическим зеркалом и определить решения, позволяющие корректировать сферическую абберацию, кому и астигматизм.

2. Разработать математические модели абберационного и параметрического габаритного расчета в области Зейделя предложенных афокальных анастигматических систем с главным параболическим зеркалом. Создать схемы с конфокально расположенными параболическими зеркалами с учетом центрального экранирования и виньетирования, а также афокальные композиции различных увеличений, составленные на основе канонических систем Кассегрена и Грегори, конфокально расположенных с вогнутым параболическим зеркалом.

3. Получить аналитические зависимости, составляющие алгоритм расчета, методики, учитывающие параметр  $\Gamma$  (видимого увеличения), а также оптимальное относительное отверстие главного параболического зеркала.

Исследуемыми объектами являлись афокальные зеркальные системы, составленные на основе классических схем с параболическим главным зеркалом. Предметом исследования являлись оптические характеристики указанных афокальных систем, а также абберационные характеристики изображения в геометрическом и волновом представлении.

### **Научная новизна**

Предложены новые схемные решения афокальных анастигматических зеркальных систем: разработаны системы на основе конфокально расположенных параболических зеркал, в том числе компактная схема с малыми габаритами, а также системы, полученные путем синтеза классических объективов Кассегрена и Грегори с вогнутым параболическим зеркалом, включая модификации с совмещенными

вершинами первого и третьего зеркал, позволяющие обеспечивать видимые увеличения от  $-4^X$  до  $-10^X$  с угловым полем зрения от 1 до 2 градусов при коэффициенте центрального экранирования до 0,35. Проведено моделирование и определены характеристики разработанных схем.

Разработаны математические модели параметрического габаритного и абберационного расчета в области Зейделя новых афокальных анастигматических систем с главным параболическим зеркалом. Получены формулы, учитывающие видимое увеличение зеркальных афокальных систем, составленных на основе классических схем Кассегрена и Грегори, а также аналитические зависимости, определяющие габаритное построение афокальных зеркальных анастигматов с децентрированной апертурной диафрагмой, составленных из параболических зеркал с совмещенными фокусами, имеющих четыре отражения на основе схем Мерсенна.

Адаптированы алгоритмы проектирования предложенных афокальных анастигматических зеркальных систем, учитывающие оригинальные условия нормировки, коэффициент центрального экранирования, а также относительное отверстие параболического главного зеркала.

Разработаны новые методики по компьютерной оценке качества изображения с использованием параксиальных безабберационных элементов, а также в зависимости от вида и версии пакетов прикладных программ по расчету оптики; модернизирована методика построения бленды для защиты изображения и диаграмм виньетирования зеркальной афокальной системы, составленной на основе классического объектива Кассегрена, конфокально расположенного с вогнутым параболическим зеркалом.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

– Новые композиции зеркальных афокальных анастигматических систем на основе классических объективов Грегори и Кассегрена, конфокально расположенных с вогнутым параболическим зеркалом, включая модификации с совмещенными вершинами первого и третьего зеркал, позволяющие обеспечивать видимые увеличения от  $-4^X$  до  $-10^X$  с угловым полем зрения от 1 до 2 градусов при коэффициенте центрального экранирования от 0,2 до 0,35.

– Новые компактные схемы конструкций афокальных анастигматов из трех параболических зеркал, позволяющие за счет оптимизации относительного отверстия первого зеркала уменьшить осевые габариты не менее, чем в два раза по сравнению с базовым модулем Мерсенна и улучшить значения волновых критериев качества изображения: среднеквадратичной ошибки RMS до 0,012 длин волн, радиального размера пятна рассеяния до 1,35 мкм.

– Математические модели параметрического габаритного и абберационного расчета в области Зейделя новых афокальных анастигматических систем с главным параболическим зеркалом, учитывающие аналитические зависимости, определяющие габаритное построение и модификации таких систем (с децентрированной апертурной диафрагмой, с моноблоком из двух зеркал, компактные схемы), позволяющие минимизировать объем расчетных работ при моделировании зеркальных афокальных анастигматических систем; создавать перспективные базовые модели по абберационным свойствам – с коррекцией

кривизны изображения и дисторсии; по конструктивным – с удобным для исследования размещением приемника изображения.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Основные положения, результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы получены соискателем самостоятельно. Автором исследованы и разработаны выносимые на защиту математические модели, методики инженерного проектирования, алгоритмы параметрических расчетов, аналитические зависимости, анализ и оценка характеристик зеркальных оптических систем. Научному руководителю профессору кафедры «Лазерная техника и технология» БНТУ, д.т.н., доценту Артюхиной Н.К. принадлежит общее руководство работой, участие в постановке задач, обсуждение полученных результатов исследования. Соавтор публикаций Марчик В.А. оказывала консультации при проведении компьютерных расчетов оптических систем. Совместно с соавтором Л.Ф. Самбрано усовершенствована и адаптирована методика по расчету светозащитной бленды от постороннего света. Остальные соавторы занимались изучением вопросов, не вошедших в диссертационную работу.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения» (Минск, 2015 – 2018 гг.); Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» (Минск, 2015, 2017 гг.); Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, Україна, 2016 – 2018гг.); Международная молодежная научная конференция «XXIII Туполевские чтения», (Казань, РФ, 2017г.); Международный оптический конгресс «Оптика XXI век», XIII Международная конференция «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург, РФ, 2018 г.).

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе на кафедре «Лазерная техника и технология» БНТУ по дисциплине «Техническая оптика»: описание композиций без центрального экранирования из трех внеосевых зеркал и алгоритм расчета телескопической системы с астигматической коррекцией аберраций (акт внедрения от 14.02. 2019 г.). Результаты исследования по разработке афокальных зеркальных астигматических систем с малыми осевыми габаритами внедрены в Национальном Центре оптических технологий (CNTO) и Центре астрономических исследований (CIDA) в Венесуэле (акт внедрения от 20.04.2020г.).

#### **Опубликованность результатов диссертации**

Материалы диссертационной работы представлены в 21 публикации, из них 5 статей в научных журналах, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 4 статьи в сборниках материалов научных конференций и 11 тезисов докладов, отчет по НИР.

**Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Диссертация включает 120 страниц машинописного текста, в том числе: 31 рисунок на 12 страницах, 15 таблиц на 7 страницах, библиографический список из 128 наименований использованных источников на 10 страницах, список собственных публикаций соискателя из 21 наименования на 3 страницах, 1 приложение на 3 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы.

**Первая глава** разделена на два раздела:

- обзор схемных решений и принципов построения зеркальных систем;
- обзор методов абберационного расчета и абберационных полиномов.

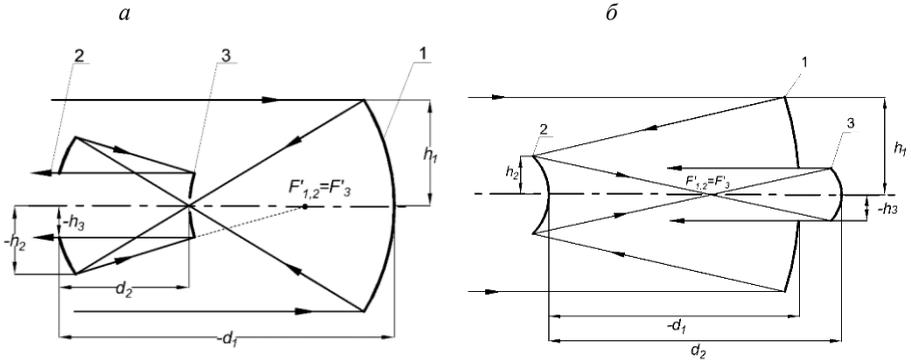
**В разделе 1.1** рассмотрены общие закономерности параметрического проектирования современных центрированных и внеосевых систем из двух, трех и четырех зеркал, некоторых оплотехнических подходов к объектам исследования, определены инженерные составляющие базовых моделей (коэффициент сложности, зависящий от экранирования, вынос плоскости изображения, оптимальное соотношение конструктивных параметров и др.). Определены принципы построения базовых модулей афокальных систем, обоснованы перспективы развития. Показано, что трехзеркальные центрированные системы обладают более широкими коррекционными возможностями по сравнению с двухзеркальными; откорректированы в отношении сферической абберации, комы и астигматизма, что достигается за счет применения зеркал с поверхностями асферического профиля, иногда очень сложной формы. Недостатком их является то, что поверхность изображения в них искривлена и находится в неудобном для исследования месте. Показано, что компактные системы являются более технологичными, чем схемы с разнесенными вершинами зеркал, дающие увеличение центрального экранирования. Определено, что в области моделирования анастигматических зеркальных систем наиболее перспективны системы с моноблоком из двух зеркал, обычно первым и третьим. Задача создания компактных схем актуальна. Известные из обзора отдельные схемы не дают полного представления о потенциальных возможностях проектирования и разработки зеркальных афокальных анастигматических систем, получения повышенных технических характеристик, промышленной адаптации. Вопросы коррекции астигматизма и кривизны изображения, создания инженерно-технических методик оценки центрального экранирования, виньетирования, защиты плоскости изображения от постороннего света, требуют дальнейшего исследования.

**В разделе 1.2** выполнено исследование комплекса современных методов абберационного расчета зеркальных систем, описывающих как алгебраические решения в области Зейделя, так и композиционные, основанные на синтезе базовых модулей и коррекционных компонентов. Полученные формулы преобразованных коэффициентов  $B$ ,  $K$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  для абберационного расчета применимы для определения деформаций  $\sigma_s$ , дающих принципиальную возможность коррекции основных аббераций во всех типах зеркальных анастигматических систем, включая афокальные.

В последующих главах представлен материал исследования проектных модулей зеркальных афокальных анастигматических систем, которые позволяют корректировать три основные абберации: сферическую абберацию, кому и астигматизм: на основе конфокально расположенных параболических зеркал, а также систем, полученные путем синтеза классических объективов Кассегрена и Грегори с вогнутым параболическим зеркалом.

**В второй главе** представлено схемное решение комбинации объектива Грегори и отдельного параболического зеркала, которое является окуляром. В этой системе

наличие промежуточного изображения даёт возможность устранить паразитные лучи с помощью диафрагмы, роль которой выполняет отверстие в третьем компоненте (рисунок 1, а). Получены различные варианты конструктивного решения.



**а** – с объективом Грегори; **б** – с объективом Кассегрена  
**Рисунок 1. – Трехзеркальная телескопическая система**

Окуляр является компенсатором для устранения комы и астигматизма эквивалентной системы из первых двух зеркал без нарушения коррекции сферической аберрации. Кривизна изображения исправляется подбором конструктивных параметров.

Предложена общая схем проектного расчета новых конфигураций трехзеркальных афокальных систем в виде следующих этапов:

– введение условий нормировки (координат 1-го и 2-го нулевых лучей):

$$\alpha_1 = \alpha_4 = 0 \quad h_1 = 1; \beta_1 = 1; \alpha_3 = 1; \text{ (или } \alpha_3 = -1) \quad n_1 = n_3 = 1; n_2 = n_4 = -1$$

при относительном эквивалентном фокусном расстоянии объектива  $f'_{1,2} = 1$ ;

– расчет оптических сил и фокусных расстояний зеркал;

– расчет параметрических характеристик (радиусов кривизны, осевых расстояний, высот падения лучей, координаты, определяющей центральное экранирование);

– расчет монохроматических аберраций 3-го порядка, подлежащих компенсации для выбора структуры корректоров афокальной системы.

Разработан параметрический алгоритм расчета:

1) вычисление параксиального угла  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \frac{3 \cdot \Gamma \pm \sqrt{\Gamma \cdot (5 \cdot \Gamma + 4)}}{2 \cdot (1 - \Gamma)} \quad (1)$$

для заданного значения видимого увеличения  $\Gamma$ ; определение высоты луча  $h_2$  на втором зеркале  $h_2 = \frac{1 + \alpha_2}{\alpha_2 - \Gamma}$  или  $h_2 = \frac{1 + \alpha_2 \cdot (1 - \delta \cdot \Gamma)}{\Gamma \cdot (1 + \alpha_2)}$  (когда третье зеркало расположено на расстоянии  $\delta$  от главного зеркала);

2) расчет высоты луча  $h_3$  на третьем зеркале

$$h_3 = \frac{1}{\Gamma} \quad (2)$$

3) вычисление расстояний между зеркалами  $d_1$  и  $d_2$  по формулам:

$$d_1 = \frac{1 - h_2}{\alpha_2}; \quad d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\alpha_3} = \frac{1 - \Gamma \cdot h_2}{\Gamma}; \quad (3)$$

4) Расчет радиусов всех зеркальных поверхностей:

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}; \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}; \quad r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3} \quad (4)$$

Для устранения основных aberrаций (сферической, комы и астигматизма) использованы деформации  $\sigma_s$ , полученные решением системы aberrационных уравнений  $B_0 = K_0 = C_0 = 0$  (анастигматическая коррекция) в области aberrаций 3-го порядка.

При наличии двух параболических зеркал (деформации  $\sigma_1 = \sigma_3 = -1,0$ ); деформация второго зеркала

$$\sigma_2 = -\left(\frac{\alpha_2 + 1}{\alpha_2 - 1}\right)^2 \quad (5)$$

Исследуемая система будет анастигматом, если

$$-\alpha_2 + \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} - \frac{\alpha_3}{h_3} - 2(S_2 W_2 + S_3 W_3) = 0 \quad (6)$$

План-коррекция  $D_0 = 0$  обеспечивается выполнением условия Петцваля

$$\sum_{s=1}^3 \frac{1}{r_s} \left( \frac{1}{n_{s+1}} - \frac{1}{n_s} \right) = 0 \quad (7)$$

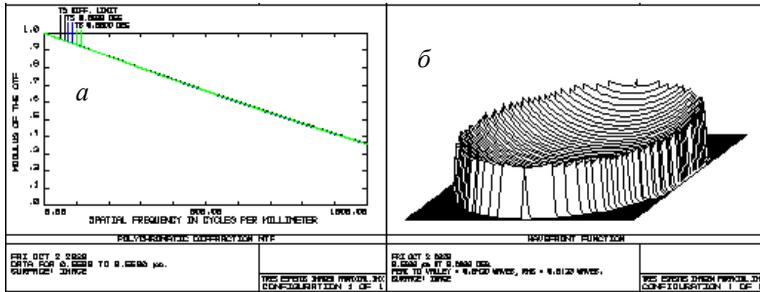
Расчеты по формулам представленного алгоритма определили конструктивные данные нескольких моделей телескопических систем модификации  $-\delta = -f_1'$ , рассчитанных для относительного отверстия объектива Грегори  $D : f_{1,2}' = 1 : 2$ , углового поля зрения  $2\omega = 1^\circ$ . Аберрационные характеристики для видимого увеличения  $\Gamma = -4^x$ ; коэффициента центрального экранирования  $\mathfrak{E} = 0.35$  представлены в таблице 1, где  $\Delta D'$  – продольная сферическая аберрация;  $\Delta'$  – дисторсия;  $L_m - L_S$  – величина астигматической разности;  $\Delta\sigma_{\omega}'$  – угловой размер максимальной фигуры рассеяния по полю зрения. Система обладает хорошей коррекцией аберраций в центре и для края поля зрения.

Таблица 1. – Аберрационные характеристики афокальной системы

| 2 $\omega$ , град | Точка на оси       | Точка вне оси |                    |                                     |
|-------------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------------------------------|
|                   | $\Delta D'$ , дптр | $\Delta'$ , % | $L_m - L_S$ , дптр | $\Delta\sigma_{\omega}'$ , мин, сек |
| 1°                | 0,00017            | 0,0175        | 0,0001             | 2,16"                               |

Компьютерное моделирование и оптимизация волновых критериев в программной среде *Zemax* потребовала дополнительного усовершенствования. Для этого была использована вспомогательная идеальная фокусирующая система – элемент «Paraxial» (параксиальная поверхность) для более точной оценки результатов в линейной мере. Результаты компьютерного моделирования подтвердили исправление аберраций 3-го порядка: сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны изображения

За счет оптимизации параметра асферичности эллиптического зеркала в программной среде *Zemax* улучшены значения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) и пятна рассеяния (рисунок 2). Получены карты волнового фронта в плоскости изображения, которые показывают информацию о коррекции волновых аберраций: среднеквадратичная ошибка волнового фронта порядка 0,129 длин волн. Значения радиального размера пятна рассеяния RMS не превышают 1,339 мкм; радиус GEO – 1,946 мкм; вместе со значениями размера диска Эйри около 2,266 мкм указывают, что качество изображения близко к дифракционному.



*a* – график ЧКХ; *б* – диаграмма волнового фронта  
Рисунок 2. – Карта волновых критериев в плоскости изображения

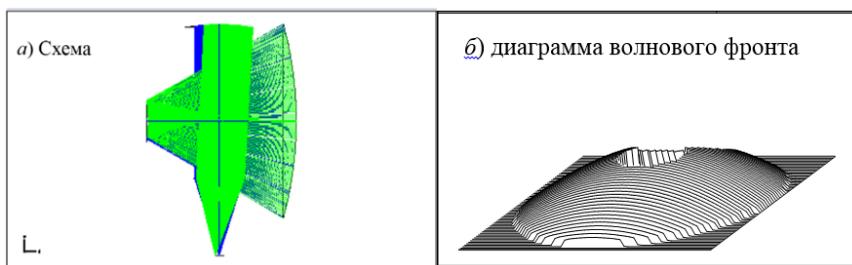
Системы могут быть использованы в ИК-объективах в качестве насадок, позволяющих создавать длиннофокусные композиции за счет видимого увеличения  $\Gamma$ .

Было проведено моделирование афокального анастигмата с объективом Грегори с неэкранированным входным зрачком для устранения центрального экранирования в модификации, когда апертурная диафрагма смещена в меридиональной плоскости на расстояние  $C_m \geq \rho$  ( $\rho$  – радиус входного зрачка). Рассчитаны три варианта зеркальных афокальных схем с неэкранированным входным зрачком для следующих характеристик: угловое поле зрения  $2\omega = 1^\circ, 1^\circ30', 2^\circ$ ; диаметр входного зрачка  $D = 500$  мм, 250 мм; относительное отверстие  $D : f'_{1,2} = 1:2$  и видимое увеличение  $\Gamma = -4^\times, -6^\times$ . Результаты компьютерного моделирования, выполненные в ПП *Zemax* показали, что рассчитанные системы имеют допустимое качество изображения.

**В третьей главе** выполнено исследование новой анастигматической афокальной композиции, полученной путем синтеза классического зеркального объектива Кассегрена, создающего промежуточное изображение, с конфокально расположенным параболическим зеркалом (рисунок 1, б).

Расчет исследуемой афокальной анастигматической зеркальной системы выполнен в виде четырех этапов. На I этапе введены условия нормировки; на II этапе разработан алгоритм параметрического расчета; на III этапе составлена система параметрических уравнений монохроматических аберраций 3-го порядка, подлежащих компенсации. На IV этапе выполнено компьютерное моделирование, оптимизация параметров и обсуждение результатов.

По представленному алгоритму произведен расчет и получены конструктивные данные двух конфигураций зеркальных афокальных анастигматов с модулем Кассегрена, имеющих дополнительное плоское зеркало для удобного вывода из системы пучков лучей. В одной из конфигураций третье вогнутое зеркало расположено за пределами габаритов перпендикулярно оптической оси, переносит промежуточное изображение в бесконечность. Схема компактна и представлена на рисунке 3. Плоское зеркало обеспечивает поворот на угол  $90^\circ$  к оптической оси.



*a* – схема; *б* – диаграмма волнового фронта  
**Рисунок 3. – Карта компьютерного моделирования компактной конфигурации с модулем Кассегрена**

В исследуемых зеркальных системах исправлены сферическая абберация, кома, астигматизм и получено плоское поле изображения:

$$S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0.$$

Расчеты по формулам разработанного алгоритма определили конструктивные данные математических моделей исследуемых конфигураций, рассчитанных для относительного отверстия объектива Кассегрена  $D : f_{1,2} = 1 : 2$ .

Абберационное исследование в ППП *Opal* определило наиболее перспективные варианты для промышленного использования. Проведено компьютерное моделирование системы с видимым увеличением  $\Gamma = -4^{\times}$ ; угловым полем зрения  $2\omega = 2^{\circ}$  при  $D = 250$  мм. Получены значения поперечных аббераций и волновых критериев качества изображения: размера кружка рассеяния и диаграмм волнового фронта (расчет в ПП *Zemax*), а также других абберационных параметров. В диаграммах пятна рассеяния, значения величины радиального размера пятна рассеяния RMS не превышают 1,439 мкм; радиус GEO (величина расстояния от опорной точки) – 1,845 мкм; вместе со значениями размера диска Эйри около 2,549 мкм, указывающие, что качество изображения близко к дифракционному.

Получен алгоритм расчета и построения конструкции бленды для защиты изображения от постороннего света в разработанном афокальном анастигмате и дана графоаналитическая методика оценки виньетирования с помощью диаграмм, определяющих действующее отверстие входного зрачка для определенного угла поля зрения.

**Четвертая глава** посвящена созданию новой группы афокальных зеркальных систем в новых конфигурациях, которые имеют технологические и конструктивные преимущества по сравнению с классическими: а) системы без центрального экранирования; б) компактные схемы. Базовыми схемами (модулями) для новых композиций приняты канонические системы Мерсенна. Рассмотрены два типа систем: с видимым увеличением  $\Gamma > 0$  – I типа (Galilean type) и  $\Gamma < 0$  – II типа (Kepler type). Составлены алгоритмы расчета центрированных афокальных систем с двумя и четырьмя отражениями, которые свободны от сферической абберации, комы и астигматизма при расположении входного зрачка в совмещенных фокальных

плоскостях всех параболических зеркал. В квартпараболической схеме из трех зеркал, являющейся сочетанием двух классических систем Мерсенна, исправлена дополнительно аберрация *кривизны изображения*. Исследованы афокальные схемы с двумя и четырьмя отражениями из *внеосевых* зеркальных параблоидов и составлен алгоритм расчета, получены формулы связи для сочетания канонических афокальных систем из двух зеркал.

Для двухзеркальной системы, составленной из внеосевых параболических зеркал получена сводка формул:

$$\begin{aligned} r_1 &= -4N & d &= 2N \frac{1-\Gamma}{\Gamma} \\ r_2 &= -\frac{4N}{\Gamma} \end{aligned} \quad (8)$$

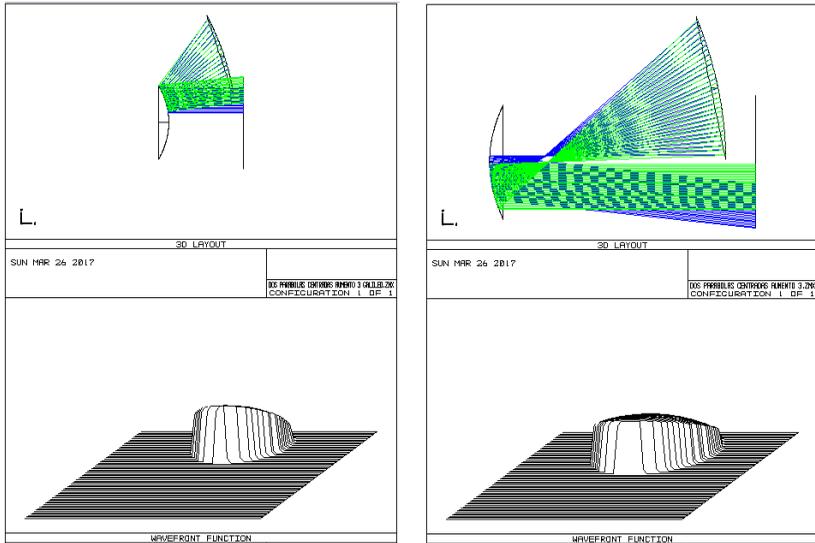
Для двойных систем Мерсенна с неэкранированным входным зрачком имеем следующие формулы:

$$\begin{aligned} h_1 &= 1 & r_1 &= -4N & d_1 &= 2N (h_2 - 1) \\ h_2 &= \frac{1}{\Gamma_1} & r_2 &= -4h_2N & d_2 &= -d_1 \\ h_3 &= h_2 & r_3 &= -4N & d_3 &= -2N \frac{\Gamma - \Gamma_1}{\Gamma} \\ h_4 &= \frac{1}{\Gamma} & r_4 &= -4 \frac{\Gamma_1 N}{\Gamma} \end{aligned} \quad (9)$$

Рассчитаны различные варианты схемных решений для углового поля зрения  $2\omega = 2^\circ$ , диаметра входного зрачка  $D = 500$  мм, величины децентрировки  $Cm = 500$  мм при диафрагменном числе главного зеркала  $N = 0,8$ .

Результаты компьютерного моделирования двухзеркальных систем с внеосевыми зеркалами без экранирования, выполненного в ПП *Zemax*, представлены на рисунке 4.

В результате исследования по *компактности* зеркальных систем была получена новая композиция с малыми осевыми габаритами компактных конструкций с многократным отражением от первичного зеркала, представленных на рисунке 5. Базовыми модулями данных композиций служат квартпараболические системы Мерсенна из трех зеркал.

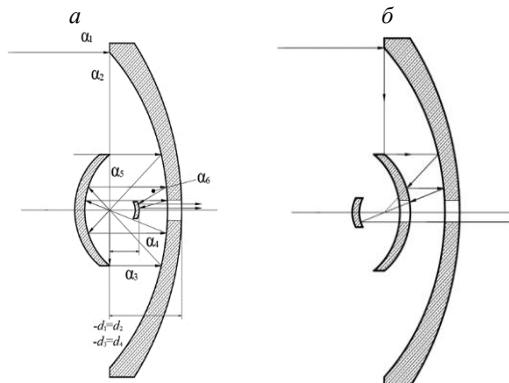


*a* – I типа; *б* – II типа

**Рисунок 4 – Карта моделирования (схемы и диаграммы волнового фронта) двухзеркальных систем с внеосевыми зеркалами**

На рисунке 5, *a* представлена схема кеплеровского типа. Первое и третье зеркала имеют равные радиусы кривизны поверхностей.

Представлен разработанный алгоритм для схемы (рисунок 5, *a*), позволяющий рассчитать необходимые параметрические характеристики для заданных условий нормировки и величины видимого увеличения.



*a* – Kepler type схема; *б* – Galilean type схема

**Рисунок 5 – Компактные афокальные зеркальные системы**

1. Углы и высоты нулевого луча:

$$\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5 = \alpha_7 = 0;$$

$$\alpha_2 = \frac{h_1}{f'_1} = -1; \quad h_4 = h_3 - \alpha_4 d_3; \quad h_2 = h_3; \quad \alpha_4 = \frac{h_3}{f'_1} = -h_3 = -h_2; \quad h_4 = h_5;$$

$$\alpha_6 = \frac{h_4}{f'_1} = -h_4; \quad h_6 = \frac{1}{\Gamma}; \quad h_6 = h_5 - \alpha_6 d_5 \quad (10)$$

2. Воздушные промежутки между зеркалами (осевые расстояния):

$$d_1 = 1 - h_2; \quad d_3 = \frac{h_4 - h_2}{-a_4}; \quad d_5 = \frac{1}{\Gamma h_4} - 1 \quad (11)$$

3. Радиусы поверхностей:

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2} = -2; \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2} = -2h_2; \quad r_3 = \frac{2h_2}{\alpha_4} = -2; \quad r_4 = \frac{2h_4}{\alpha_4}; \quad r_5 = -2;$$

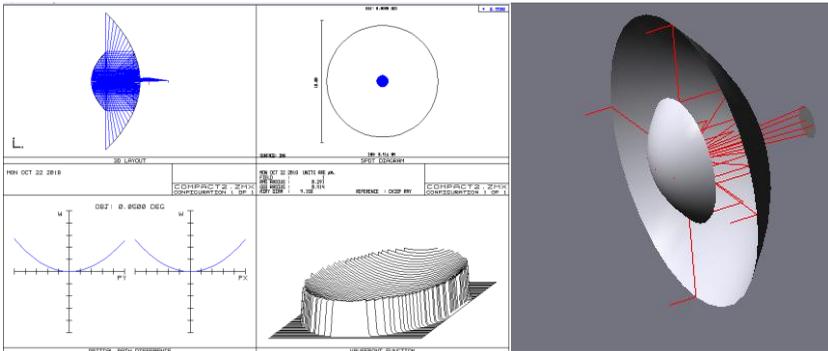
$$r_6 = \frac{2}{h_4 \Gamma} \quad (12)$$

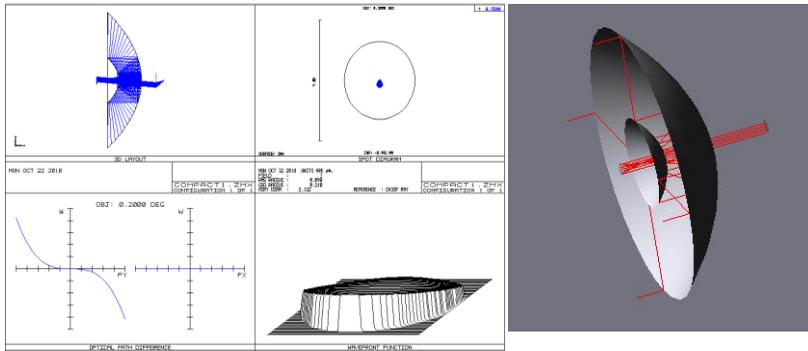
Алгоритм расчета компактной афокальной зеркальной системы Galilean type, изображенной на рисунке 5, б, составлен аналогично.

Получены модули компактных Galilean type и Kepler type схем для заданных оптических характеристик: диафрагменного числа  $N = 0,25$ ; углового поля зрения  $2\omega = 20''$ , диаметров входного зрачка  $D = 35$  мм и 70 мм.

Проведено компьютерное моделирование разработанных конструкций афокальных систем с использованием различных пакетов программных продуктов. Результаты численного моделирования, выполненные в программных средах *Code V* и *Zemax* представлены на рисунке 6.

а



$\delta$ 

$a$  – Kepler type система;  $\delta$  – Galilean type система

Рисунок 6 – Карты моделирования компактных конструкций: диаграммы пятна рассеяния и волнового фронта (ПП Code V); графики aberrаций (ПП Zemax)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Предложены новые схемные решения афокальных анастигматических зеркальных систем на основе конфокально расположенных параболических зеркал, в том числе компактная схема с малыми габаритами кеплеровского и галилеевского типов [17, 15, 21].

2. Получены схемные конструктивные решения трехзеркальных анастигматических афокальных систем методом синтеза классических объективов Кассегрена и Грегори с конфокально расположенным вогнутым параболическим зеркалом, включая модификации с совмещенными вершинами первого и третьего зеркал, позволяющие обеспечивать видимые увеличения от  $-4^x$  до  $-10^x$  с угловым полем зрения от  $1^\circ$  до  $2^\circ$  при коэффициенте центрального экранирования до 0,35 [5]. Проведено моделирование и определены характеристики разработанных схем.

3. Разработаны математические модели параметрического габаритного и абберационного расчета в области Зейделя новых афокальных анастигматических систем с главным параболическим зеркалом. Получены формулы, учитывающие видимое увеличение зеркальных афокальных систем, составленных на основе классических схем Кассегрена и Грегори [7].

4. Получены аналитические зависимости, определяющие габаритное построение афокальных зеркальных анастигматов с децентрированной апертурной диафрагмой [10, 12, 13], составленных из параболических зеркал с совмещенными фокусами, имеющих четыре отражения на основе схем Мерсенна.

5. Адаптированы алгоритмы эффективного проектирования предложенных афокальных анастигматических зеркальных систем, учитывающие оригинальные условия нормировки, коэффициент центрального экранирования, а также относительное отверстие параболического главного зеркала [16, 18, 19].

6. Разработаны новые методики по компьютерной оценке качества изображения [1, 21] с использованием параксиальных безабберационных элементов, а также в зависимости от вида и версии пакетов прикладных программ по расчету оптических систем.

7. Модернизирована методика построения бленды для защиты плоскости изображения и диаграмм виньетирования трехзеркальной афокальной системы, составленной на основе классического объектива Кассегрена, конфокально расположенного с вогнутым параболическим зеркалом [3, 8, 11].

### Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты проведенного комплекса исследований, решений и разработок в области моделирования афокальных зеркальных систем могут быть использованы при создании широкого класса оптико-электронной аппаратуры различного назначения, в том числе комплексов ДЗЗ из космоса, лазерных систем и аппаратуры инфракрасной техники.

В целях практического применения в качестве насадок к регистрирующим объективам интерес представляют двухзеркальные системы с неэкранированным входным зрачком небольших кратностей. При необходимости получить плоское поле изображения предпочтительнее квартпараболические системы, составленные

из внеосевых зеркал. Они позволяют увеличить угловое поле не менее, чем в два раза, по сравнению с афокальными трехзеркальными системами, имеющими двойное отражение от первого зеркала, при тех же оптических характеристиках.

Системы могут быть использованы при моделировании оптических систем в БНТУ на кафедре «Лазерная техника и технология». На кафедре выполнено внедрение в учебный процесс по дисциплине «Техническая оптика» для студентов специальности 1-38 01.02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» следующих результатов: описание композиций без центрального экранирования из трех внеосевых зеркал и алгоритм расчета телескопической системы с анастигматической коррекцией аберраций (акт внедрения от 14.02.2019 г.). Результаты исследования по разработке афокальных зеркальных анастигматических систем с малыми осевыми габаритами внедрены в Национальном Центре оптических технологий (CNTO) и Центре астрономических исследований (CIDA) в Венесуэле (акт внедрения от 20.04.2020 г.).

Научные результаты исследований по диссертационной работе предлагается использовать в Республике Беларусь на приборостроительном факультете БНТУ, на физическом факультете БГУ, а также на приборостроительном факультете НТУУ «КПИ» (г. Киев, Украина).

Результаты исследования по моделированию и разработке зеркальных афокальных анастигматических систем рекомендуется реализовать на предприятиях оптического приборостроения РБ (БелОМО, ОАО «Пеленг», институт физики НАН Беларуси, КБТМ ОМО), в Венесуэле: Национальном Центре оптических технологий (CNTO) и Центре астрономических исследований (CIDA), Астрономической обсерватории.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Артюхина, Н.К. Расчет светозащитной бленды двухзеркального зафокального объектива / Н.К. Артюхина, Лус Самбрано, Лаура Пероса // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 327–333.
2. Артюхина, Н.К. Новые конфигурации афокальных анастигматических систем на основе классических зеркальных модулей Грегори и Кассегрена / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса // Метрология и приборостроение. – 2018. – № 2. – С. 25–30.
3. Артюхина, Н.К. Афокальная система, составленная из зеркальных внеосевых параболюидов / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса, Лус Самбрано // Международный научно-технический журнал. БНТУ. «Наука и техника». № 5, 2017. – С. 407–414.
4. Артюхина, Н.К. Afocal systems with small axial dimensions. / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса // Приборы и методы измерений. 2020 – Т. 11, № 1. – С. 15–21.
5. Артюхина, Н.К. Особенности компьютерного моделирования и расчет аберрационных характеристик телескопических систем / Н.К. Артюхина, Р.В. Федорцев, Лаура Пероса, Аль-Махмуд Шуаиб Хассан // Журнал «Вестник НТУУ «КПИ»» Серия «Приборостроение». – Киев, 2018. – Вып. № 56 (2). – С. 11–17.

### Депонированные статьи, статьи в сборниках научных трудов и материалов конференций

6. Артюхина, Н.К. Квартпараболическая система из трех зеркал / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса, Лус Самбрано // Материалы 8-й международной НТК «Приборостроение – 2015» 25-27 ноября 2015 г. – Минск, 2015. – С. 165–167.
7. Артюхина, Н.К. Афокальная анастигматическая система из трех зеркал / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса // Материалы 10-й МНТК «Приборостроение 2017», БНТУ, 01-03 ноября 2017 г. Сборник трудов 10-й международной НТК «Приборостроение – 2017». – Минск, 2017. – С. 409–411.
8. Артюхина, Н.К. Афокальные системы, составленные из трех зеркальных внеосевых параболюидов / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса, В.А. Марчик // МНК «XXIII Туполевские чтения» 08–10 ноября, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). Сборник докладов: в 4-х т. – Казань. Изд-во Академии наук РТ, 2017. – Т. 2. – С. 204–208.
9. Артюхина, Н.К. Компактные конструкции афокальных зеркальных систем с моноблоком из нечетных зеркал / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса // Труды ОО им. Д.С. Рождественского. 8–й Международный оптический конгресс «Оптика XXI век», XIII МК «Прикладная оптика», С-Петербург 18–21 декабря 2018 г. – В 3-х томах. – Т. 1. – С. 27.

### Тезисы докладов на конференциях

10. Пероса, Лаура. Оценка качества изображения при компьютерном моделировании афокальных систем / Лаура Пероса, Н.К. Артюхина, Лус Самбрано,

Альмахмуд Шуайб Хассан // 11-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения». БНТУ. – Минск, 2018. – С. 268.

11. Артюхина, Н.К. Расчет диаграммы виньетирования в двухзеркальных зафокальных системах / Н.К. Артюхина, Лус Самбрано, Лаура Пероса // 10-я Международная НТК молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения» 26–28 апреля 2017 г., БНТУ. – Минск, 2017. – С. 54.

12. Артюхина, Н.К. Трехзеркальные афокальные системы из внеосевых зеркал / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса // Вісімнадцята Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» 15–16 травня 2019 р., м. Київ, Україна. – С. 30–31.

13. Артюхина, Н.К. Некоторые аспекты технологической адаптации систем с составными зеркалами / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса, Лус Самбрано // 11-я МНТК молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения» 18–20 апреля 2018 г., Минск: БНТУ, 2018. – С. 271.

14. Артюхина, Н.К. Телескопическая система с четырьмя отражениями от зеркал / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса, Лус Самбрано // Матер. 8-й МСНТК «Новые направления развития приборостроения», 22–24 апреля 2015 г., БНТУ. – Минск, 2015г. – С. 210.

15. Артюхина, Н.К. Анализ основных перспективных проблем в зеркальных системах / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса, Лус Самбрано // Шістнадцята Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» 16–17 травня 2017 р., Київ, Україна. 2017 р. – С. 31–32.

16. Артюхина, Н.К. Исследование зеркальных афокальных систем с неэкранированным входным зрачком / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса, Лус Самбрано // 10-я Международная НТК молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения». 26–28 апреля 2017 г., БНТУ. – Минск, 2017. – С. 53.

17. Артюхина, Н.К. Афокальная трехзеркальная система с многократным отражением от поверхностей зеркал / Н.К. Артюхина, Лаура Пероса, В.А. Марчик // Сімнадцята Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» 15–16 травня 2018 р., м. Київ, Україна. – С. 41–42.

18. Артюхина, Н.К. Компактная афокальная зеркальная система с многократным отражением от первичного зеркала / Н.К. Артюхина, Л. Пероса [и др.] // 11-я Международная НТК молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения». 18–20 апреля 2018 г., БНТУ – Минск, 2018. – С. 269.

19. Артюхина, Н.К. Вопросы компьютерной классификации оптических модулей / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик, Лаура Пероса // П'ятнадцята Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 17–18 травня 2016 р.м. Київ, Україна. – С. 72–74.

20. Артюхина, Н.К. Создание каталога объектных модулей в программной среде ОПАЛ / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик, Лаура Пероса // Матер. 9-й МНТК молодых ученых и студентов. «Новые направления развития приборостроения». 20–22 апреля 2016 г., БНТУ – Минск, 2016. – С. 5–6.

**Отчет о научно-исследовательской работе**

21. Разработка новых лазерных материалов и твердотельных лазеров на их основе, светосильных объективов и зеркальных систем, технологии, аксионов и оптических деталей лазерных гироскопов: отчет о НИР 2016–2020гг. / Н 8720 от 06.05.21 // БНТУ; рук. Н.В. Кулешов; исполн.: А.М. Малярович [и др.]. – Минск, 2021 – С. 15–31.

## РЭЗЮМЕ

Пероса Флорэс Лаура Вікторыя

**Люстраныя афокальныя анастыгматычныя сістэмы  
з парабалічным галоўным люстэркам**

**Ключавыя словы:** люстраныя афокальныя сістэмы, парабалічнае люстэрка, камп'ютэрнае мадэліраванне, аберацыі, аптымізацыя.

**Мэта працы:** Распрацоўка новых кампазіцый люстраных афокальных анастыгматычных сістэм з парабалічным галоўным люстэркам, стварэнне метадык аберацыйнага і параметрычнага разліку, якія ўлічваюць бачнае павелічэнне сістэмы і адноснае адтуліну галоўнага люстэрка.

**Метады даследавання:** Алгебраічныя метады тэорыі аберацый і праектавання аптычных сістэм. Лікавыя даследаванні выконваліся з выкарыстаннем распрацаваных алгарытмаў параметрычных разлікаў для люстраных сістэм з несферічнымі паверхнямі. Прадметам даследавання з'яўляліся аптычныя характарыстыкі афокальных люстраных сістэм з парабалічнага галоўным люстэркам, і аберацыйныя характарыстыкі малюнка ў геаметрычным і хвалевым прадстаўленні

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** Распрацаваны новыя схемы афокальных анастыгматычных люстраных сістэм з канфакальны размешчанымі парабалічнага люстэркамі і схемы, атрыманыя на аснове класічных аб'ектываў Касегрена і Грэгары. Распрацаваны матэматычныя мадэлі параметрычнага габарытнага і аберацыйнага разліку ў галіне Зейделя новых афокальных анастыгматов. Адаптаваныя алгарытмы праектавання прапанаваных сістэм: ўлік арыгінальных умоў норміроўкі, каэфіцыента цэнтральнага экранавання і адноснага адтуліны галоўнага люстэрка. Распрацаваны новыя метадыкі па кампутарнай ацэнцы якасці малюнка люстраных афокальных сістэм з выкарыстаннем параксіяльнае безаберацыйных элементаў, мадэрнізаваная метадыка пабудовы блэнды для абароны выявы і дыяграм віньетавання.

**Ступень выкарыстання:** Атрыманыя вынікі ўкаранёны на прадпрыемствах Венесуэлы і ў навучальны працэс БНТУ.

**Вобласць ужывання:** Вынікі працы могуць быць выкарыстаны ў аптычным прыборабудаванні пры стварэнні шырокага класа опытка-электроннай апаратуры рознага прызначэння, у тым ліку комплексаў ДЗЗ з космасу, лазерных сістэм і апаратаў інфрачырвонай тэхнікі.

## РЕЗЮМЕ

Пероса Флорес Лаура Виктория

### **Зеркальные афокальные анастигматические системы с параболическим главным зеркалом**

**Ключевые слова:** зеркальные афокальные системы, параболическое зеркало, компьютерное моделирование, аберрации, оптимизация.

**Цель работы:** Разработка новых композиций зеркальных афокальных анастигматических систем с параболическим главным зеркалом, создание методик аберрационного и параметрического расчета, учитывающих видимое увеличение системы и относительное отверстие главного зеркала.

**Методы исследования:** Алгебраические методы теории аберраций и проектирования оптических систем. Численные исследования выполнялись с использованием разработанных алгоритмов параметрических расчетов для зеркальных систем с несферическими поверхностями. Предметом исследования являлись оптические характеристики афокальных зеркальных систем с параболическим главным зеркалом, и аберрационные характеристики изображения в геометрическом и волновом представлении

**Полученные результаты и их новизна:** Разработаны новые схемы афокальных анастигматических зеркальных систем с конфокально расположенными параболическими зеркалами и схемы, полученные на основе классических объективов Касегрена и Грегори. Разработаны математические модели параметрического габаритного и аберрационного расчета в области Зейделя новых афокальных анастигматов. Адаптированы алгоритмы проектирования предложенных систем: учет оригинальных условий нормировки, коэффициента центрального экранирования и относительного отверстия главного зеркала. Разработаны новые методики по компьютерной оценке качества изображения зеркальных афокальных систем с использованием параксиальных безаберрационных элементов, модернизирована методика построения бленды для защиты изображения и диаграмм виньетирования.

**Степень использования:** Полученные результаты внедрены на предприятиях Венесуэлы и в учебный процесс БНТУ.

**Область применения:** Результаты работы могут быть использованы в оптическом приборостроении при создании широкого класса оптико-электронной аппаратуры различного назначения, в том числе комплексов ДЗЗ из космоса, лазерных систем и аппаратуры инфракрасной техники.

## SUMMARY

**Peroza Flores Laura Victoria**

### **Mirror afocal anastigmatic systems with a parabolic primary mirror**

**Keywords:** afocal mirror systems, parabolic mirror, computer simulation, aberrations, optimization.

**The thesis purpose:** New design of mirror afocal anastigmatic systems with a parabolic primary mirror, and generation of calculation methods for aberration and parameters, which consider the visual magnification of the system and the aperture of the primary mirror.

**Research methods:** Algebraic methods from the theory of aberrations and design of optical systems. We carried out Numerical studies using algorithms for parametric calculations for mirror systems with non-spherical surfaces. The subject of the study was the optical features of afocal mirror systems with a parabolic primary mirror and the aberration characteristics of the image in the geometric and wave representation.

**The results obtained:** We designed new schemes of afocal anastigmatic mirror systems with confocal parabolic mirrors and obtained schemes based on classical Cassegrain and Gregory systems. We adapted mathematical models for parametric dimensional and aberration calculations in the Seidel area of the new afocal anastigmatic system. We adjusted the design algorithms for the proposed schemes, considering: the original conditions, the central obstruction coefficient, and the relative aperture of the primary mirror. We created new methods for the computer design of the image quality of mirror afocal systems using paraxial aberration-free elements. We modernized the construction of a hood to protect the image and vignetting diagrams.

**Use category:** The obtained results are implemented at the Venezuelan companies and in the educational process of BNTU.

**Field of application:** The thesis results can be used in optical instrumentation to create a broad class of optoelectronic equipment for various purposes, including remote sensing systems from space, laser systems, and infrared equipment.