

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт физики высоких технологий
 Направление подготовки 12.04.02 «Оптехника»
 Кафедра лазерной и световой техники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование кардинальных элементов оптической системы в области реальных лучей

УДК 535.12:681.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5Б	Калошина Маргарита Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЛиСТ ИФВТ НИ ТПУ	Агапов Н.А.	Д. Т. Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента ИСГТ НИ ТПУ	Петухов О.Н.	К. Э. Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ЭБЖ ИНК НИ ТПУ	Задорожная Т.А.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЛиСТ ИФВТ НИ ТПУ	Полисадова Е.Ф.	К. ф.-м. н., доцент		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

12.04.02 «ОПТОТЕХНИКА»

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические, гуманитарные, общепрофессиональные знания в области оптотехники.
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области световой, оптической и лазерной техники, оптического и светотехнического материаловедения и оптических и светотехнических технологий.
P3	Применять полученные знания для решения задач, возникающих при эксплуатации новой техники и технологий оптотехники.
P4	Владеть методами и компьютерными системами проектирования и исследования световой, оптической и лазерной техники, оптических и светотехнических материалов и технологий.
P5	Владеть методами проведения фотометрических и оптических измерений и исследований, включая применение готовых методик, технических средств и обработку полученных результатов.
P6	Владеть общими правилами и методами наладки, настройки и эксплуатации оптической, световой и лазерной техники для решения различных задач.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Проявлять творческий подход при решении конкретных научных, технологических и опытно-конструкторских задач в области оптотехники.
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности.
P9	Уметь эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научной, педагогической и производственной деятельности.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ



ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт физики высоких технологий
Направление подготовки 12.04.02 «Опготехника»
Кафедра лазерной и световой техники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ (Подпись)

_____ (Дата)

Полисадова Е.Ф.

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ5Б	Калошиной Маргарите Александровне

Тема работы:

Исследование кардинальных элементов оптической системы в области реальных лучей	
Утверждена приказом директора	№ 9489/с от 03.12.2015 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<i>Учебные пособия и литература по теме ВКР; компьютерное оборудование; специализированные компьютерные программы.</i>
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<i>Литературный обзор. Постановка задачи исследования. Перечень этапов исследования и их содержание. Основные расчеты. Анализ результатов исследования. Заключение по работе.</i>
Перечень графического материала	<i>Схемы исследуемых оптических систем. Графики исследуемых зависимостей. Точечные диаграммы в ПГ и в ПНУ.</i>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Петухов О.Н., доцент кафедры менеджмента ИСГТ НИ ТПУ

Социальная ответственность	Задорожная Т.А., ассистент кафедры ЭБЖ ИНК НИ ТПУ
Раздел на английском языке	Устюжанина А.К., доцент кафедры ИЯ ФТИ НИ ТПУ
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Введение. 2. Объекты и методы исследования. 3. Результаты исследования. 4. Заключение 	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЛиСТ ИФВТ НИ ТПУ	Агапов Н.А.	д. т. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5Б	Калошина Маргарита Александровна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ5Б	Калошиной Маргарите Александровне

Институт	ИФВТ	Кафедра	ЛиСТ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.02 «Оптотехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Затраты на специальное оборудование – 28 750 руб.; затраты по основной заработной плате – 176 200 руб.; затраты по дополнительной заработной плате – 26 430 руб.; отчисления во внебюджетные фонды – 54 913 руб.; накладные расходы – 162 104 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Исследование является перспективным в связи с его научной новизной, использованием уникального ПО и понятной визуализацией результатов.
2. Разработка устава научно-технического проекта	В уставе исследования отображении цели и ожидаемые результаты, а также его рабочая группа, состоящая из двух человек – руководителя и исполнителя.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет.	Планирование исследования и распределение исполнителей по видам работ отображено в календарном плане. Бюджет затрат на проведение исследования составляет 448 397 руб.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Исследование является эффективным за счет своей уникальности. Введение других вариантов исполнения не требуется.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НТИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента ИСГТ НИ ТПУ	Петухов О.Н.	К. Э. Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5Б	Калошина Маргарита Александровна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ5Б	Калошиной Маргарите Александровне

Институт	ИФВТ	Кафедра	ЛиСТ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.02 «Оптехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области его применения

Объектами исследования являются кардинальные элементы различных оптических систем в области реальных лучей, изучение которых происходит посредством компьютерных расчетов и моделирования. Результаты исследования могут использоваться при проектировании реальных оптических систем, а также для выявления закономерности изменения знаков кривизны профилей главных поверхностей.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность

1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.

1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.

При проведении расчетных работ в аудитории, оснащенной ПЭВМ, может возникнуть ряд опасных и вредных факторов.

Выявлены следующие вредные факторы:

- повышенный уровень электромагнитных излучений;*
- повышенные или пониженные температура и влажность воздуха рабочей зоны;*
- недостаточная освещенность рабочей зоны;*
- умственное перенапряжение;*
- монотонность труда.*

Основным способом защиты от электромагнитного излучения служит экранирование ПЭВМ.

Обеспечение оптимального для работы микроклимата достигается путем правильной организации систем отопления и воздухообмена в помещении.

Необходимой освещенности рабочей зоны можно добиться совмещением естественного и искусственного освещения, а также рациональным размещением осветительных установок соответствующего типа и мощности.

Для поддержания нормального психофизиологического состояния необходимо чередовать различные виды деятельности и соблюдать систематический отдых.

Выявлены следующие опасные факторы:

- повышенный уровень статического электричества;*
- повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.*

Для защиты от статического электричества можно ограничивать время работы за ПЭВМ, а также использовать средства индивидуальной защиты, такие как антистатическая обувь, антистатический халат.

Избежать опасного воздействия электрического

	<i>тока можно путем изоляции проводов, обеспечения защитного заземления, использования устройств автоматического отключения.</i>
2. Экологическая безопасность	<p><i>В ходе проведения научной работы может произойти загрязнение литосферы вышедшими из строя лампами и ненужными бумагами.</i></p> <p><i>Так как для освещения рабочего помещения используются светодиодные лампы, обладающие большим сроком службы и малым энергопотреблением, а основной объем результатов исследования хранится в электронном виде, то негативное воздействие на окружающую среду сводится к минимуму.</i></p>
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<p><i>Наиболее вероятной ЧС на рабочем месте является пожар.</i></p> <p><i>При возникновении ЧС необходимо отключить питание компьютера, принять меры по тушению очага возгорания при помощи огнетушителя. Если пожар не удалось потушить самостоятельно, необходимо немедленно покинуть помещение и вызвать пожарную команду.</i></p>
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	<p><i>Особое внимание нужно уделить организационным мероприятиям при компоновке рабочей зоны.</i></p> <p><i>Рабочее помещение необходимо снабдить естественным и искусственным освещением, системами отопления и кондиционирования воздуха. В помещении должны находиться аптечка и огнетушитель.</i></p> <p><i>Также в помещении необходимо проводить ежедневную влажную уборку, а рабочий стол и стул должны соответствовать заданным требованиям, обеспечивающим комфортную работу за компьютером.</i></p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ЭБЖ ИНК НИ ТПУ	Задорожная Т.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5Б	Калошина Маргарита Александровна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 119 с., 205 рис., 19 табл., 23 источника, 4 прил.

Ключевые слова: задняя главная поверхность, передняя главная поверхность, лучевое фокусное расстояние, плосковыпуклая линза, двояковыпуклая линза, объективы, профиль главной поверхности.

Объектами исследования являются линзы и объективы с заданными параметрами.

Цель работы – исследовать главные поверхности различных оптических систем в области реальных лучей.

В процессе исследования проводились расчеты лучевых фокусных расстояний, сферических aberrаций и профилей главных поверхностей линз и объективов.

В результате исследования были получены профили главных поверхностей, точечные диаграммы в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки, а также графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входных зрачках линз и объективов.

Степень внедрения: проведено исследование.

Область применения: фундаментальные исследования кардинальных элементов оптических систем различного назначения в области реальных лучей; набор статистических данных с целью выявления связи между формой главных поверхностей, качеством изображения и возможностью синтеза оптических систем.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	11
1. Обзор литературы	12
1.1. Идеальная оптическая система.....	12
1.2. Кардинальные элементы центрированной оптической системы.....	14
2. Объекты и методы исследования	18
2.1. Объекты исследования	18
2.2. Программное обеспечение исследования	21
3. Результаты исследования	22
3.1. Результаты исследования оптических линз	22
3.2. Результаты исследования объективов	35
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	57
4.1. Предварительный анализ научного исследования	57
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	57
4.1.2. SWOT-анализ.....	58
4.2. Инициация научного исследования	59
4.2.1. Цели и результаты научного исследования	59
4.2.2. Организационная структура научного исследования	59
4.3. Планирование научно-исследовательских работ	60
4.3.1. План научного исследования	60
4.3.2. Бюджет научного исследования.....	62
4.3.2.1. Специальное оборудование для научных работ.....	62
4.3.2.2. Заработная плата исполнителей исследования.....	62
4.3.2.3. Отчисления на социальные нужды	64

4.3.2.4. Накладные расходы	64
4.3.2.5. Формирование бюджета научного исследования	65
4.3.3. План управления коммуникациями научного исследования.....	65
4.4. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	66
4.4.1. Оценка сравнительной эффективности научного исследования.....	66
5. Социальная ответственность	68
5.1. Производственная безопасность	68
5.2. Экологическая безопасность	73
5.2.1. Защита атмосферы и гидросферы	73
5.2.2. Защита литосферы	73
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	74
5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	77
5.4.1. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	77
Заключение	79
Список публикаций.....	80
Список использованных источников	81
Приложение А. Abstract.....	84
Приложение Б. Результаты расчета плосковыпуклых линз	105
Приложение В. Результаты расчета двояковыпуклых линз	111
Приложение Г. Профили главных поверхностей двояковыпуклых линз после оптимизации	117

ВВЕДЕНИЕ

Основными характеристиками любой оптической системы являются ее кардинальные элементы – фокусные расстояния, фокальные отрезки, главные и узловые точки и плоскости. Теория идеальной оптической системы, разработанная Карлом Фридрихом Гауссом в 1841 году, позволяет рассчитать кардинальные элементы любой центрированной оптической системы в параксиальной области. Однако в литературе [1, 2] высказывались соображения о том, что главные и узловые плоскости реальных оптических систем – вовсе не плоскости, а поверхности, которые можно описать полиномами некоторого порядка.

Вопрос о главных поверхностях реальных оптических систем малоизучен, поэтому целью данной работы является исследование главных поверхностей различных оптических систем. Визуализация профилей главных поверхностей позволяет наглядно оценить их отличие от плоскости и выявить закономерности изменения их знаков кривизны.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Идеальная оптическая система

Для оценки качества реальной оптической системы пользуются представлением об идеальном изображении, создаваемом идеальной оптической системой. При этом допускается возможность создания такой системы, с помощью которой получают изображения точек сколь угодно большой части пространства посредством гомоцентрических сколь угодно широких пучков лучей. Предполагается, что всякой точке пространства предметов, из которой выходит широкий гомоцентрический пучок лучей, соответствует в пространстве изображений только одна, сопряженная с ней точка, являющаяся центром соответственного гомоцентрического пучка лучей. Каждой линии и плоскости пространства предметов соответствуют сопряженные с ними линия и плоскость в пространстве изображений. Если предметная точка лежит на каком-либо входящем в систему луче, то ее изображение будет лежать на сопряженном луче.

Идеальная оптическая система обладает осью круговой симметрии, которая называется также оптической осью. Преломляющие и отражающие поверхности системы являются поверхностями вращения относительно этой оси. Так как центры кривизны этих поверхностей расположены на оптической оси, то такую систему называют центрированной оптической системой. Плоскость, проходящая через оптическую ось, называется меридиональной плоскостью. Если падающий в систему луч лежит в какой-либо меридиональной плоскости, то согласно закону преломления и центрированности системы этот луч при прохождении через оптическую систему всегда остается в этой плоскости.

Из свойства круговой симметрии идеальной оптической системы следует, что плоскость, перпендикулярная к оптической оси, изображается

также плоскостью, перпендикулярной к оси системы. Пусть это будут плоскости P и P' (рисунок 1.1).

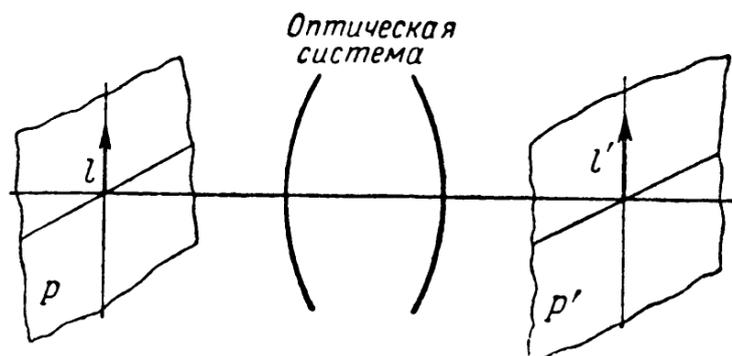


Рисунок 1.1 – К определению линейного увеличения оптической системы

Возьмем в плоскости P линейный отрезок l . В плоскости P' его изображением будет сопряженный с ним отрезок l' . Отношение величины изображения к величине предмета

$$\frac{l'}{l} = \beta \quad (1.1)$$

называется линейным увеличением. Для данной пары сопряженных, перпендикулярных к оптической оси плоскостей, линейное увеличение есть величина постоянная, т.е. не зависящая от величины отрезка l . Постоянная величина линейного увеличения является также следствием круговой симметрии и обеспечивает подобие изображения предмету.

Пространство, где находятся предметные точки, называется пространством предметов. Пространство, где находятся изображения предметных точек, называется пространством изображений. Оба эти пространства сопряжены, т.е. каждой точке, линии одного пространства соответствует определенная точка, линия другого. Таким образом, реальные оптические системы обладают свойствами идеальной системы лишь в параксиальной области.

Однако как следует из практики расчета оптических систем, применяя ряд линз, а также используя несферические преломляющие поверхности, можно построить реальную оптическую систему, имеющую малые aberrации и

дающую практически резкие изображения светящихся точек в широких пучках лучей, при условии, что светящиеся точки удалены на большие расстояния от оптической оси. Поэтому изучение идеальной оптической системы имеет тот смысл, что она является пределом, к которому следует стремиться при расчете реальных оптических систем [3].

1.2. Кардинальные элементы центрированной оптической системы

Любая центрированная оптическая система (ЦОС) характеризуется рядом так называемых кардинальных точек и плоскостей, задание которых полностью описывает все свойства ЦОС и позволяет пользоваться ими, не рассматривая реального хода лучей в системе [4].

Существует три категории кардинальных точек ЦОС:

- фокусы (передний и задний);
- главные точки (передняя и задняя);
- узловые точки (передняя и задняя).

По аналогии существует три категории кардинальных плоскостей ЦОС:

- фокальные плоскости (передняя и задняя);
- главные плоскости (передняя и задняя);
- узловые плоскости (передняя задняя).

За *главные плоскости* оптической системы, относительно которых определяются положения предметных точек и их изображений, принимается пара сопряженных плоскостей, перпендикулярных оптической оси системы, в которых линейное увеличение равно единице (рисунок 1.2):

$$\beta_H = \frac{l'_H}{l_H} = 1. \quad (1.2)$$

Главная плоскость, находящаяся в пространстве предметов, называется *передней главной плоскостью*. Главная плоскость пространства изображений называется *задней главной плоскостью*. Точки пересечения передней и задней

главных плоскостей с оптической осью называются *передней* и *задней главными точками* и обозначаются буквами H и H' соответственно.

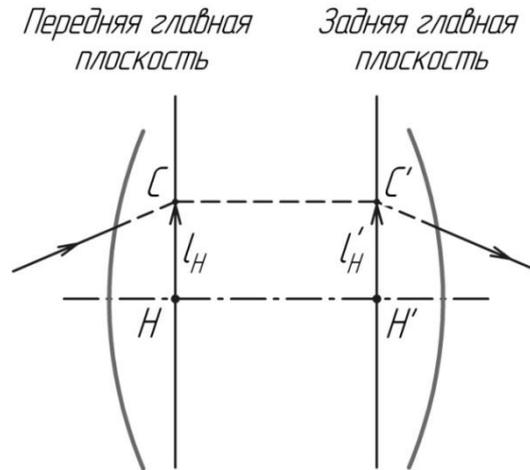


Рисунок 1.2 – Главные точки и плоскости оптической системы

Если какой-либо луч, или его продолжение, при входе в систему пересекает переднюю главную плоскость в точке C на высоте l_H от оси системы, то на выходе он, или его продолжение, пересечет заднюю главную плоскость в точке C' , удаленную от оси на такую же высоту $l'_H = l_H$. Это важное свойство главных плоскостей имеет большое значение при построении хода лучей через оптические системы [3].

На рисунке 1.3 изображена некоторая ЦОС, ограниченная двумя сферическими поверхностями. Направим на эту систему луч 1 , параллельный главной оптической оси. Сопряженный ему луч 2 выйдет из системы и пересечет главную оптическую ось в точке F' – *заднем фокусе* ЦОС. Плоскость, проходящая через задний фокус и перпендикулярная главной оптической оси, называется *задней фокальной плоскостью*. Расстояние вдоль оси от задней главной точки H' до заднего фокуса F' называется *задним фокусным расстоянием* f' .

Точно так же луч 3 при прохождении через систему пересечет оптическую ось в точке F – *переднем фокусе* ЦОС. Плоскость, проходящая через передний фокус и перпендикулярная главной оптической оси,

называется *передней фокальной плоскостью*. Расстояние вдоль оси от передней главной точки H до переднего фокуса F называется *передним фокусным расстоянием* f .

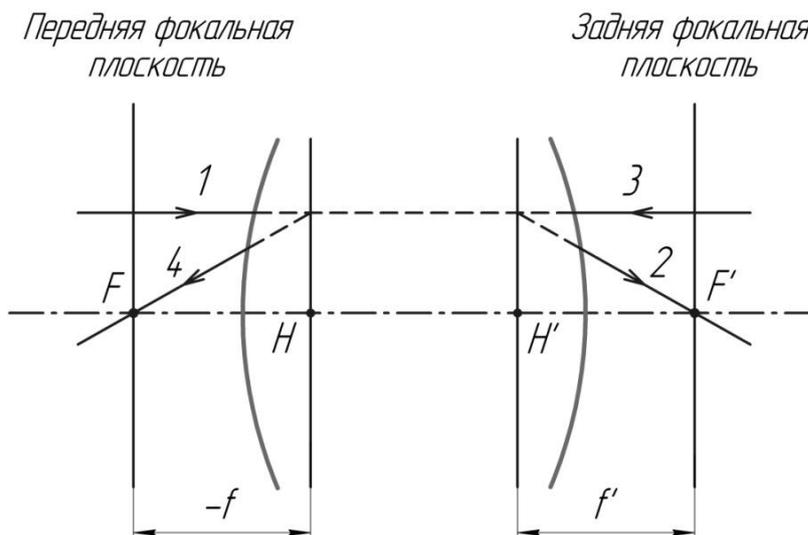


Рисунок 1.3 – Фокусы и фокальные плоскости оптической системы

В случае, когда значения показателей преломления первой и последней сред различны, удобно пользоваться не главными, а *узловыми* точками. Узловые точки обладают следующим свойством: луч, проходящий через *переднюю узловую точку* N , выходит из оптической системы через *заднюю узловую точку* N' параллельно падающему лучу (рисунок 1.4) [5].

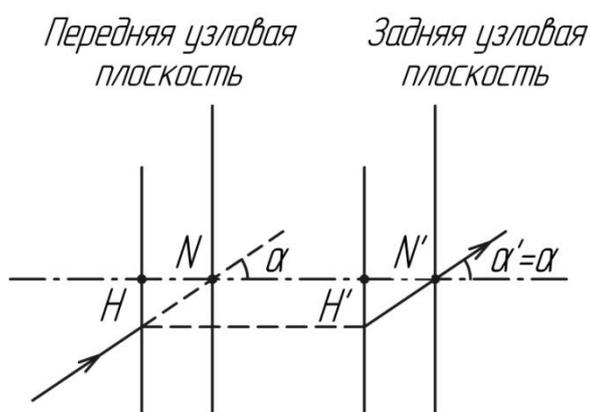


Рисунок 1.4 – Узловые точки и плоскости оптической системы

Иными словами, узловыми называют сопряженные точки на оптической оси в пространстве предметов и изображений, для которых угловое увеличение равно единице [6]:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha} = 1. \quad (1.3)$$

Плоскости, проходящие через переднюю и заднюю узловые точки и перпендикулярные главной оптической оси, называются *передней* и *задней* *узловыми плоскостями* (рисунок 1.4). Стоит отметить, что в случае, когда значения показателей преломления первой и последней сред одинаковы, узловые точки совпадают с главными [4].

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объекты исследования

В данной работе были исследованы оптические линзы и объективы. Расстояния s до передних поверхностей линз и объективов от точечного источника света, расположенного на оптической оси, выбирались произвольно и кратно фокусному расстоянию: f , $4f$, $8f$ и ∞ , где f – переднее фокусное расстояние линзы или объектива.

Перечень и параметры оптических линз выбраны произвольно и приведены в таблице 2.1. Исследование кардинальных элементов линз проводилось на линии «е», на которой показатель преломления стекла марки К8 равен 1,518291.

Таблица 2.1 – Исследуемые оптические линзы и их характеристики

Название линзы	Радиусы линзы R	Относительные отверстия линзы ∇	Толщина линзы d, мм	Диаметр линзы D, мм	Марка стекла
Плосковыпуклая линза	$R_1 = \infty$ R_2	1:2	10	50	К8
Двояковыпуклая линза	$R_1 = -R_2$	1:4			
Двояковыпуклая линза при минимуме сферических aberrаций		1:8			
		1:14			
		1:20			

Для простоты полагаем, что линза находится в воздухе, поэтому:

$$f = -f', \quad (2.1)$$

где f' – заднее фокусное расстояние линзы, определяемое через относительное отверстие и диаметр:

$$f' = \frac{D}{\nabla}. \quad (2.2)$$

Расчет радиуса кривизны плосковыпуклой линзы осуществлялся по формуле:

$$R_2 = -f' \cdot (n-1). \quad (2.3)$$

Расчет радиусов кривизны двояковыпуклой линзы осуществлялся по формуле:

$$R_1 = -R_2 = f' \cdot (n-1) \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{d}{n \cdot f'}} \right). \quad (2.4)$$

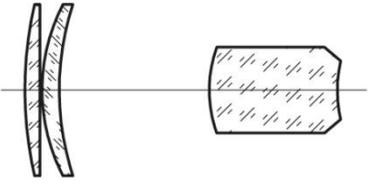
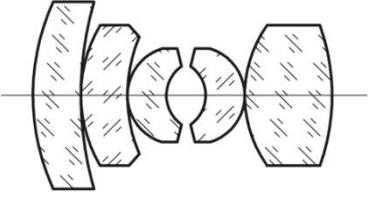
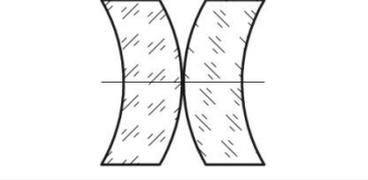
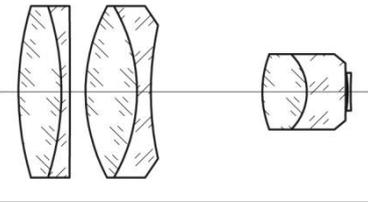
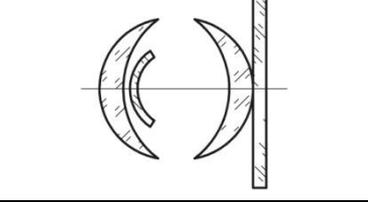
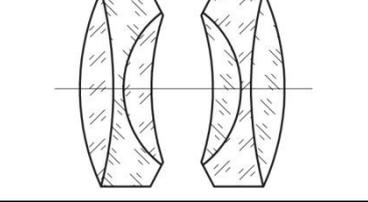
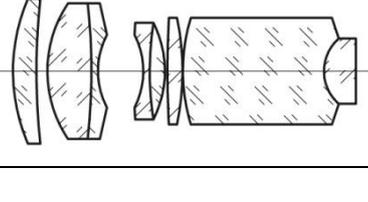
Результаты расчетов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Результаты расчетов параксиальных фокусных расстояний и радиусов кривизны исследуемых линз

Линза	Заднее фокусное расстояние f' , мм	R_1 , мм	R_2 , мм
Плосковыпуклая линза	100	∞	-51,8291
	200		-103,6582
	400		-207,3164
	700		-362,8037
	1000		-518,291
Двояковыпуклая линза	100	101,9223	-101,9223
	200	205,5953	-205,5953
	400	412,9189	-412,9189
	700	723,8965	-723,8965
	1000	1034,8724	-1034,8724
Двояковыпуклая линза после оптимизации	100	59,9223	-361,88314
	200	122,5953	-652,37843

Перечень и параметры исследуемых объективов приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Исследуемые объективы и их характеристики [7]

№ объектива	Название объектива	Оптическая схема объектива	Заднее фокусное расстояние f' , мм	Диаметр апертуры D , мм
1	Высокосветосильный объектив с конфокальной поверхностью		100	100
2	Объектив типа планар с передней изопланатической линзой		101,912	20
3	Симметричный объектив из двух менисков		100,013	10
4	Высокосветосильный объектив с ахроматизированным передним компонентом и линзой Смита		100,84	100
5	Руссар-1		97,372	17
6	Дагор		103,05	14
7	Объектив типа планар с телеконцентрической линзой		38,645	20

2.2. Программное обеспечение исследования

Расчет профилей передних и задних главных поверхностей и лучевых фокусных расстояний оптических линз и объективов был выполнен в программе, написанной на базе Mathcad 15 по алгоритмам, изложенным в работе [2].

Оптимизация линз проводилась в программе Optika v1.0.0.8. Расчет aberrаций объективов для оценки их влияния на поведение профилей главных поверхностей проводился в программе ОРТИКА.

Построения профилей главных поверхностей и графиков зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входных зрачках линз и объективов были выполнены в программе Microsoft Excel.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Результаты исследования оптических линз

Результаты расчета главных поверхностей *плосковыпуклой линзы* с задним параксиальным фокусным расстоянием 100 мм представлены на рисунках 3.1 и 3.2, из которых видно, что профили поверхностей отличаются от плоскости.

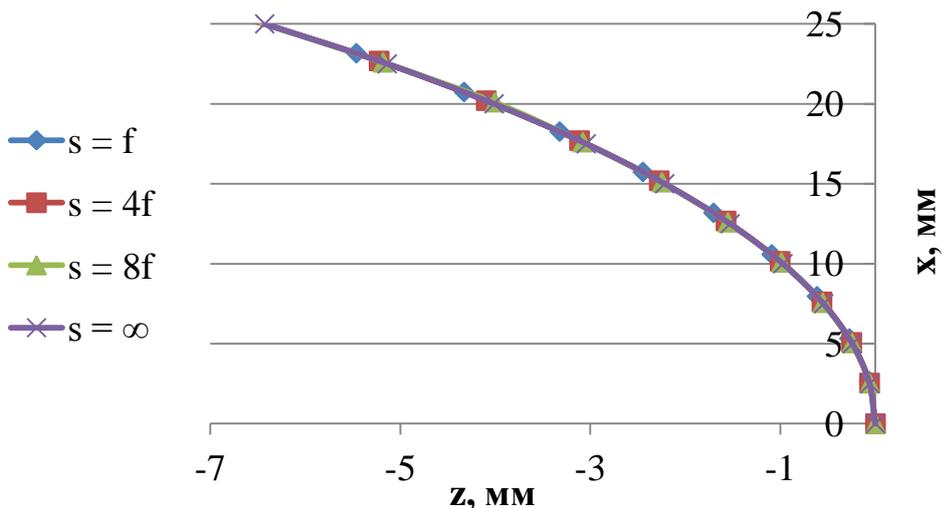


Рисунок 3.1 – Профили задних главных поверхностей плосковыпуклой линзы с $f' = 100$ мм

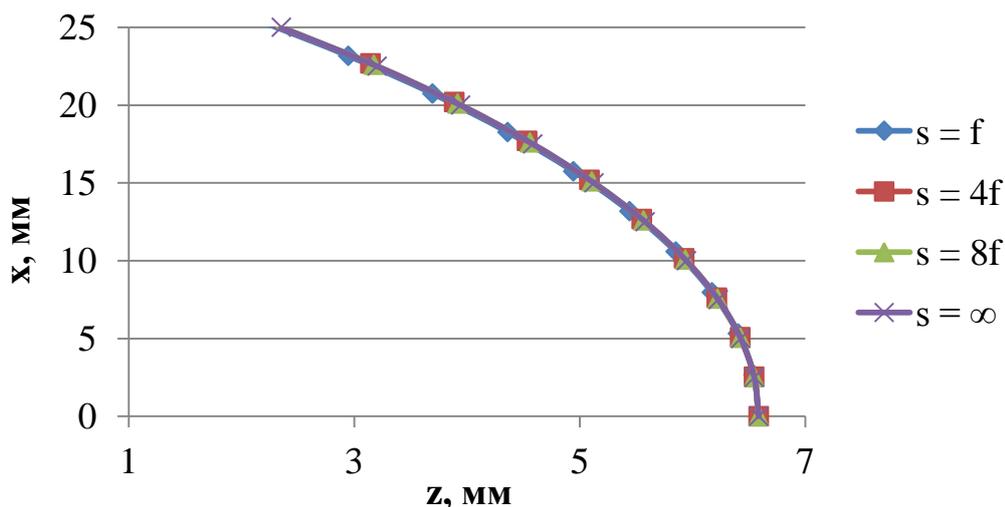


Рисунок 3.2 – Профили передних главных поверхностей плосковыпуклой линзы с $f' = 100$ мм

Для задних параксиальных фокусных расстояний 200 мм, 400 мм, 700 мм и 1000 мм графики профилей передних и задних главных поверхностей

имеют схожий вид (см. приложение Б), однако можно заметить, что с уменьшением относительного отверстия глубины профилей поверхностей уменьшаются и для заднего фокусного расстояния 1000 мм имеют минимальные значения (рисунки 3.3, 3.4). Очевидно, что при дальнейшем уменьшении относительного отверстия главные поверхности будут стремиться к плоскостям.

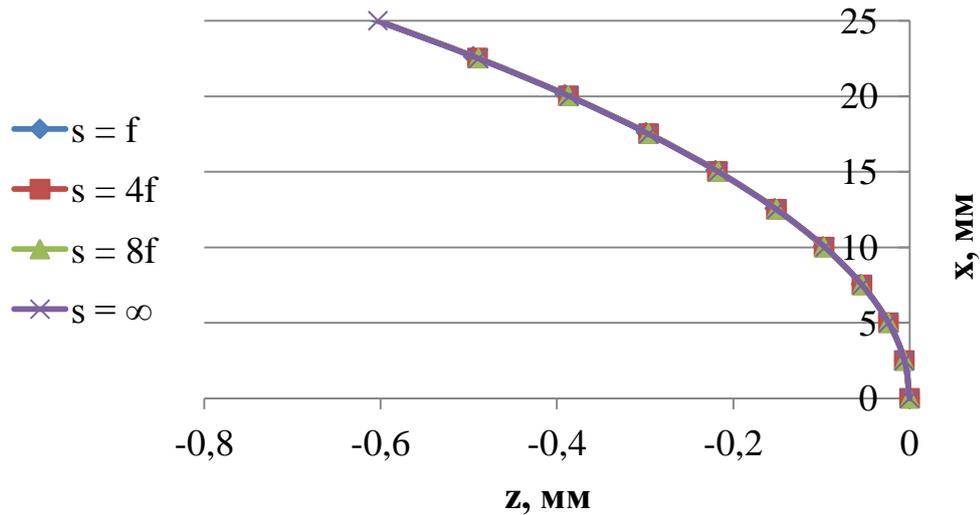


Рисунок 3.3 – Профили задних главных поверхностей плосковыпуклой линзы
с $f' = 1000$ мм

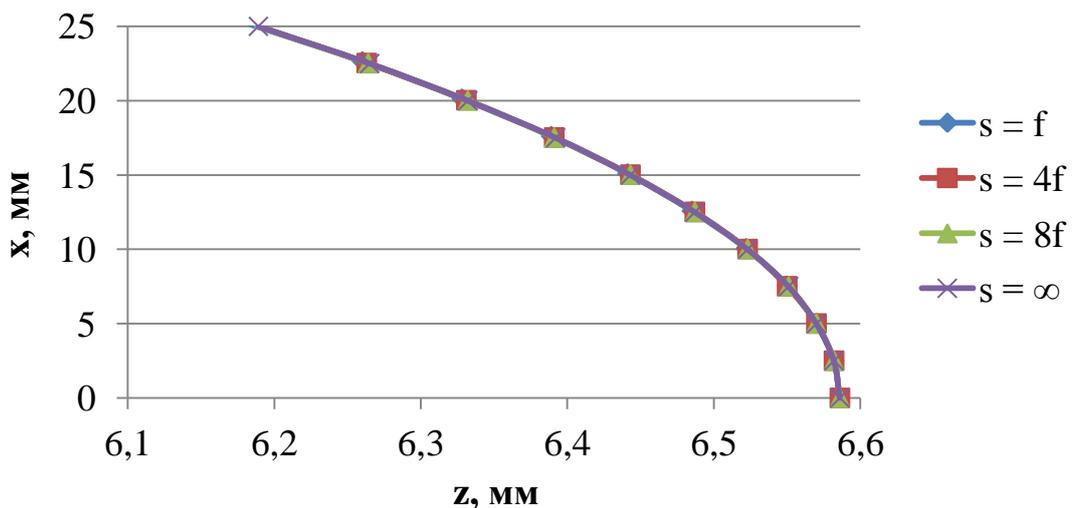


Рисунок 3.4 – Профили передних главных поверхностей плосковыпуклой линзы
с $f' = 1000$ мм

Особое внимание стоит обратить на зависимость лучевых фокусных расстояний линзы от высоты луча на ее входном зрачке (рисунок 3.5, 3.6). Для

данной линзы параксиальное фокусное расстояние является величиной постоянной, однако из представленных результатов видно, что в области реальных лучей для каждого падающего луча оптическая система обладает своим фокусным расстоянием, называемым лучевым.

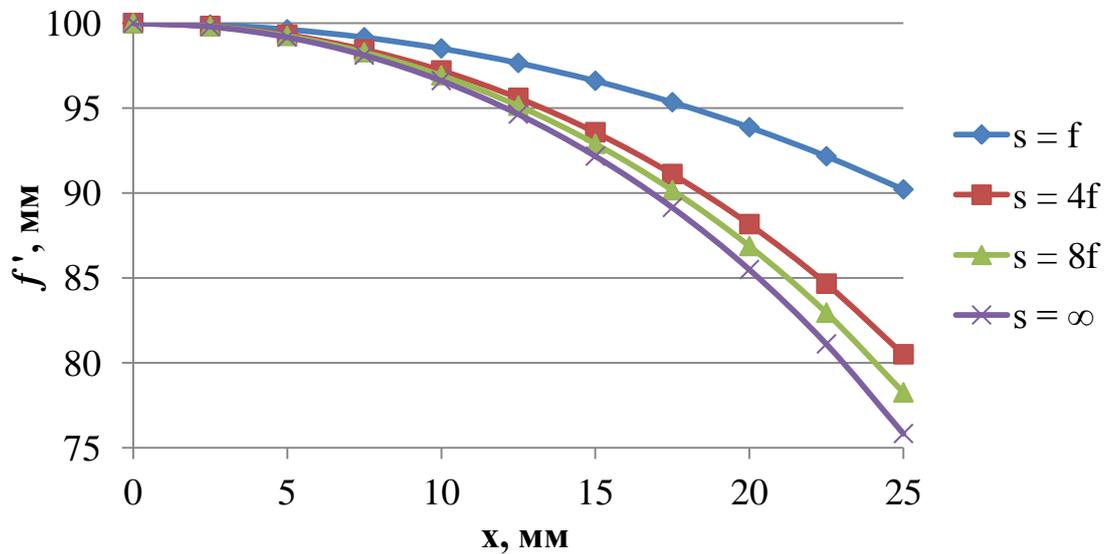


Рисунок 3.5 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 100$ мм

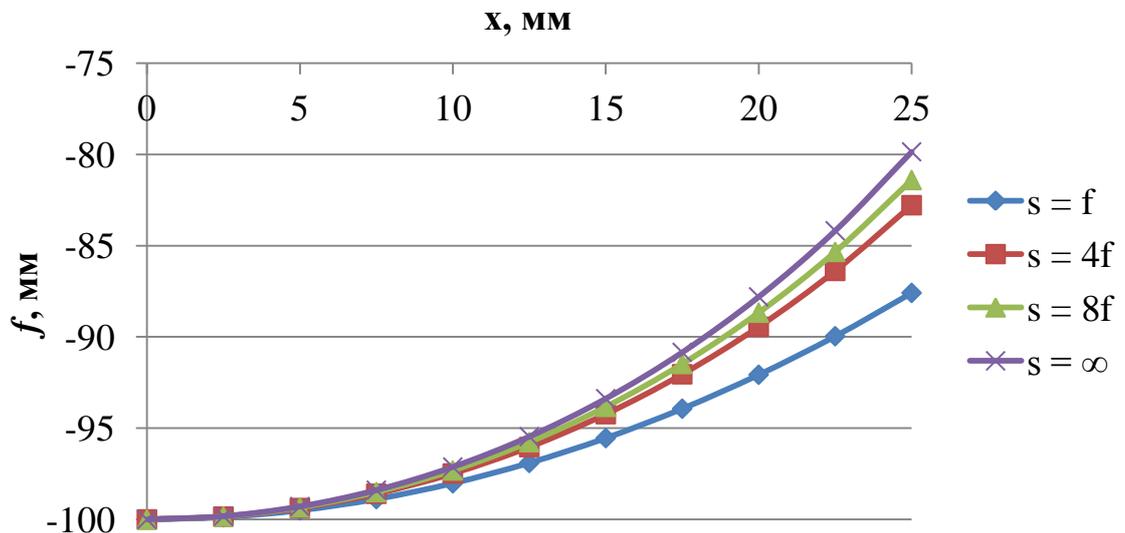


Рисунок 3.6 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 100$ м

Для задних параксиальных фокусных расстояний 200 мм, 400 мм, 700 мм и 1000 мм графики зависимостей лучевых фокусных расстояний линзы

от высоты луча на ее входном зрачке имеют схожий вид (см. приложение Б), однако, чем меньше относительное отверстие, тем меньше диапазон изменения лучевых фокусных расстояний. Для заднего фокусного расстояния 1000 мм диапазон изменения минимален (рисунки 3.7, 3.8). При дальнейшем уменьшении относительного отверстия лучевые фокусные расстояния будут сходиться к параксиальному фокусному расстоянию.

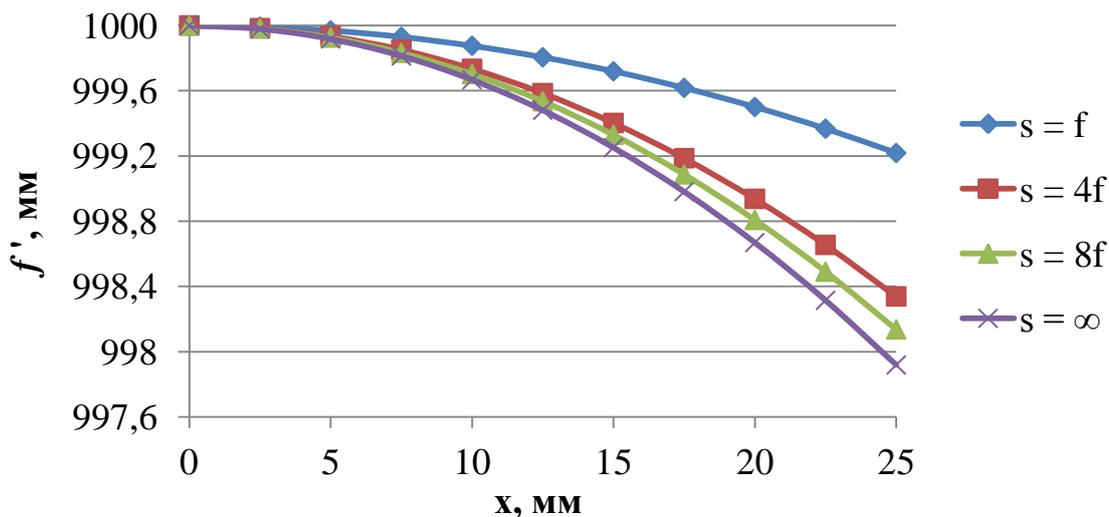


Рисунок 3.7 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 1000$ мм

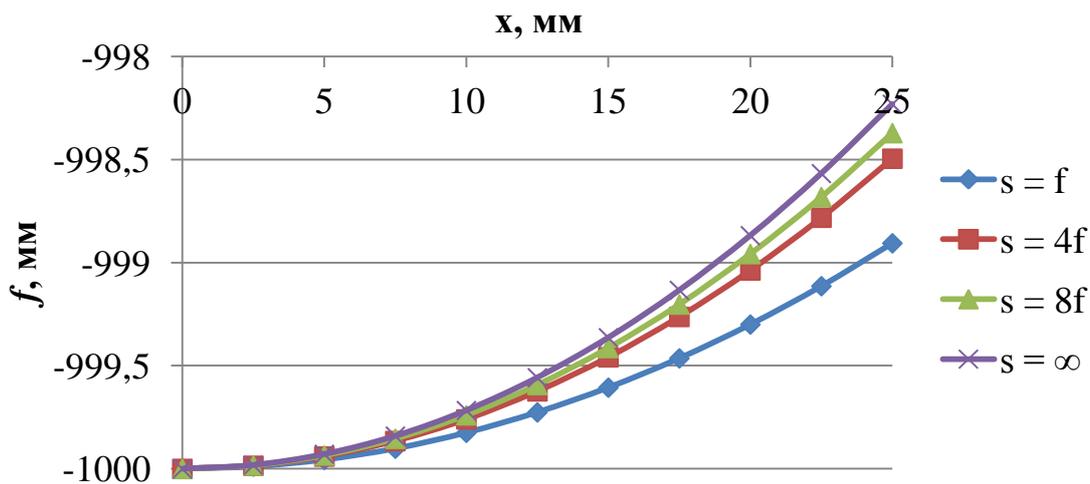


Рисунок 3.8 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 1000$ м

Особый интерес представляют результаты исследования двояковыпуклой линзы. Из рисунков 3.9 и 3.10 видно явное несовпадение

профилей главных поверхностей для различных расстояний s . Для задних параксиальных фокусных расстояний 200 мм, 400 мм, 700 мм и 1000 мм графики профилей передних и задних главных поверхностей имеют схожий вид (см. приложение В).

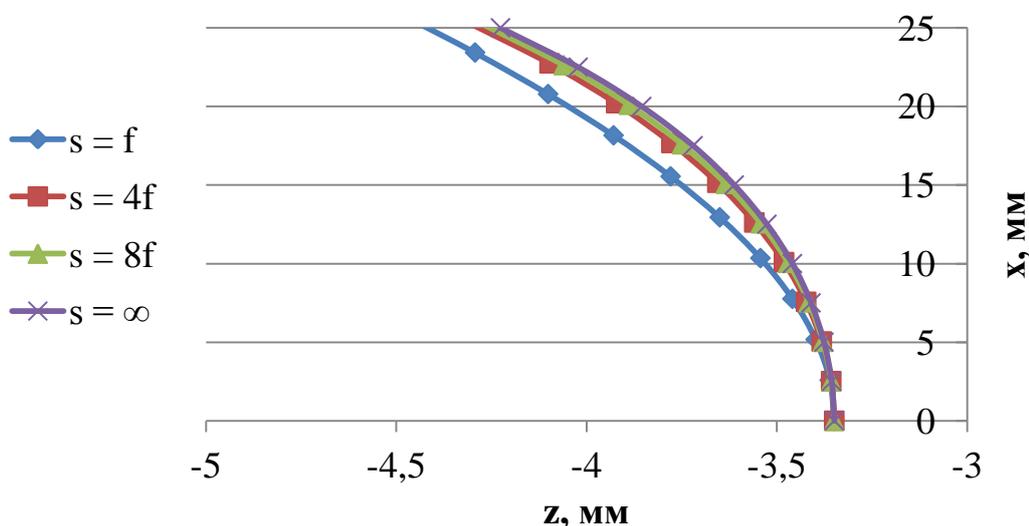


Рисунок 3.9 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 100$ мм

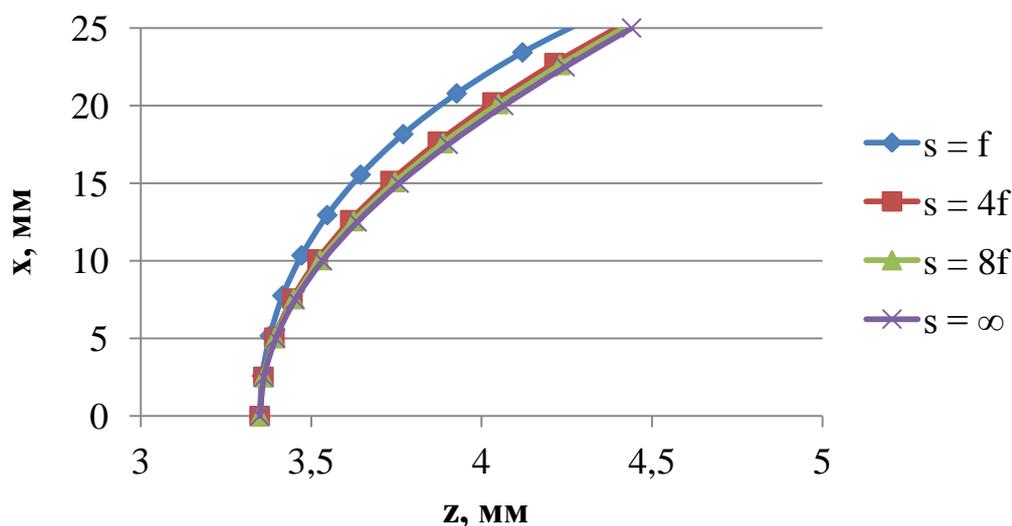


Рисунок 3.10 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 100$ мм

Как и в случае плосковыпуклой линзы, глубины профилей главных поверхностей уменьшаются с уменьшением относительного отверстия и для

заднего параксиального фокусного расстояния 1000 мм имеют минимальные значения (рисунки 3.11, 3.12).

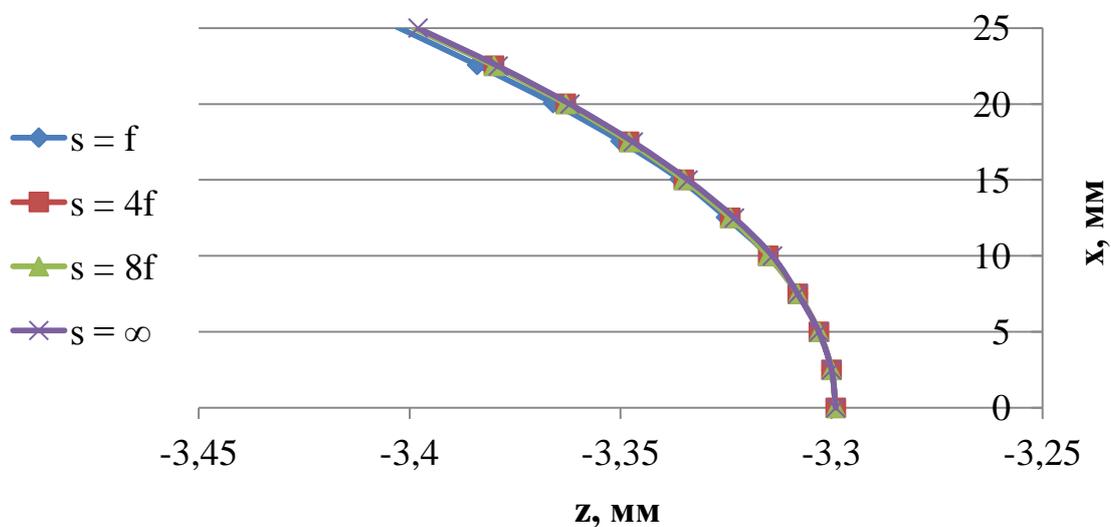


Рисунок 3.11 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 1000$ мм

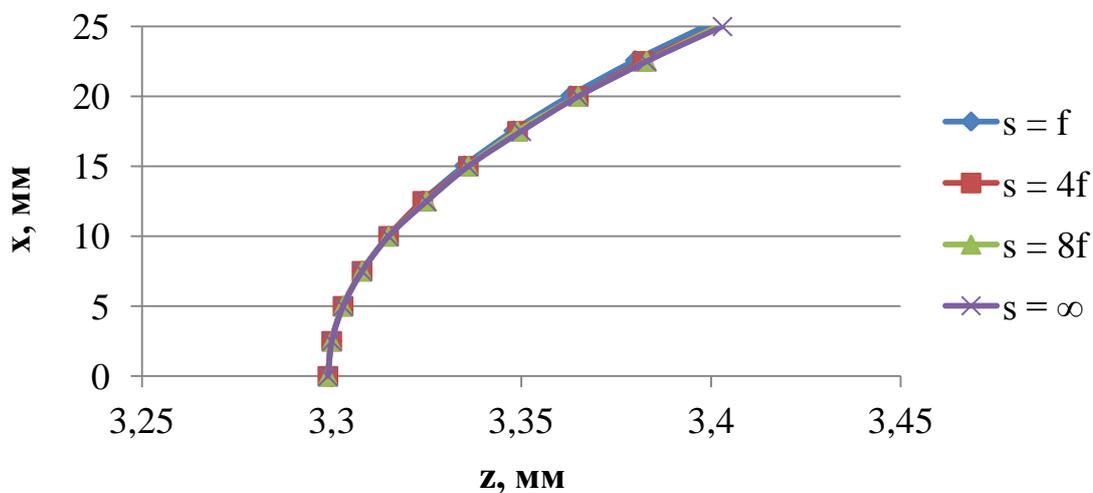


Рисунок 3.12 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 1000$ мм

Рисунки 3.13 и 3.14 демонстрируют непостоянство значений лучевых фокусных расстояний двояковыпуклой линзы в зависимости от высоты луча на ее входном зрачке.

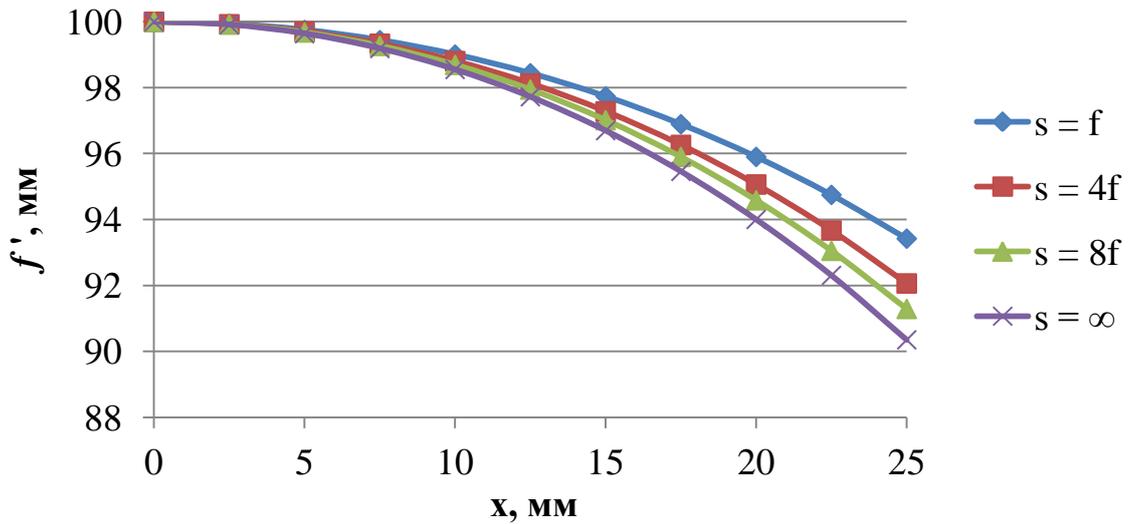


Рисунок 3.13 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 100$ мм

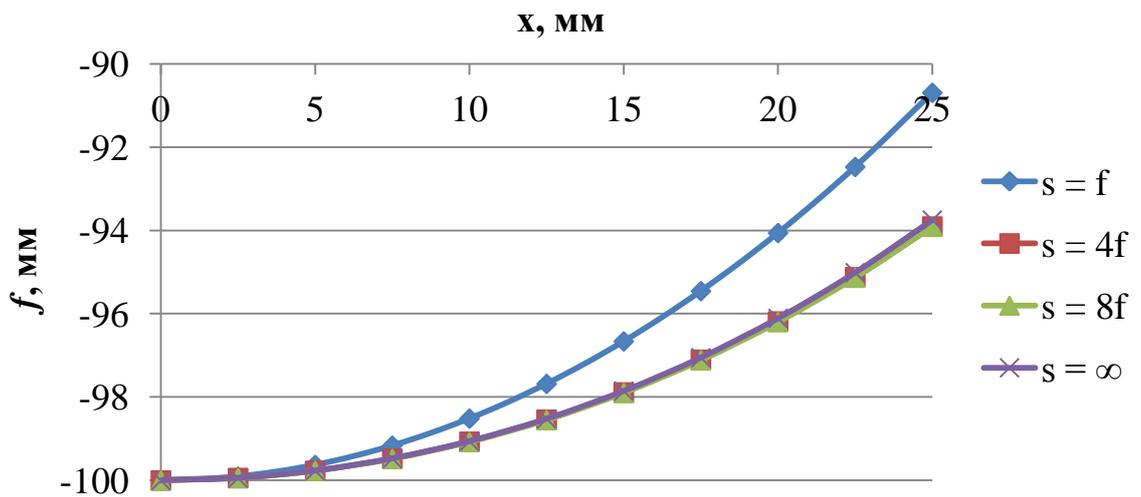


Рисунок 3.14 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 100$ мм

Как и в случае плосковыпуклой линзы, для задних параксиальных фокусных расстояний 200 мм, 400 мм, 700 мм и 1000 мм графики имеют схожий вид (см. приложение В), однако, чем меньше относительное отверстие, тем меньше диапазон изменения лучевых фокусных расстояний. Для заднего параксиального фокусного расстояния 1000 мм диапазон изменения минимален (рисунки 3.15, 3.16).

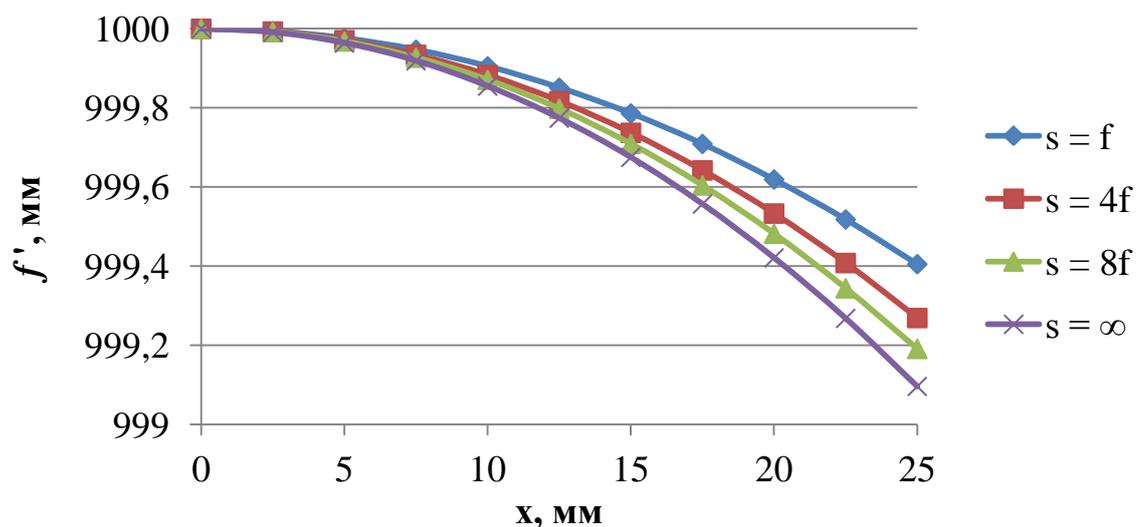


Рисунок 3.15 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 1000$ мм

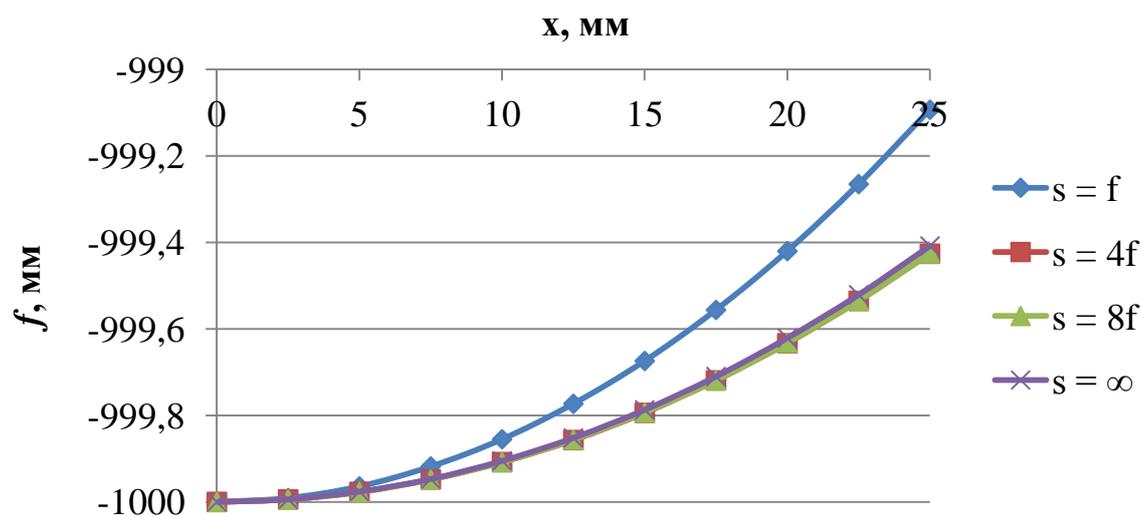


Рисунок 3.16 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 1000$ мм

Было замечено, что в процессе последовательной оптимизации двояковыпуклых линз кривизна задних главных поверхностей линз с параксиальными фокусными расстояниями 100 мм и 200 мм меняет знак на противоположный (рисунки 3.17, 3.19). Знаки кривизны передних главных поверхностей линз не изменились (рисунки 3.18, 3.20). Профили главных

поверхностей двояковыпуклых линз с параксиальными фокусными расстояниями 400 мм, 700 мм, и 1000 мм приведены в приложении Г.

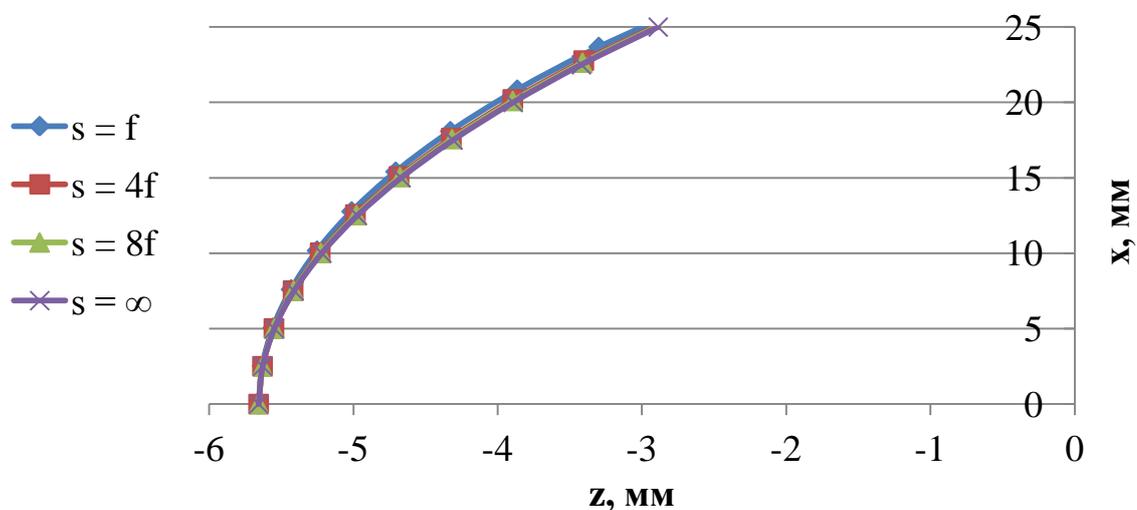


Рисунок 3.17 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы с $f' = 100$ мм после оптимизации

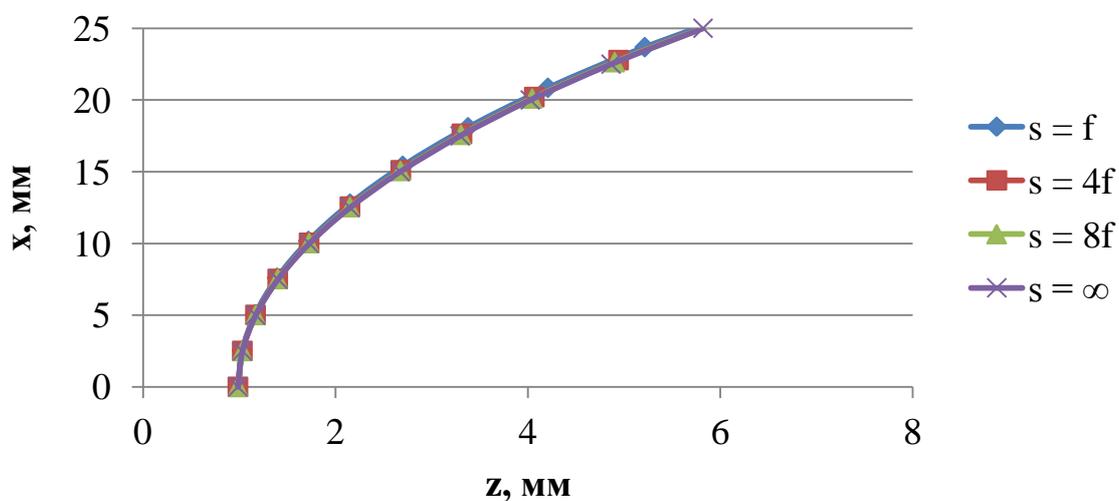


Рисунок 3.18 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы с $f' = 100$ мм после оптимизации

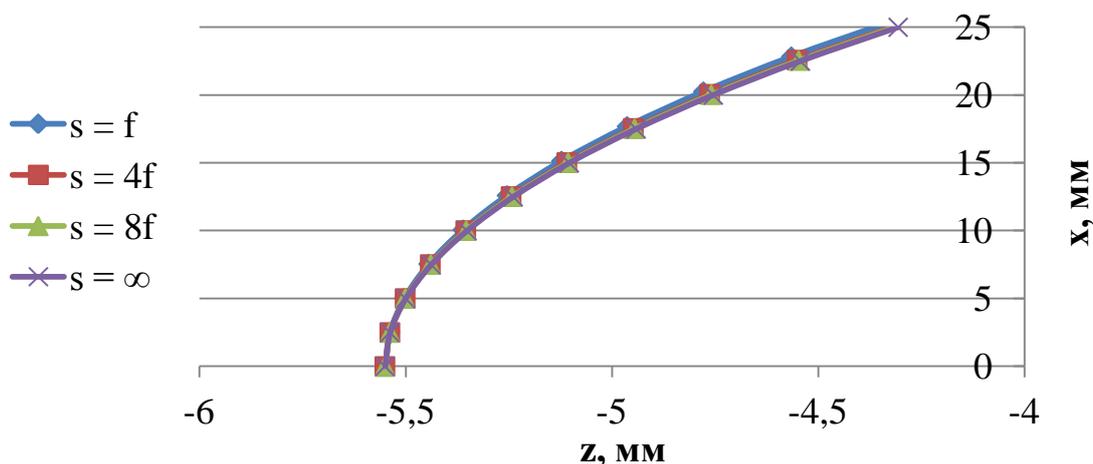


Рисунок 3.19 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 200$ мм после оптимизации

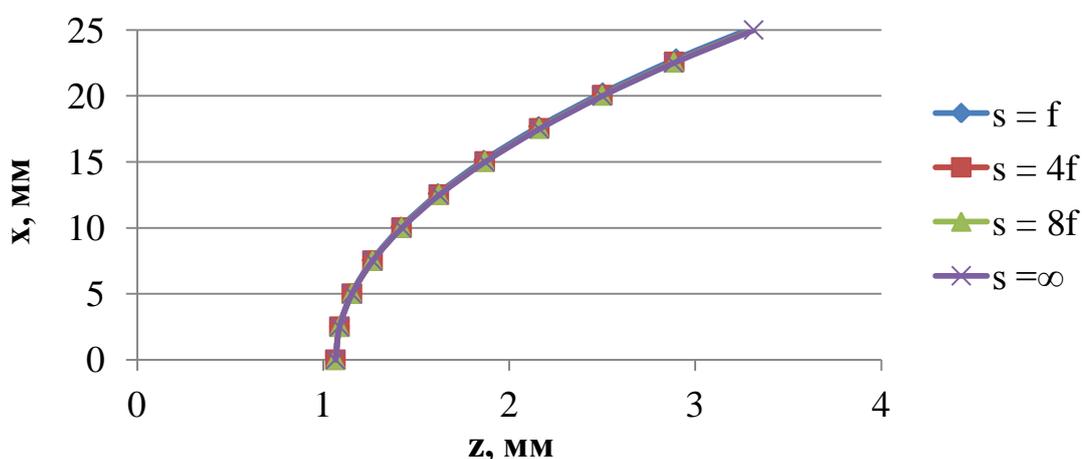


Рисунок 3.20 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 200$ мм после оптимизации

Для оценки характера изменения знаков кривизны главных поверхностей были построены графики, описывающие поведение их профилей при изменении радиусов кривизны двояковыпуклых линз от заданного до оптимизированного. Радиус первой поверхности уменьшался с шагом 5 мм, а радиус второй поверхности рассчитывался так, чтобы параксиальное фокусное расстояние не изменилось. Процесс итераций останавливался при достижении минимума поперечной сферической aberrации. Для каждой пары значений R_1 и R_2 рассчитывались профили задних и передних главных поверхностей. Результаты расчета представлены на рисунках 3.21, 3.22, 3.23 и 3.24.

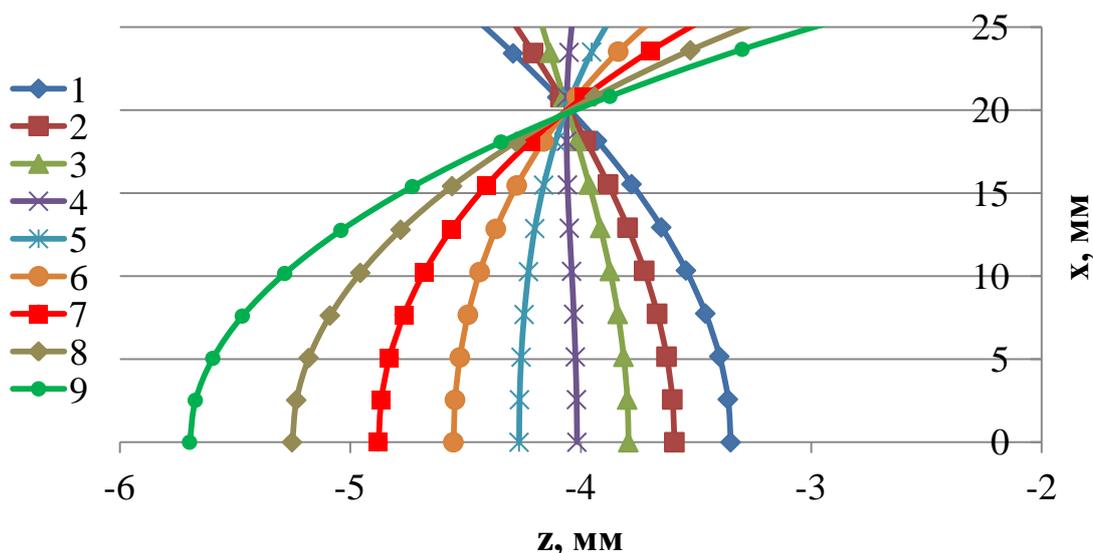


Рисунок 3.21 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы

с $f' = 100$ мм и $s = f$ для радиусов: 1) $R_1 = 101,9223$ мм; $R_2 = -101,9223$ мм;

2) $R_1 = 95$ мм; $R_2 = -109,95458$ мм; 3) $R_1 = 90$ мм; $R_2 = -117,56843$ мм;

4) $R_1 = 85$ мм; $R_2 = -127,47762$ мм; 5) $R_1 = 80$ мм; $R_2 = -140,90433$ мм;

6) $R_1 = 75$ мм; $R_2 = -160,12568$ мм; 7) $R_1 = 70$ мм; $R_2 = -189,92514$ мм;

8) $R_1 = 65$ мм; $R_2 = -242,34982$ мм; 9) $R_1 = 59,9223$ мм; $R_2 = -361,88314$ мм

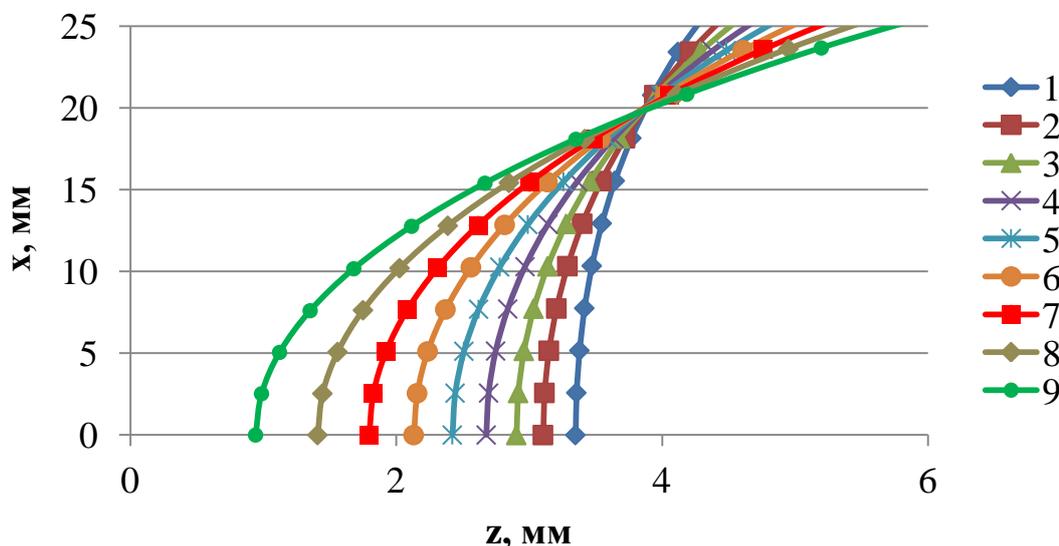


Рисунок 3.22 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы

с $f' = 100$ мм и $s = f$ для радиусов: 1) $R_1 = 101,9223$ мм; $R_2 = -101,9223$ мм;

2) $R_1 = 95$ мм; $R_2 = -109,95458$ мм; 3) $R_1 = 90$ мм; $R_2 = -117,56843$ мм;

4) $R_1 = 85$ мм; $R_2 = -127,47762$ мм; 5) $R_1 = 80$ мм; $R_2 = -140,90433$ мм;

6) $R_1 = 75$ мм; $R_2 = -160,12568$ мм; 7) $R_1 = 70$ мм; $R_2 = -189,92514$ мм;

8) $R_1 = 65$ мм; $R_2 = -242,34982$ мм; 9) $R_1 = 59,9223$ мм; $R_2 = -361,88314$ мм

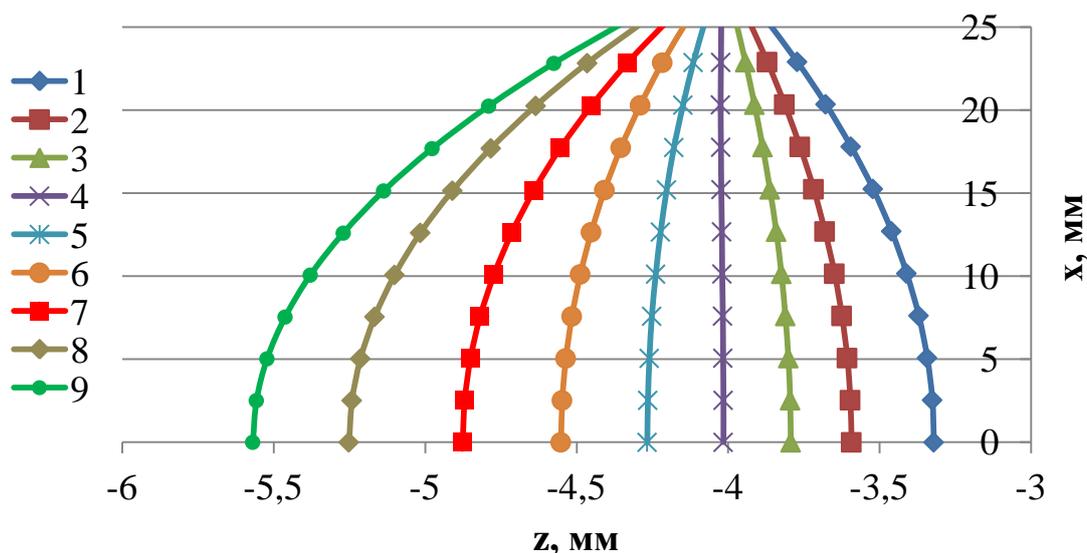


Рисунок 3.23 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы

- с $f' = 200$ мм и $s = f$ для радиусов: 1) $R_1 = 205,5953$ мм; $R_2 = -205,5953$ мм;
 2) $R_1 = 190$ мм; $R_2 = -224,00744$ мм; 3) $R_1 = 180$ мм; $R_2 = -239,77197$ мм;
 4) $R_1 = 170$ мм; $R_2 = -260,28901$ мм; 5) $R_1 = 160$ мм; $R_2 = -288,08912$ мм;
 6) $R_1 = 150$ мм; $R_2 = -327,88708$ мм; 7) $R_1 = 140$ мм; $R_2 = -389,58707$ мм;
 8) $R_1 = 130$ мм; $R_2 = -498,13276$ мм; 9) $R_1 = 122,5953$ мм; $R_2 = -652,37843$ мм

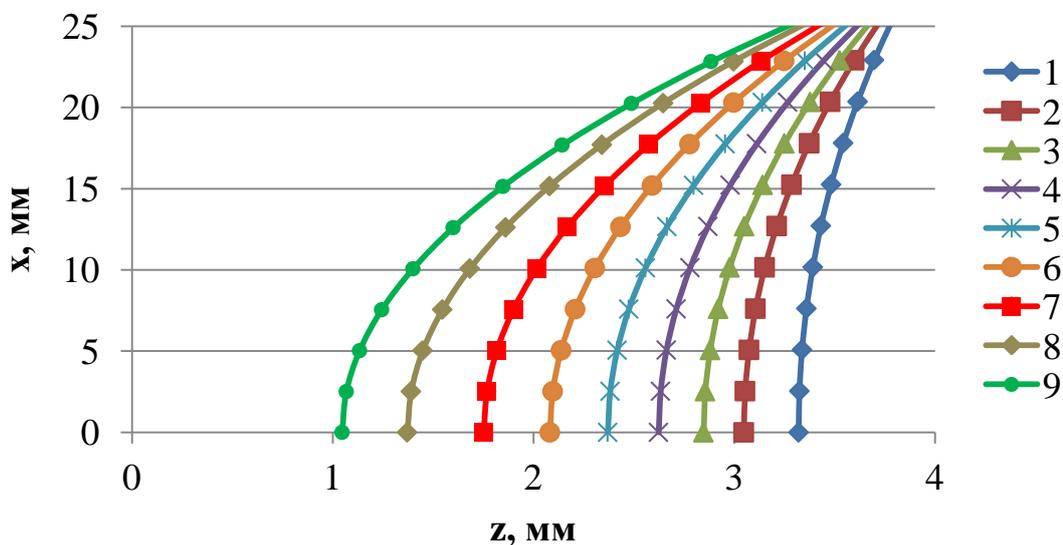


Рисунок 3.24 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы

- с $f' = 200$ мм и $s = f$ для радиусов: 1) $R_1 = 205,5953$ мм; $R_2 = -205,5953$ мм;
 2) $R_1 = 190$ мм; $R_2 = -224,00744$ мм; 3) $R_1 = 180$ мм; $R_2 = -239,77197$ мм;
 4) $R_1 = 170$ мм; $R_2 = -260,28901$ мм; 5) $R_1 = 160$ мм; $R_2 = -288,08912$ мм;
 6) $R_1 = 150$ мм; $R_2 = -327,88708$ мм; 7) $R_1 = 140$ мм; $R_2 = -389,58707$ мм;
 8) $R_1 = 130$ мм; $R_2 = -498,13276$ мм; 9) $R_1 = 122,5953$ мм; $R_2 = -652,37843$ мм

Для расстояний $4f$, $8f$ и ∞ от точечного источника света до передних поверхностей линз графики имеют схожий вид и в данной работе не приводятся.

Из рисунков 3.21 и 3.22 видно, что профили главных поверхностей двояковыпуклой линзы с задним параксиальным фокусным расстоянием 100 мм пересекаются в одной точке. У двояковыпуклой линзы с задним параксиальным фокусным расстоянием 200 мм пересечение профилей главных поверхностей при заданном диаметре отсутствует (рисунки 3.23, 3.24), однако расчетами было показано, что при увеличении относительного отверстия профили пересекаются (рисунки 3.25, 3.26).

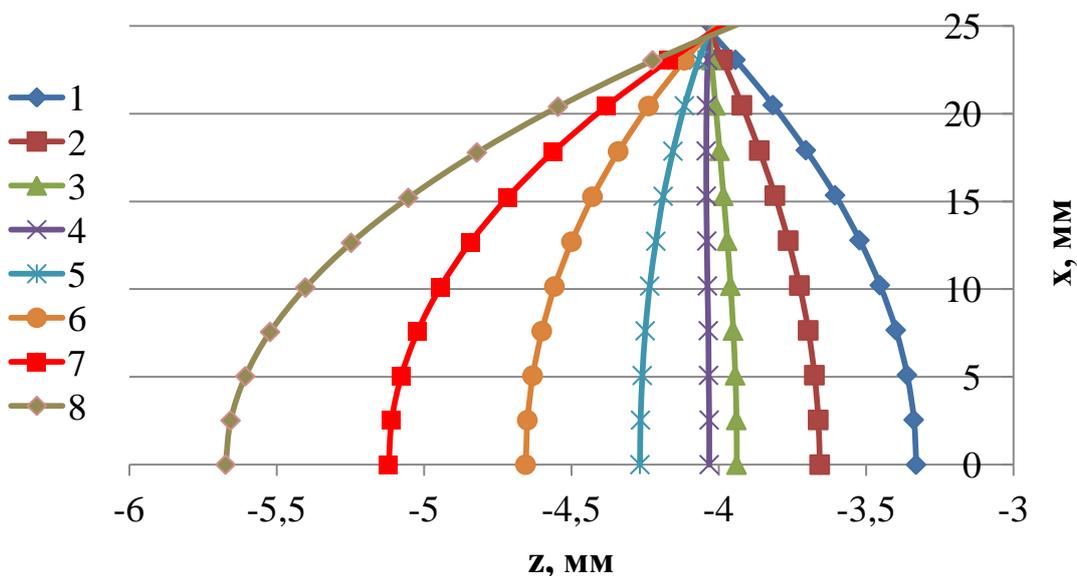


Рисунок 3.25 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы

с $f' = 150$ мм и $s = f$ для радиусов:

- 1) $R_1 = 153,76132$ мм; $R_2 = -153,76132$ мм; 2) $R_1 = 140$ мм; $R_2 = -170,56447$ мм;
- 3) $R_1 = 130$ мм; $R_2 = -188,32707$ мм; 4) $R_1 = 127$ мм; $R_2 = -195,06224$ мм;
- 5) $R_1 = 120$ мм; $R_2 = -214,49672$ мм; 6) $R_1 = 110$ мм; $R_2 = -256,89243$ мм;
- 7) $R_1 = 100$ мм; $R_2 = -337,38576$ мм; 8) $R_1 = 90$ мм; $R_2 = -539,38593$ мм

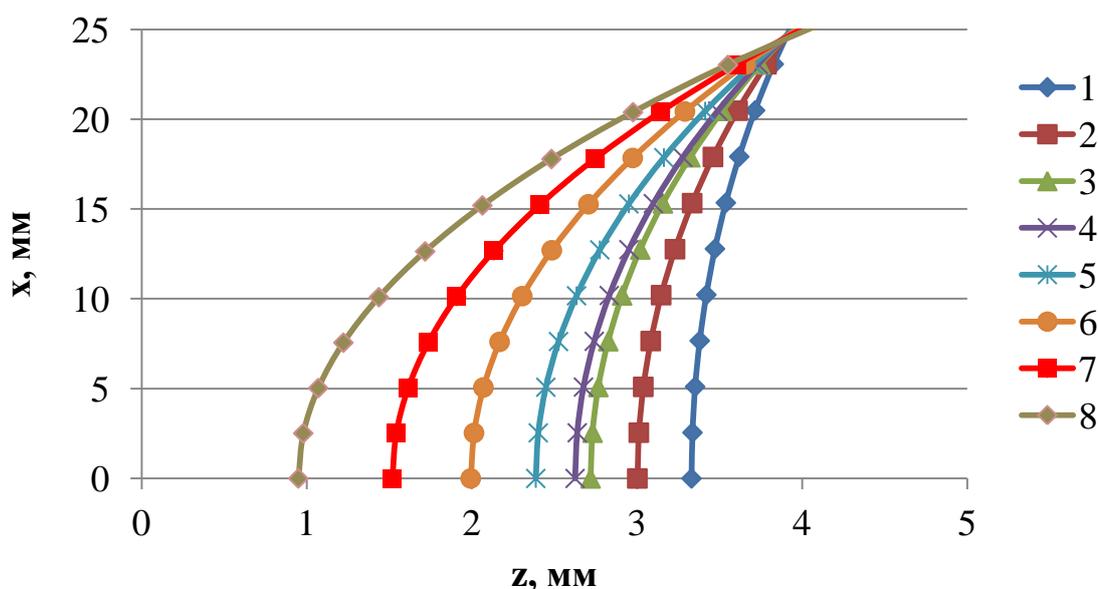


Рисунок 3.26 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы

с $f' = 150$ мм и $s = f$ для радиусов:

- 1) $R_1 = 153,76132$ мм; $R_2 = -153,76132$ мм; 2) $R_1 = 140$ мм; $R_2 = -170,56447$ мм;
- 3) $R_1 = 130$ мм; $R_2 = -188,32707$ мм; 4) $R_1 = 127$ мм; $R_2 = -195,06224$ мм;
- 5) $R_1 = 120$ мм; $R_2 = -214,49672$ мм; 6) $R_1 = 110$ мм; $R_2 = -256,89243$ мм;
- 7) $R_1 = 100$ мм; $R_2 = -337,38576$ мм; 8) $R_1 = 90$ мм; $R_2 = -539,38593$ мм

Можно предположить, что пересечение профилей главных поверхностей в одной точке будет происходить в любой оптической системе при определенном значении относительного отверстия, но физическая природа этого явления пока не ясна.

3.2. Результаты исследования объективов

Результаты расчета профилей главных поверхностей *объектива №1* представлены на рисунках 3.27 и 3.28. Из представленных графиков видно, что главные поверхности имеют некий профиль, отличный от плоского. На расстояниях $4f$, $8f$ и ∞ изменения профилей имеют схожий характер. На расстоянии f изменение профилей происходит иным образом. Данная особенность объясняется тем, что точечный источник света находится в фокусе

оптической системы. При расчетах других объективов данная специфика также сохраняется.

В случае расчета задних главных поверхностей *объектива №1* (рисунок 3.27) глубины профилей отличаются от плоскости на единицы и десятки миллиметров, причем, чем больше расстояние от точечного источника света до передней поверхности объектива, тем больше это отличие (для $s = f$ отличие в крайней точке составляет 8 мм, для $s = 4f - 9$ мм, для $s = 8f - 11$ мм, для $s = \infty - 13$ мм).

В случае расчета передних главных поверхностей (рисунок 3.28) профили также отличаются от плоскости на единицы и десятки миллиметров, однако теперь при увеличении расстояния данное отличие уменьшается и при расположении источника света в фокусе объектива имеет чрезвычайно высокое значение (для $s = f$ отличие в крайней точке составляет 74 мм, для $s = 4f - 14$ мм, для $s = 8f - 8$ мм, для $s = \infty - 3$ мм). Стоит отметить, что это немалые отклонения от плоскости, следовательно, применение теории идеальной оптической системы для реального объектива ставится под вопрос.

Графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке *объектива №1* представлены на рисунках 3.29 и 3.30. Из графиков видно, что постоянство фокусного расстояния объектива в области реальных лучей не сохраняется. Отклонения лучевых фокусных расстояний от параксиального составляют единицы и десятки миллиметров.

Для оценки аберраций *объектива №1* на рисунках 3.31, 3.32, 3.33, 3.34, 3.35, 3.36, 3.37 и 3.38 приведены точечные диаграммы в плоскости Гаусса (ПГ) и в плоскости наилучшей установки (ПНУ) для различных расстояний s . Так как точечный источник света находится на оптической оси, то присутствовать будет лишь сферическая аберрация оптической системы.

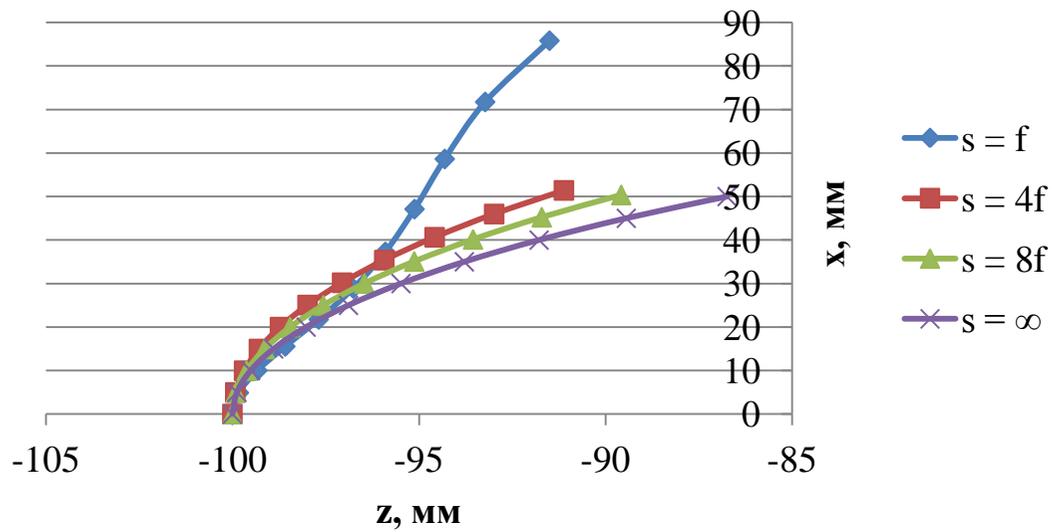


Рисунок 3.27 – Профили задней главной поверхности объектива №1

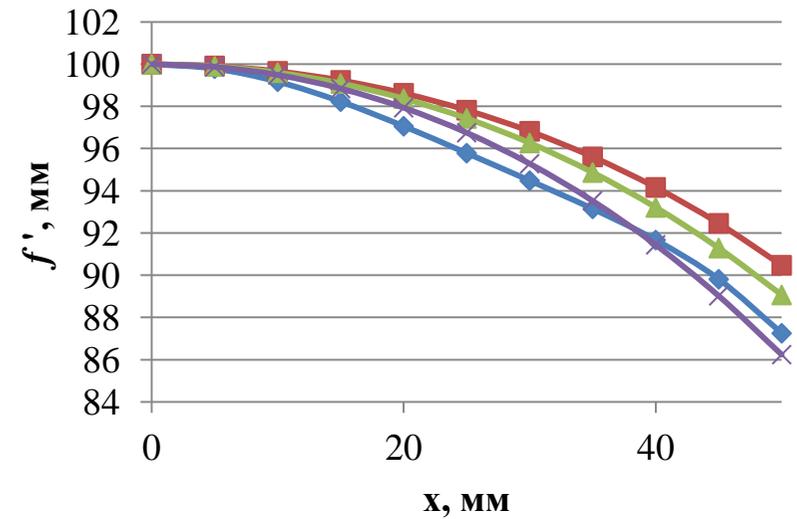


Рисунок 3.29 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №1

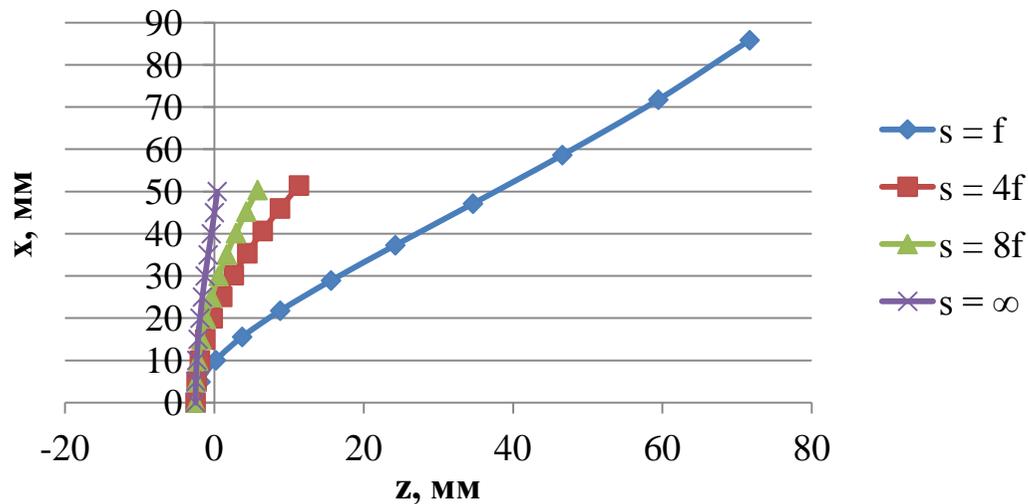


Рисунок 3.28 – Профили передней главной поверхности объектива №1

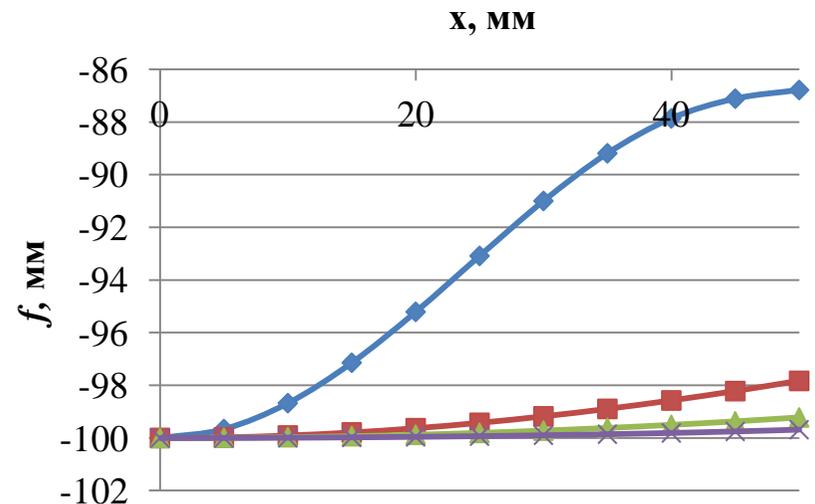


Рисунок 3.30 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №1

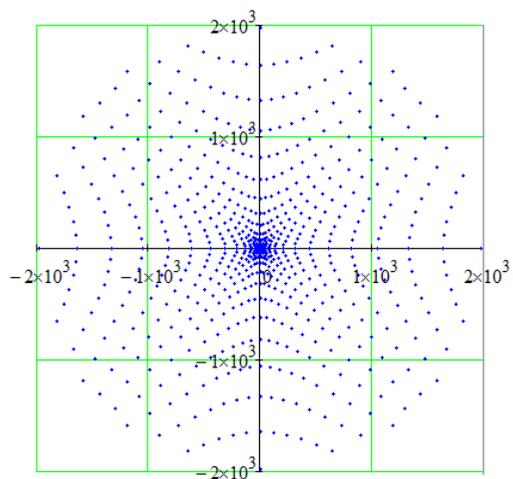


Рисунок 3.31 – Точечные
диаграммы объектива №1 в ПГ
для $s = f$

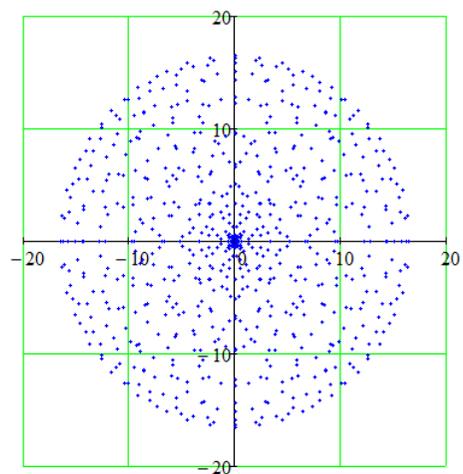


Рисунок 3.32 – Точечные
диаграммы объектива №1 в ПНУ
для $s = f$

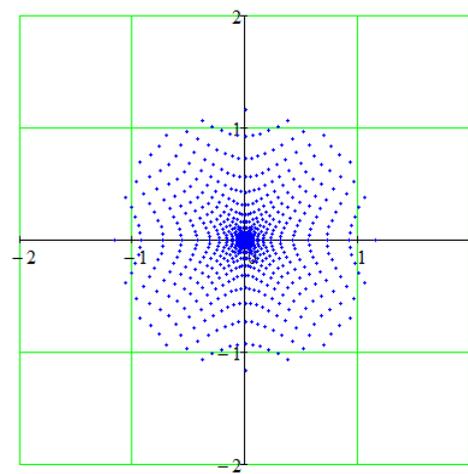


Рисунок 3.35 – Точечные
диаграммы объектива №1 в ПГ
для $s = 8f$

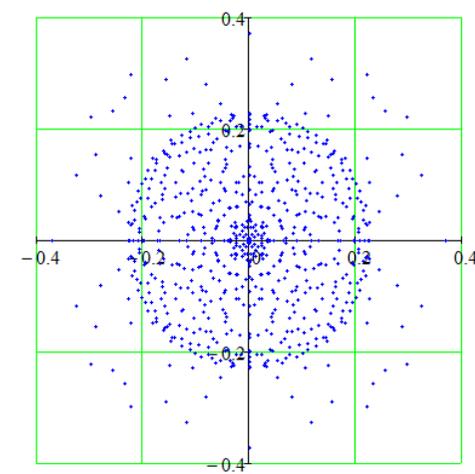


Рисунок 3.36 – Точечные
диаграммы объектива №1 в ПНУ
для $s = 8f$

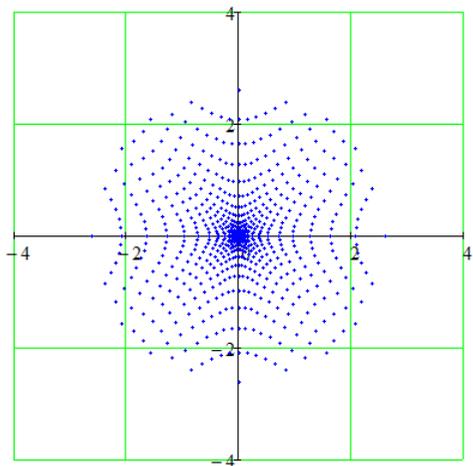


Рисунок 3.33 – Точечные
диаграммы объектива №1 в ПГ
для $s = 4f$

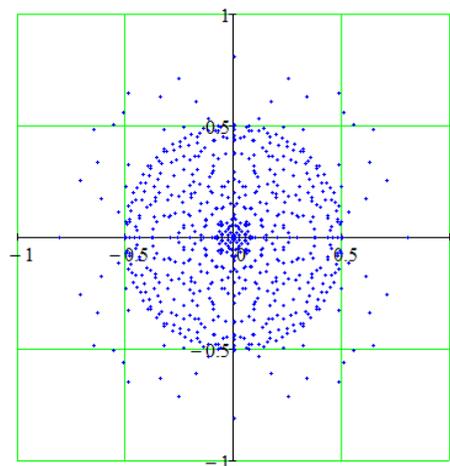


Рисунок 3.34 – Точечные
диаграммы объектива №1 в ПНУ
для $s = 4f$

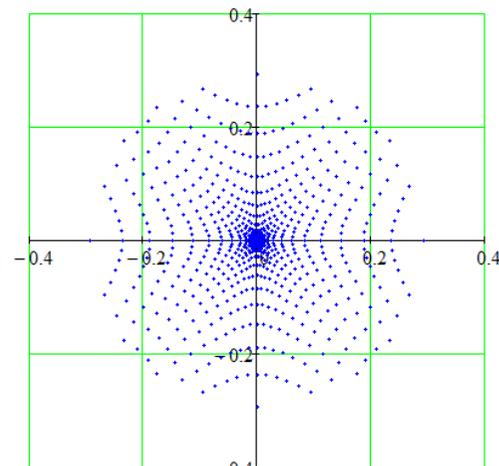


Рисунок 3.37 – Точечные
диаграммы объектива №1 в ПГ
для $s = \infty$

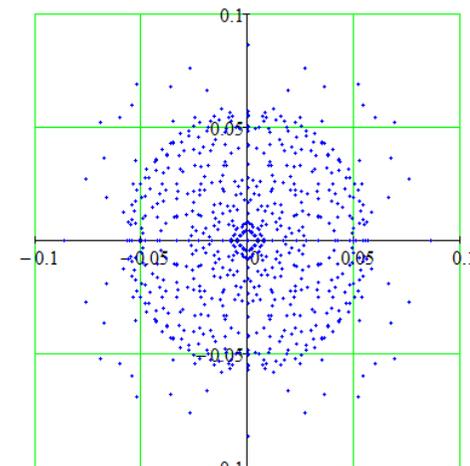


Рисунок 3.38 – Точечные
диаграммы объектива №1 в ПНУ
для $s = \infty$

Из представленных диаграмм видно, что при увеличении расстояния от точечного источника света до передней поверхности объектива происходит уменьшение круга рассеяния, что свидетельствует об уменьшении aberrаций. Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что при увеличении aberrаций *объектива №1* искривление профилей его передней главной поверхности происходит сильнее, а искривление профилей задней главной поверхности – слабее.

Результаты расчета профилей главных поверхностей *объектива №2* представлены на рисунках 3.39 и 3.40. Из рисунка 3.39 видно, что профили задней главной поверхности объектива на различных расстояниях s не только отличаются от плоскости, но также меняют знак кривизны. Максимальное отклонение профиля от плоскости наблюдается на расстоянии $s = f$ и в крайней точке составляет 1,5 мм. Из рисунка 3.40 видно, что профили передней главной поверхности также меняют знак кривизны. Максимальное отклонение профиля от плоскости наблюдается на расстоянии $s = f$ и в крайней точке составляет 0,8 мм.

Графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке *объектива №2* представлены на рисунках 3.41 и 3.42. Из графиков видно, что постоянство фокусного расстояния объектива в области реальных лучей также не сохраняется. Отклонения лучевых фокусных расстояний от параксиального составляют единицы миллиметров и уменьшаются с увеличением расстояния s .

Для оценки aberrаций *объектива №2* на рисунках 3.43, 3.44, 3.45, 3.46, 3.47, 3.48, 3.49 и 3.50 представлены точечные диаграммы в ПГ и в ПНУ для различных расстояний от точечного источника света до передней поверхности объектива.

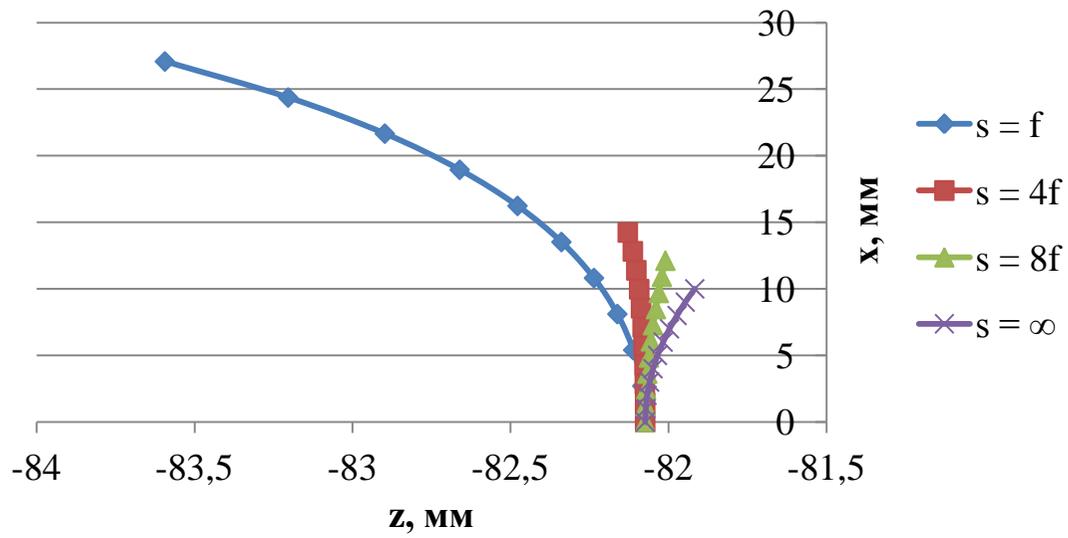


Рисунок 3.39 – Профили задней главной поверхности объектива №2

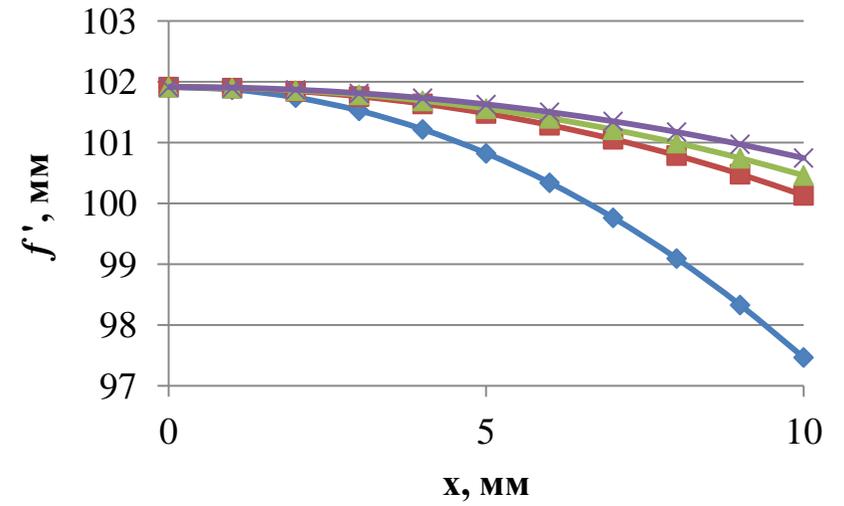


Рисунок 3.41 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №2

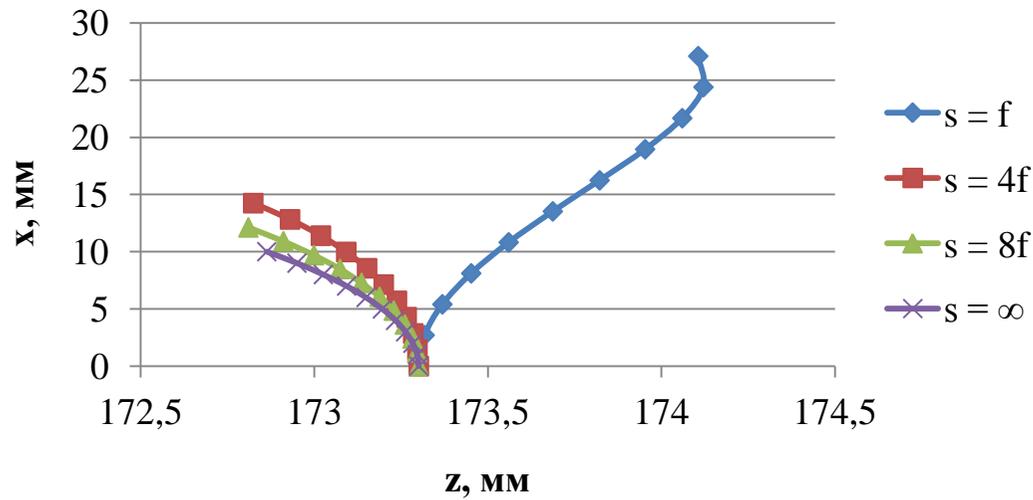


Рисунок 3.40 – Профили передней главной поверхности объектива №2

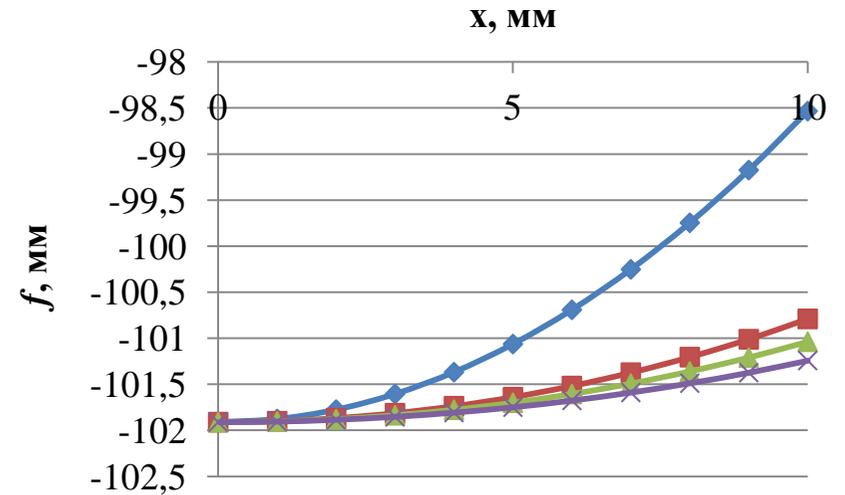


Рисунок 3.42 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №2

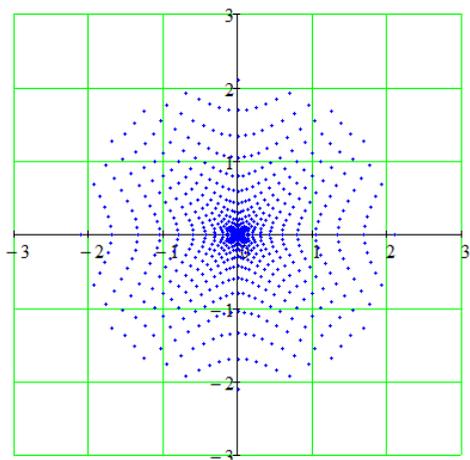


Рисунок 3.43 – Точечные
диаграммы объектива №2 в ПГ
для $s = f$

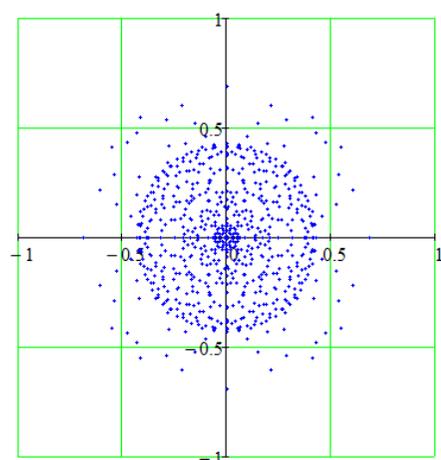


Рисунок 3.44 – Точечные
диаграммы объектива №2 в ПНУ
для $s = f$

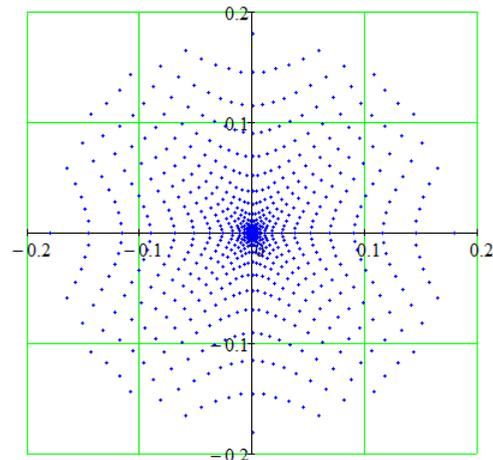


Рисунок 3.47 – Точечные
диаграммы объектива №2 в ПГ
для $s = 8f$

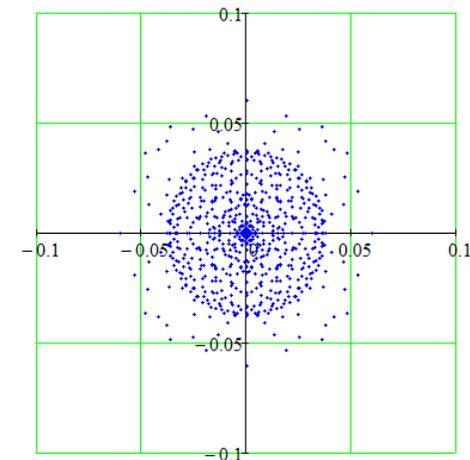


Рисунок 3.48 – Точечные
диаграммы объектива №2 в ПНУ
для $s = 8f$

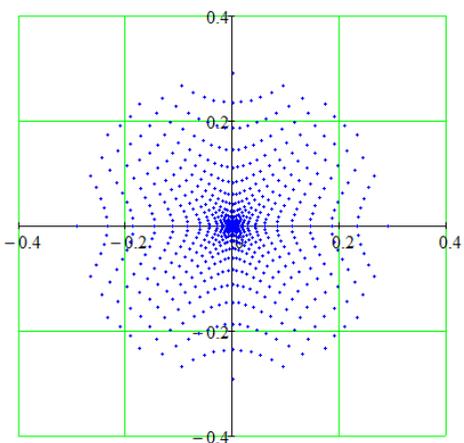


Рисунок 3.45 – Точечные
диаграммы объектива №2 в ПГ
для $s = 4f$

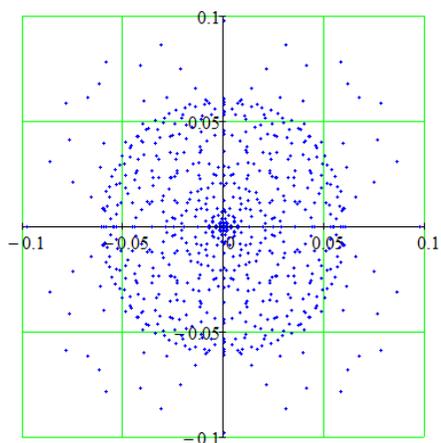


Рисунок 3.46 – Точечные
диаграммы объектива №2 в ПНУ
для $s = 4f$

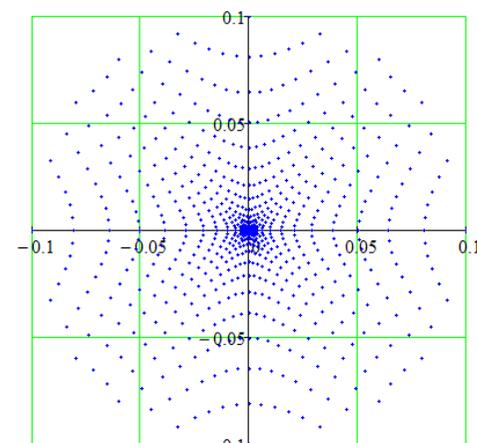


Рисунок 3.49 – Точечные
диаграммы объектива №2 в ПГ
для $s = \infty$

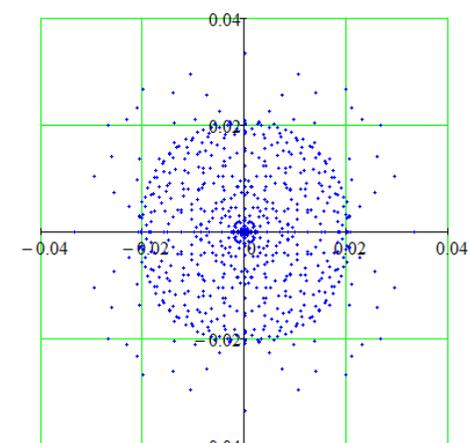


Рисунок 3.50 – Точечные
диаграммы объектива №2 в ПНУ
для $s = \infty$

Из представленных диаграмм видно, что при увеличении расстояния s происходит уменьшение круга рассеяния, что свидетельствует об уменьшении aberrаций. В случае максимальных aberrаций наблюдается наибольшее отклонение профилей главных поверхностей *объектива №2* от плоскости. Наименьшее отклонение профилей наблюдается в случае средних aberrаций.

Результаты расчета профилей главных поверхностей *объектива №3* представлены на рисунках 3.51 и 3.52. Из рисунков видно, что знаки кривизны профилей на заданных расстояниях s различны. Стоит отметить, что на расстоянии $s = 4f$ передняя главная поверхность является плоской, причем не только в крайней точке, а на протяжении всей своей длины.

На рисунках 3.53 и 3.54 изображены графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке *объектива №3*. Из графиков видно, что на различных расстояниях s передние и задние лучевые фокусные расстояния ведут себя практически одинаково, отклоняясь от параксиального значения на единицы миллиметров.

Для оценки aberrаций *объектива №3* на рисунках 3.55, 3.56, 3.57, 3.58, 3.59, 3.60, 3.61 и 3.62 представлены точечные диаграммы в ПГ и в ПНУ для различных расстояний от точечного источника света до передней поверхности объектива. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что при уменьшении aberrаций объектива искривление профилей задней главной поверхности происходит сильнее. Что касается профилей передней главной поверхности, то их наибольшее отклонение происходит в случае максимальных aberrаций. При наличии средних aberrаций ($s = 4f$) отклонение поверхности от плоскости отсутствует.

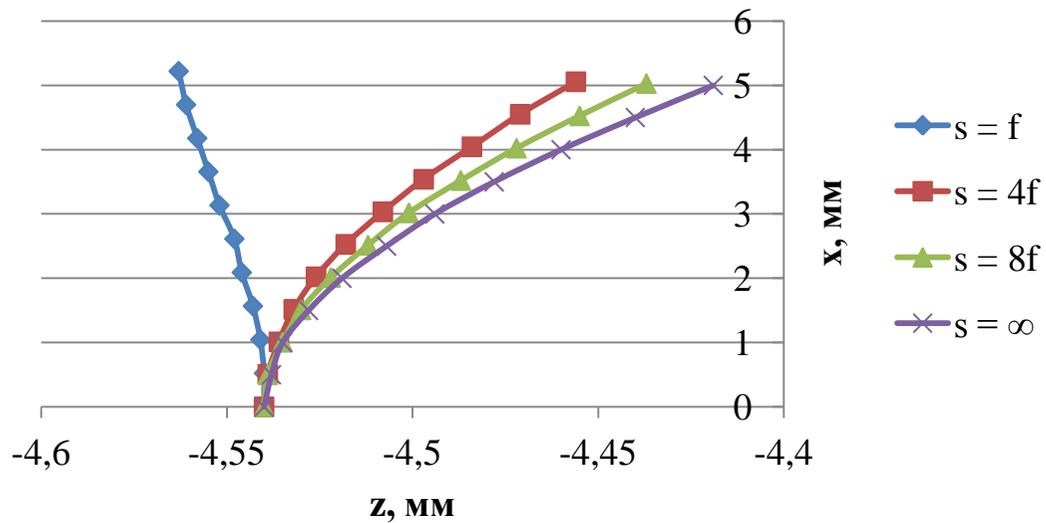


Рисунок 3.51 – Профили задней главной поверхности объектива №3

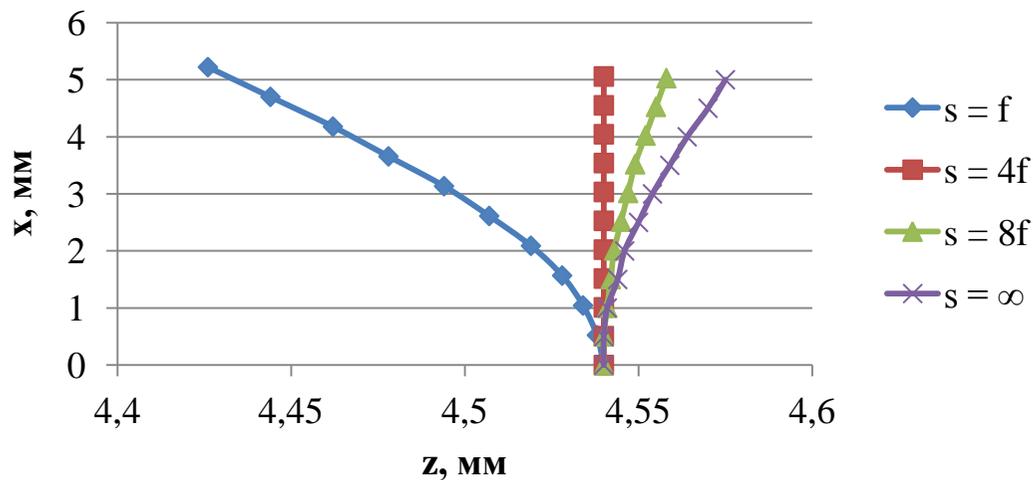


Рисунок 3.52 – Профили передней главной поверхности объектива №3

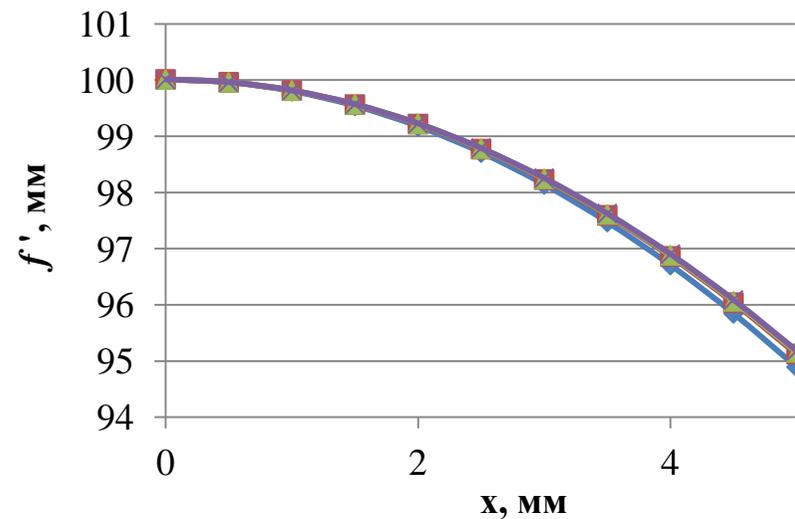


Рисунок 3.53 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №3

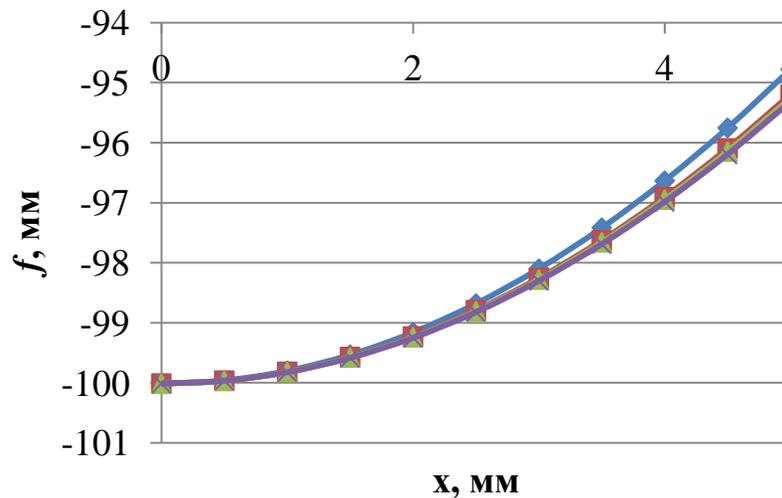


Рисунок 3.54 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №3

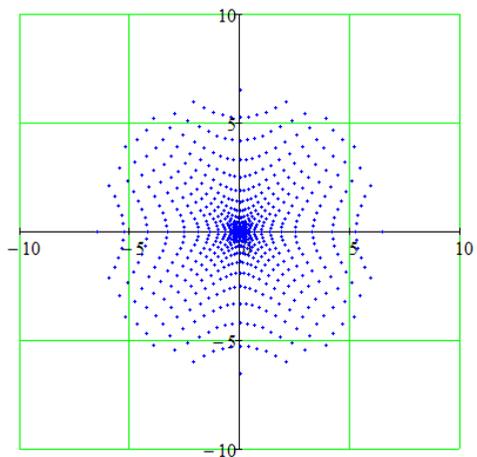


Рисунок 3.55 – Точечные
диаграммы объектива №3 в ПГ
для $s = f$

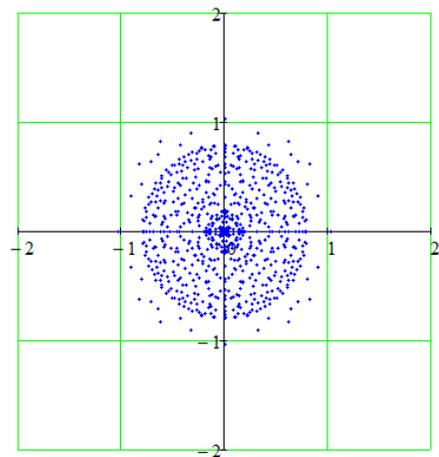


Рисунок 3.56 – Точечные
диаграммы объектива №3 в ПНУ
для $s = f$

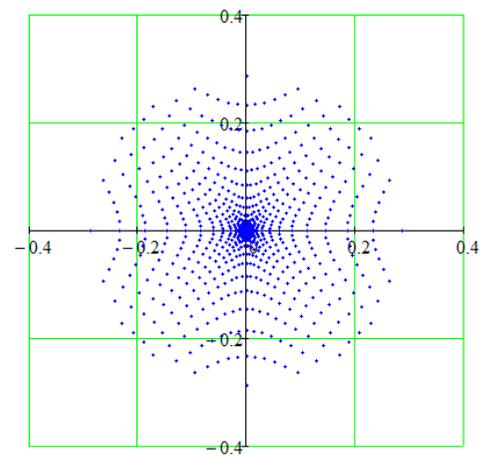


Рисунок 3.59 – Точечные
диаграммы объектива №3 в ПГ
для $s = 8f$

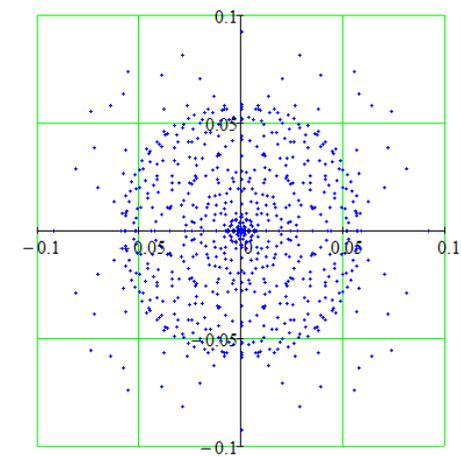


Рисунок 3.60 – Точечные
диаграммы объектива №3 в ПНУ
для $s = 8f$

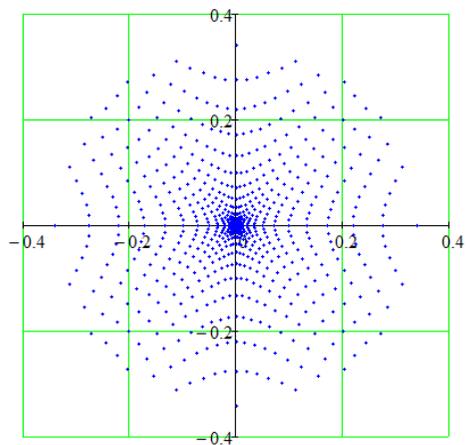


Рисунок 3.57 – Точечные
диаграммы объектива №3 в ПГ
для $s = 4f$

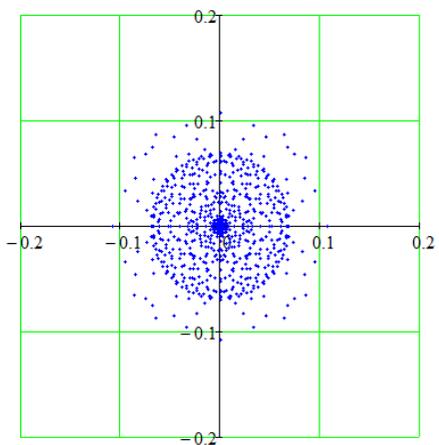


Рисунок 3.58 – Точечные
диаграммы объектива №3 в ПНУ
для $s = 4f$

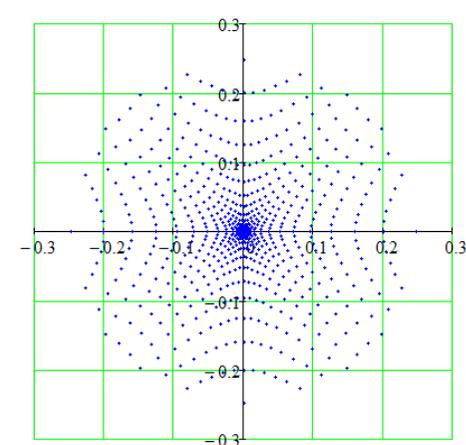


Рисунок 3.61 – Точечные
диаграммы объектива №3 в ПГ
для $s = \infty$

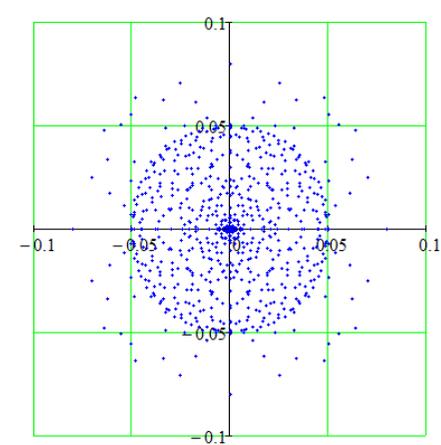


Рисунок 3.62 – Точечные
диаграммы объектива №3 в ПНУ
для $s = \infty$

Результаты расчета профилей главных поверхностей *объектива №4* представлены на рисунках 3.63 и 3.64. Необходимо отметить, что при выполнении расчетов на расстоянии $s = f$ результаты были представлены в виде комплексных чисел. Увеличение расстояния до $s = 2f$ и $s = 3f$ не дало перехода к действительным числам, в связи с чем расчеты на расстоянии $s = f$ выполнялись для апертуры 44 мм (именно начиная с этого значения произошел переход от комплексных чисел к действительным). Расчеты на расстояниях $s = 4f, 8f$ и ∞ выполнялись при заданном значении апертуры (100 мм).

Из рисунка 3.63 видно, что отличия профилей задних главных поверхностей от плоскости в крайних точках составляют единицы и десятки миллиметров и увеличиваются при увеличении расстояния от точечного источника света до передней поверхности объектива. Что касается профилей передних главных поверхностей (рисунок 3.64), то их наибольшее отклонение от плоскости наблюдается на расстоянии $s = f$, а наименьшее – на расстоянии $s = \infty$.

На рисунках 3.65 и 3.66 приведены графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке *объектива №4*. Из графиков видно, что лучевые фокусные расстояния отличаются от заданного не только в меньшую, но и в большую сторону. В представленном исследовании это наблюдается впервые.

На рисунках 3.67, 3.68, 3.69, 3.70, 3.71, 4.72, 3.73 и 3.74 изображены точечные диаграммы в ПГ и в ПНУ для различных расстояний от точечного источника света до передней поверхности *объектива №4* для оценки его aberrаций, которые, как и в предыдущих случаях, уменьшаются с увеличением расстояния s . Анализ диаграмм позволяет заключить, что при увеличении aberrаций отличия профилей задних главных поверхностей от плоскости уменьшаются. Наибольшее отклонение профилей передних главных поверхностей от плоскости происходит в случае максимальных aberrаций ($s = f$), а наименьшее – в случае минимальных aberrаций ($s = \infty$).

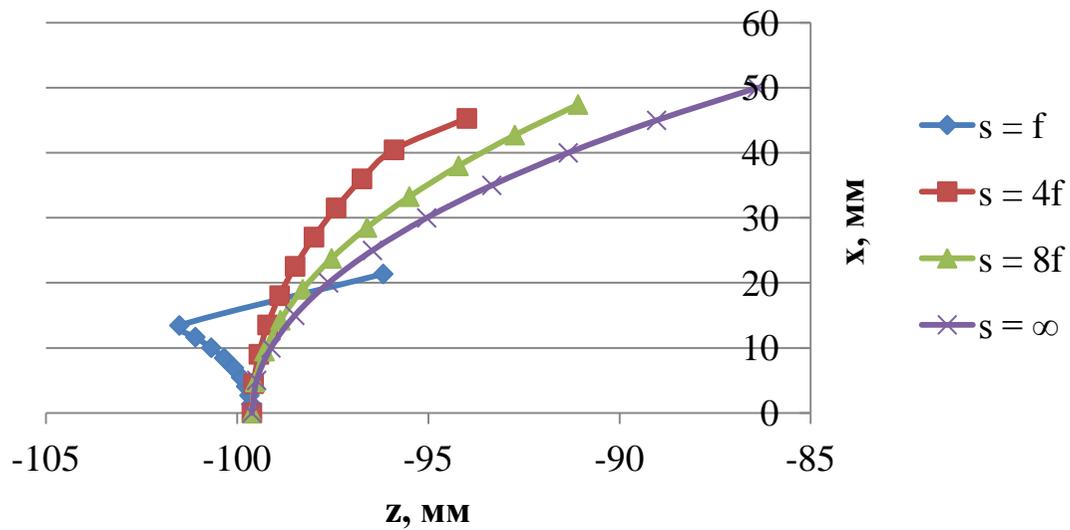


Рисунок 3.63 – Профили задней главной поверхности объектива №4

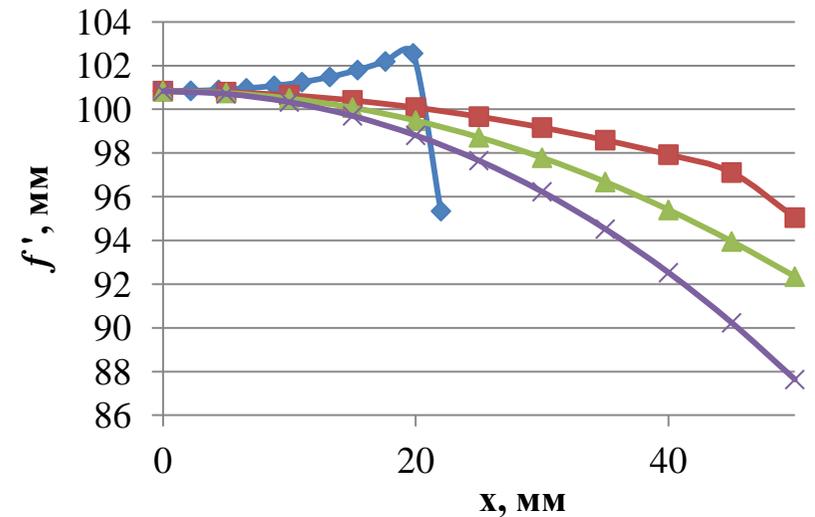


Рисунок 3.65 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №4

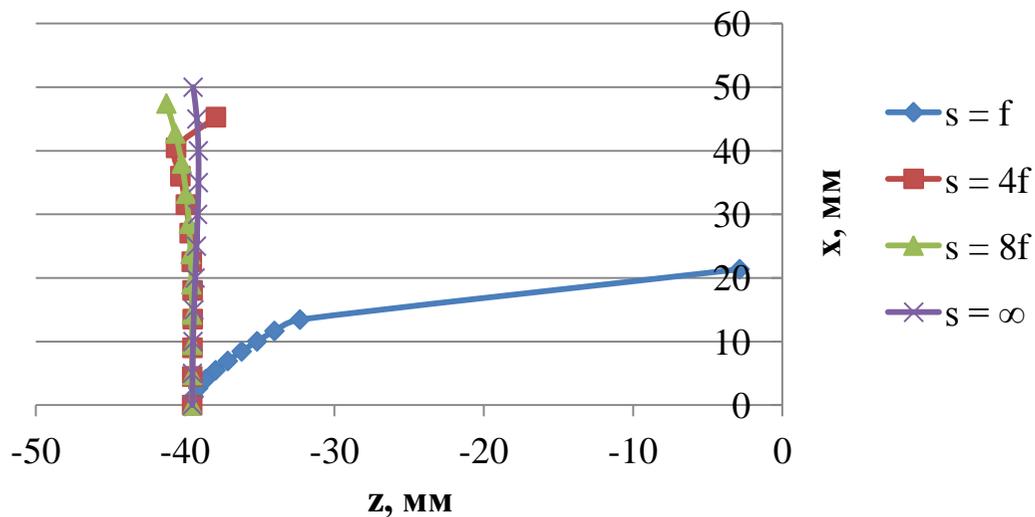


Рисунок 3.64 – Профили передней главной поверхности объектива №4

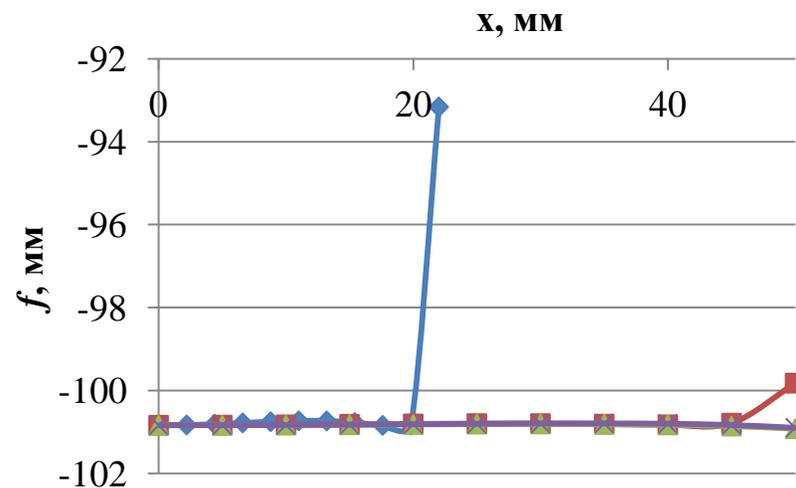


Рисунок 3.66 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №4

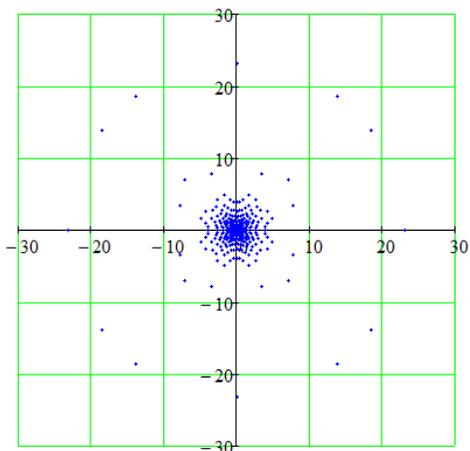


Рисунок 3.67 – Точечные
диаграммы объектива №4 в ПГ
для $s = f$

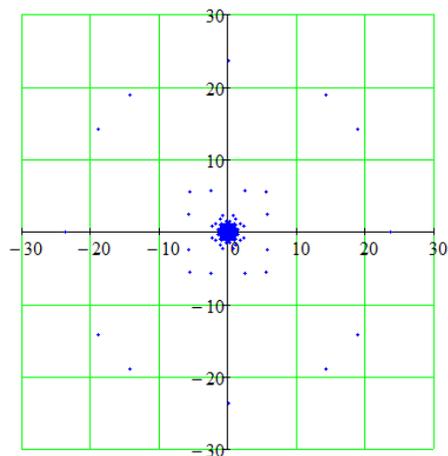


Рисунок 3.68 – Точечные
диаграммы объектива №4 в ПНУ
для $s = f$

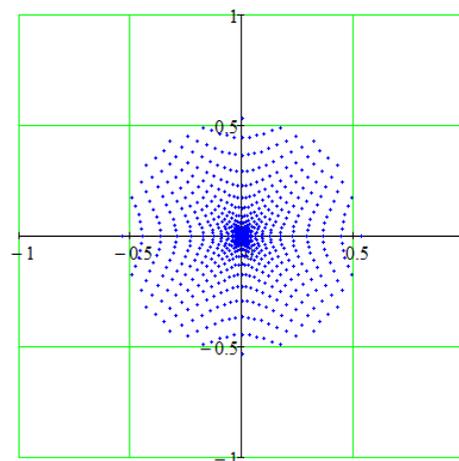


Рисунок 3.71 – Точечные
диаграммы объектива №4 в ПГ
для $s = 8f$

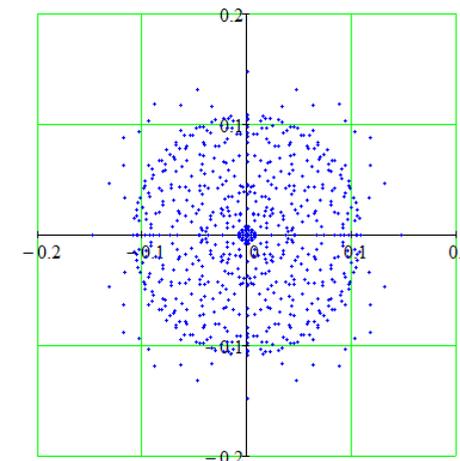


Рисунок 3.72 – Точечные
диаграммы объектива №4 в ПНУ
для $s = 8f$

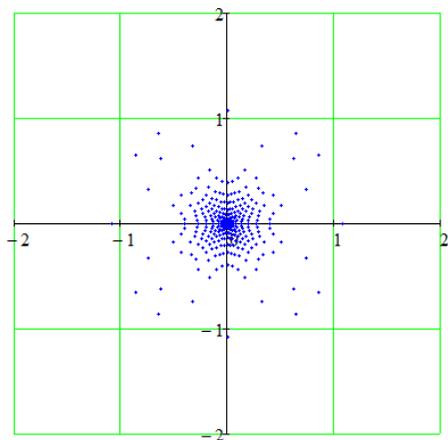


Рисунок 3.69 – Точечные
диаграммы объектива №4 в ПГ
для $s = 4f$

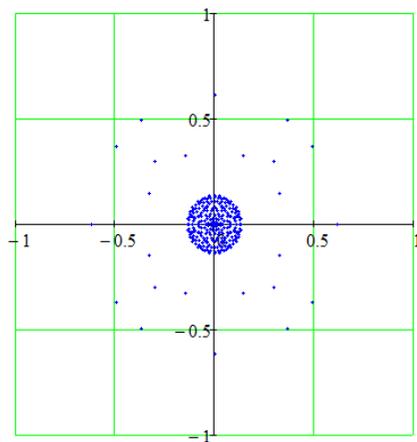


Рисунок 3.70 – Точечные
диаграммы объектива №4 в ПНУ
для $s = 4f$

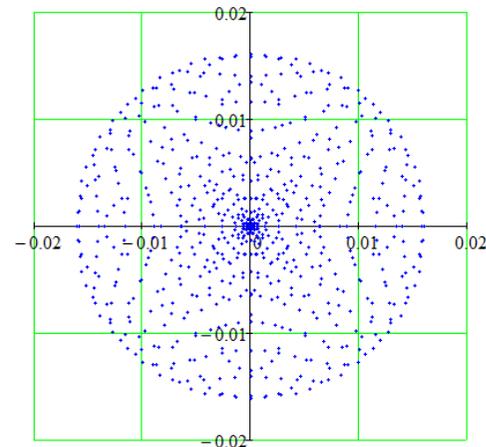


Рисунок 3.73 – Точечные
диаграммы объектива №4 в ПГ
для $s = \infty$

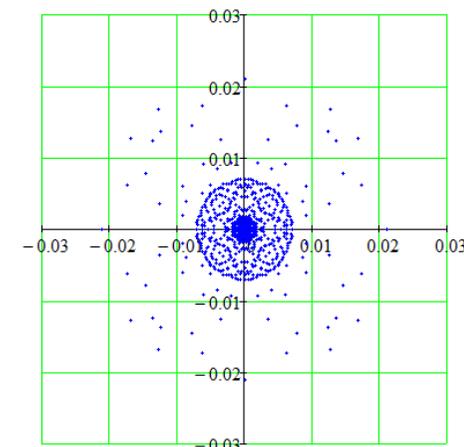


Рисунок 3.74 – Точечные
диаграммы объектива №4 в ПНУ
для $s = \infty$

Результаты расчета профилей главных поверхностей *объектива №5* показаны на рисунках 3.75 и 3.76, из которых видно, что знаки кривизны профилей на заданных расстояниях s различны. Отклонения профилей задних главных поверхностей от плоскости в крайних точках составляют доли миллиметров и увеличиваются с увеличением расстояния от точечного источника света до передней поверхности объектива (рисунок 3.75). Отклонения профилей передних главных поверхностей от плоскости максимальны на расстоянии $s = f$ (рисунок 3.76).

На рисунках 3.77 и 3.78 приведены графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке *объектива №5*. Из графиков видно, что лучевые фокусные расстояния отличаются от параксиального (97,372 мм) не только в меньшую, но и в большую сторону. Это можно наблюдать на всех расстояниях s . Для $s = f$ заднее фокусное расстояние в крайней точке составляет 156,69 мм, для $s = 4f$ – 102,05 мм, для $s = 8f$ – 99,84 мм, для $s = \infty$ – 98,15 мм. Переднее фокусное расстояние для $s = f$ в крайней точке составляет 156,13 мм, для $s = 4f$ – 102,25 мм, для $s = 8f$ – 100,13 мм, для $s = \infty$ – 98,52 мм.

Для оценки аберраций *объектива №5* на рисунках 3.79, 3.80, 3.81, 3.82, 3.83, 3.84, 3.85 и 3.86 представлены точечные диаграммы в ПГ и в ПНУ для различных расстояний от точечного источника света до передней поверхности объектива. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что при увеличении аберраций искривление профилей задней главной поверхности объектива происходит слабее, а искривление профилей передней главной поверхности – сильнее.

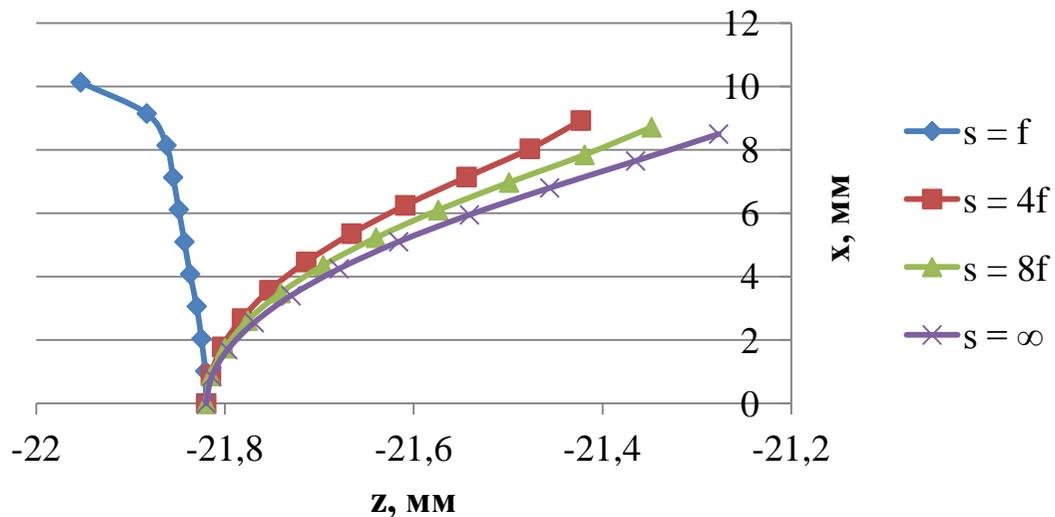


Рисунок 3.75 – Профили задней главной поверхности объектива №5

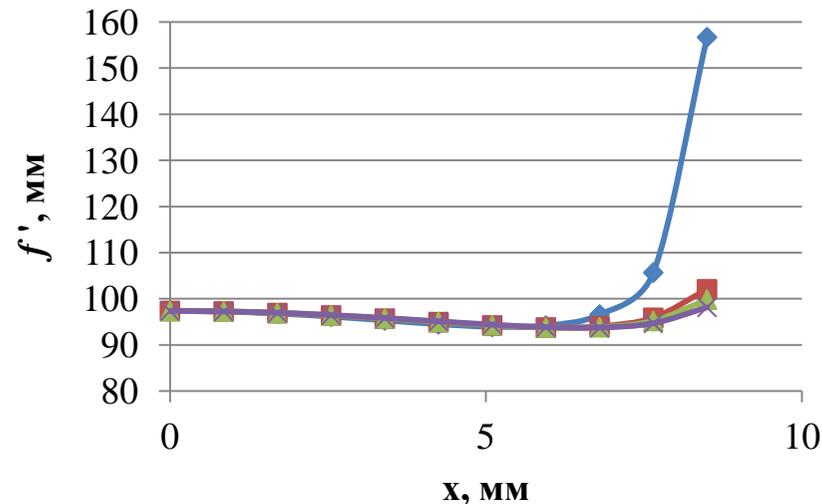


Рисунок 3.77 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №5

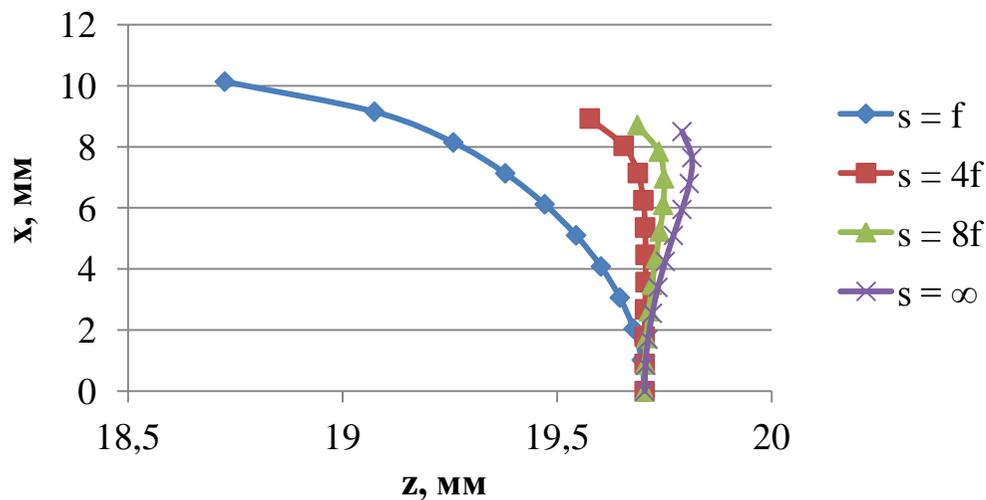


Рисунок 3.76 – Профили передней главной поверхности объектива №5

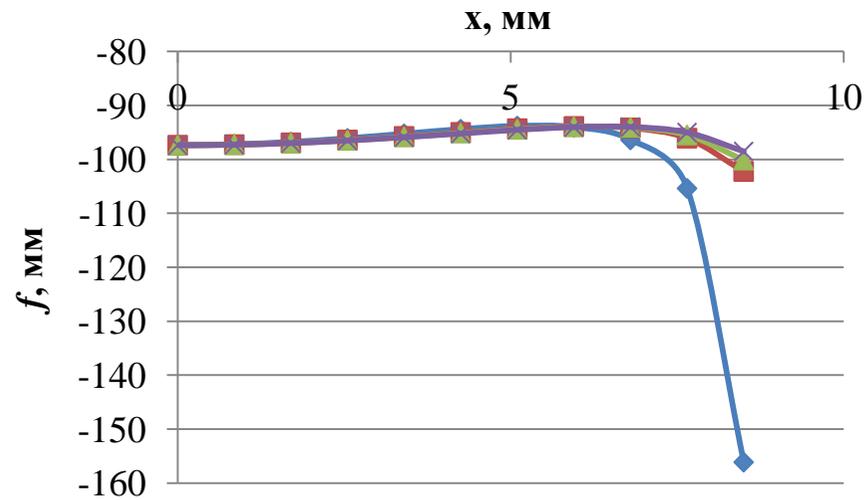


Рисунок 3.78 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №5

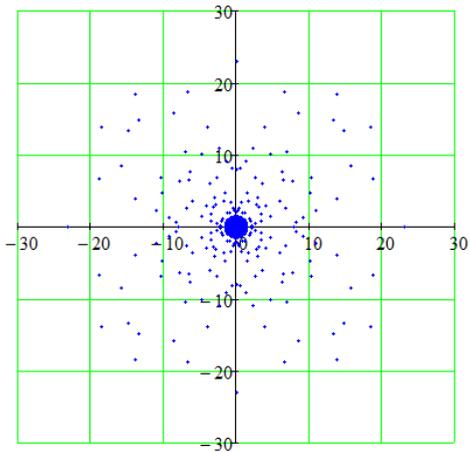


Рисунок 3.79 – Точечные
диаграммы объектива №5 в ПГ
для $s = f$

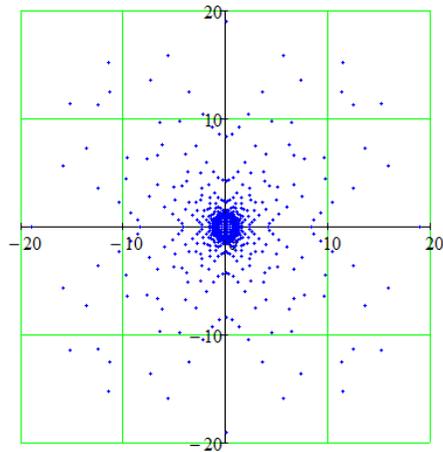


Рисунок 3.80 – Точечные
диаграммы объектива №5 в ПНУ
для $s = f$

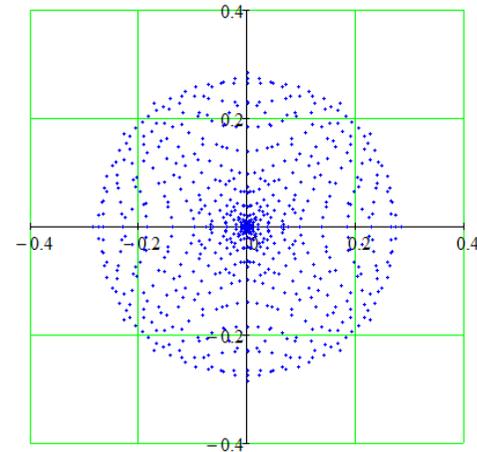


Рисунок 3.83 – Точечные
диаграммы объектива №5 в ПГ
для $s = 8f$

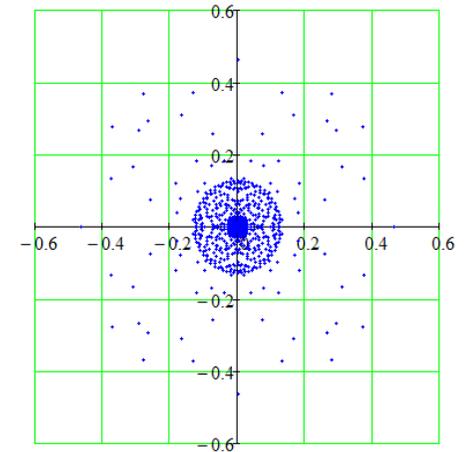


Рисунок 3.84 – Точечные
диаграммы объектива №5 в ПНУ
для $s = 8f$

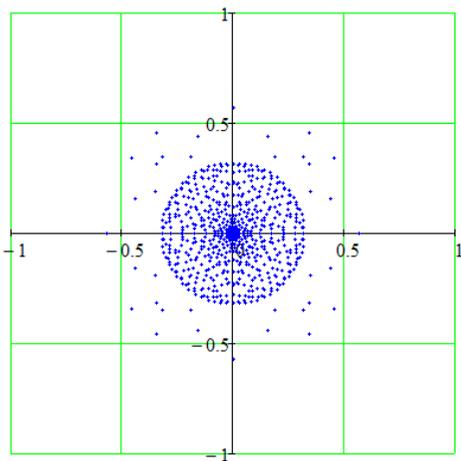


Рисунок 3.81 – Точечные
диаграммы объектива №5 в ПГ
для $s = 4f$

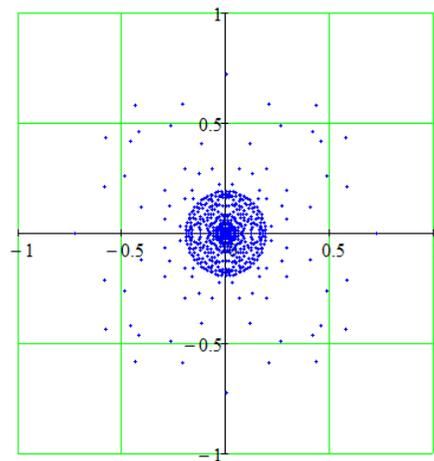


Рисунок 3.82 – Точечные
диаграммы объектива №5 в ПНУ
для $s = 4f$

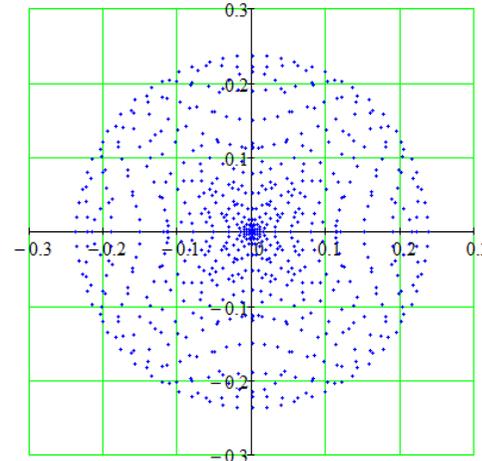


Рисунок 3.85 – Точечные
диаграммы объектива №5 в ПГ
для $s = \infty$

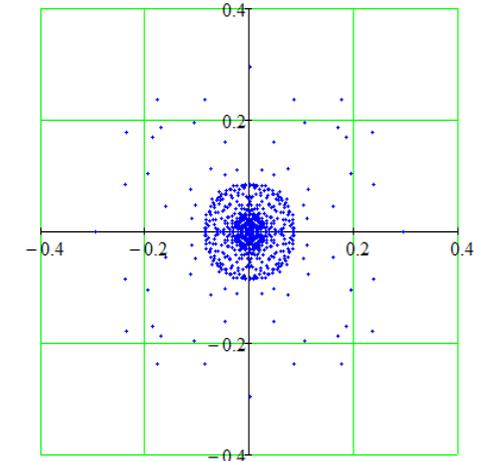


Рисунок 3.86 – Точечные
диаграммы объектива №5 в ПНУ
для $s = \infty$

Результаты расчета профилей главных поверхностей *объектива №6* представлены на рисунках 3.87 и 3.88, из которых видно, что знаки кривизны профилей на заданных расстояниях s различны. Отклонения профилей задних главных поверхностей от плоскости в крайних точках составляют доли миллиметров и увеличиваются с увеличением расстояния от точечного источника света до передней поверхности объектива (для $s = f$ отклонение составляет 0,137 мм, для $s = 4f$ – 0,221 мм, для $s = 8f$ – 0,276 мм, для $s = \infty$ – 0,329 мм). Максимальное отклонение профиля передней главной поверхности от плоскости наблюдается на расстоянии $s = f$ и составляет 0,349 мм, минимальное отклонение наблюдается на расстоянии $s = 4f$ и составляет 0,029 мм.

На рисунках 3.89 и 3.90 приведены графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке *объектива №6*. Из представленных графиков видно, что значения заднего и переднего лучевых фокусных расстояний в крайнем положении луча превышают параксиальное (103,05 мм) на всех расстояниях от точечного источника света до передней поверхности объектива.

Для оценки аберраций *объектива №6* на рисунках 3.91, 3.92, 3.93, 3.94, 3.95, 3.96, 3.97 и 3.98 представлены точечные диаграммы в ПГ и в ПНУ для различных расстояний s . Анализ полученных результатов позволяет заключить, что при уменьшении аберраций искривление профилей задней главной поверхности происходит сильнее. Наибольшее отклонение профилей передней главной поверхности объектива от плоскости наблюдается в случае максимальных аберраций, а наименьшее – в случае средних аберраций ($s = 4f$).

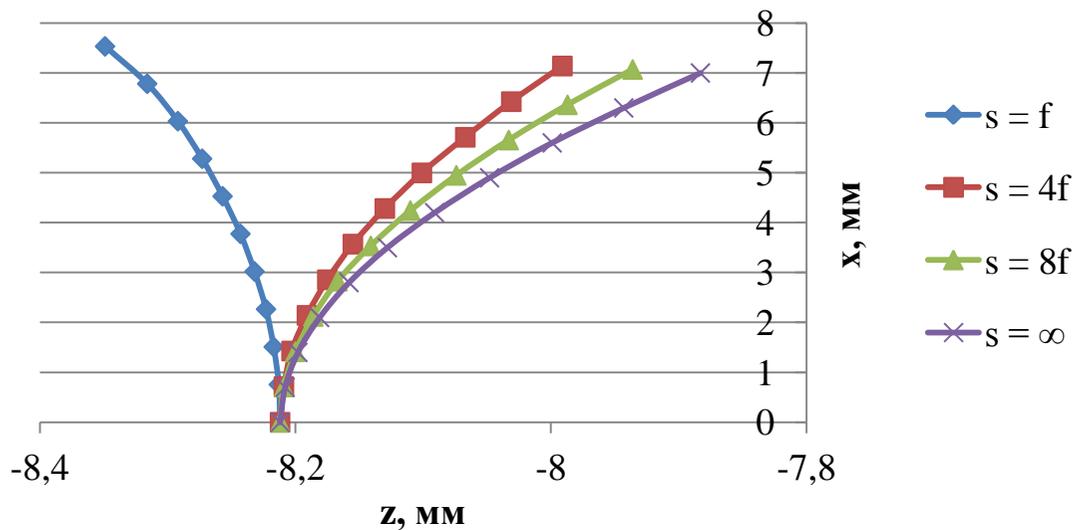


Рисунок 3.87 – Профили задней главной поверхности объектива №6

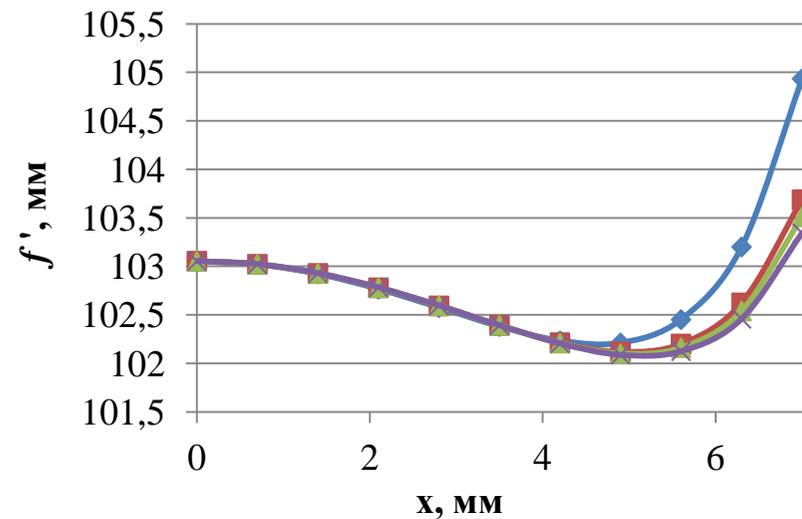


Рисунок 3.89 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №6

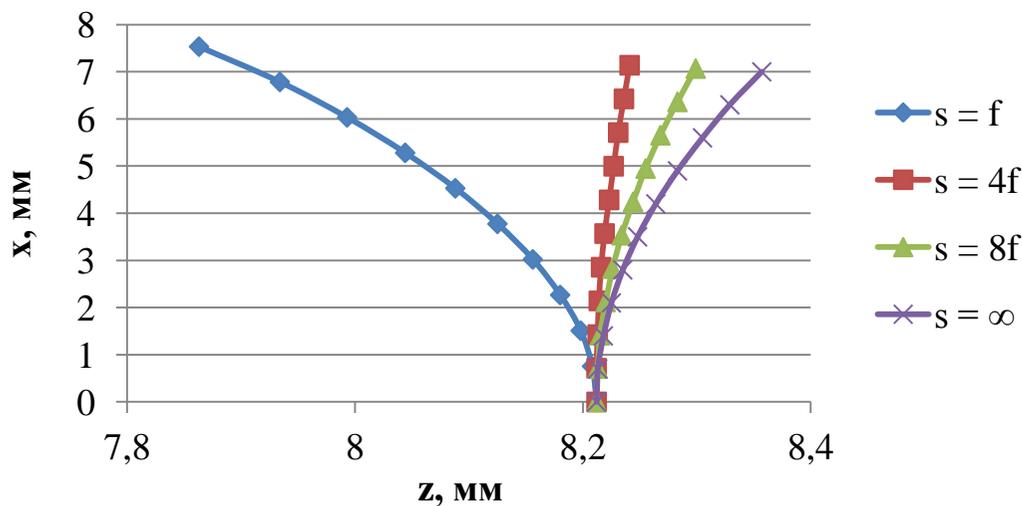


Рисунок 3.88 Профили передней главной поверхности объектива №6

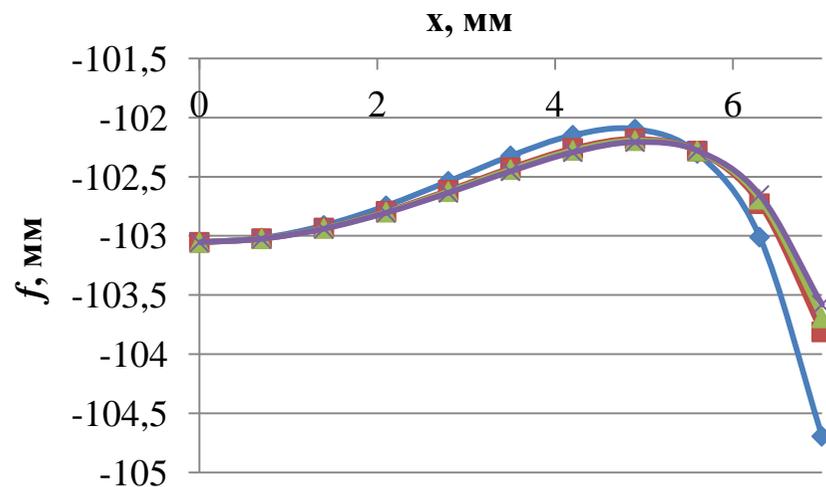


Рисунок 3.90 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №6

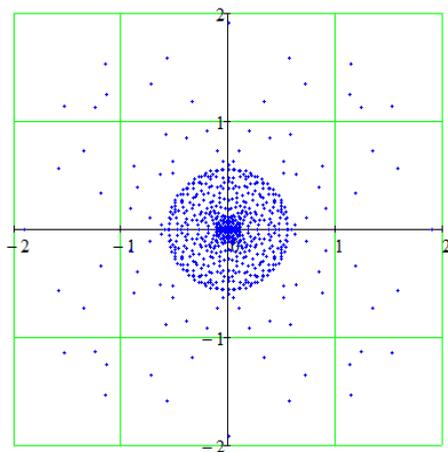


Рисунок 3.91 – Точечные диаграммы объектива №6 в ПГ для $s = f$

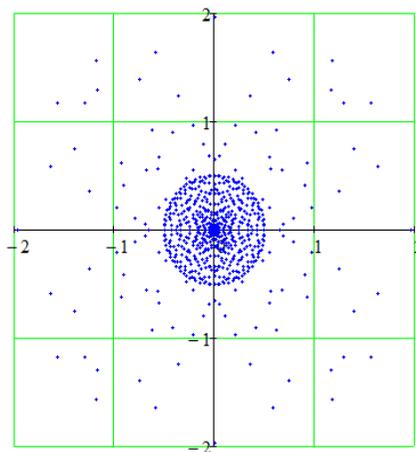


Рисунок 3.92 – Точечные диаграммы объектива №6 в ПНУ для $s = f$

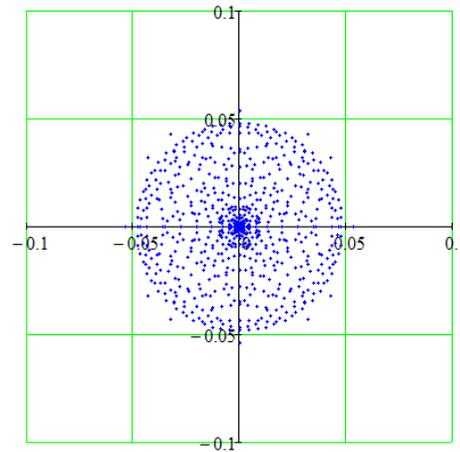


Рисунок 3.95 – Точечные диаграммы объектива №6 в ПГ для $s = 8f$

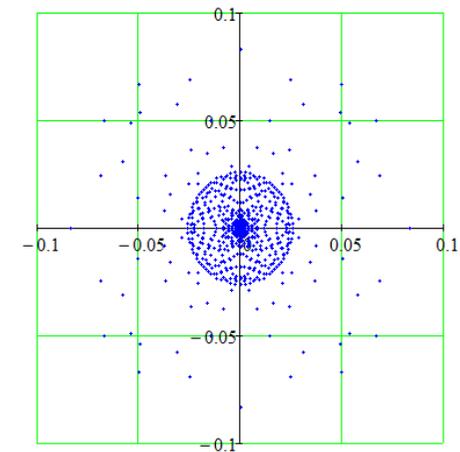


Рисунок 3.96 – Точечные диаграммы объектива №6 в ПНУ для $s = 8f$

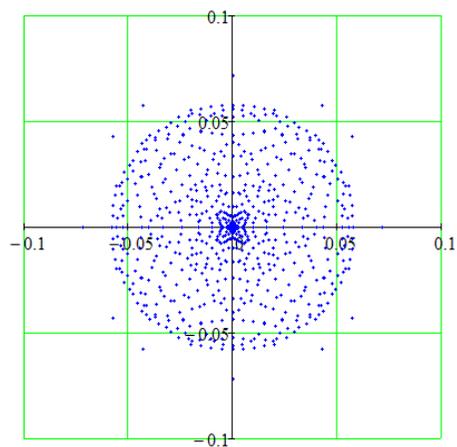


Рисунок 3.93 – Точечные диаграммы объектива №6 в ПГ для $s = 4f$

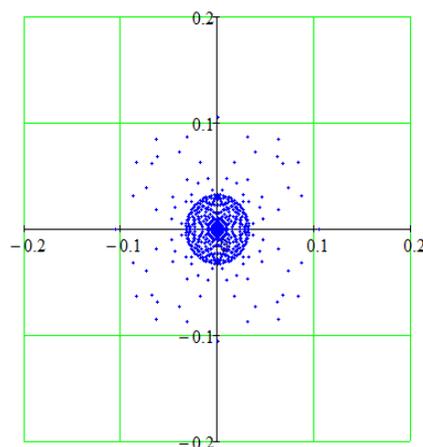


Рисунок 3.94 – Точечные диаграммы объектива №6 в ПНУ для $s = 4f$

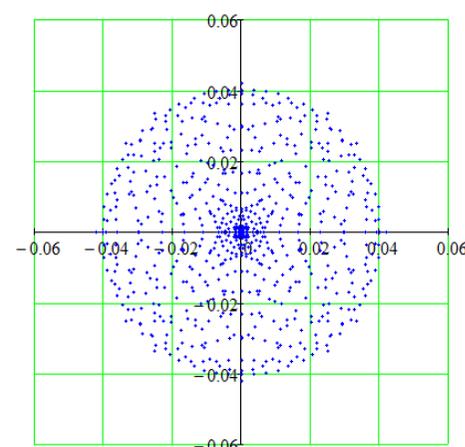


Рисунок 3.97 – Точечные диаграммы объектива №6 в ПГ для $s = \infty$

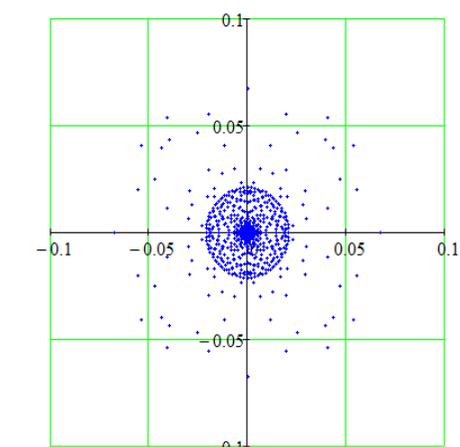


Рисунок 3.98 – Точечные диаграммы объектива №6 в ПНУ для $s = \infty$

Результаты расчета профилей главных поверхностей *объектива №7* представлены на рисунках 3.99 и 3.100. Стоит отметить, что при выполнении расчетов на расстоянии $s = f$ результаты были представлены в виде комплексных чисел. Увеличение расстояния до $s = 2f$ позволило перейти к действительным числам. В связи этим минимальное расстояние при расчетах было увеличено до $2f$.

Из представленных рисунков видно, что знаки кривизны профилей на заданных расстояниях s различны. Отличия профилей задних главных поверхностей от плоскости в крайних точках составляют единицы миллиметров (для $s = 2f - 2,98$ мм, для $s = 4f - 1,23$ мм, для $s = 8f - 2,31$ мм, для $s = \infty - 3,14$ мм). На расстоянии $s = 2f$ профиль передней главной поверхности в крайней точке отклоняется от плоскости на 43,18 мм. Это весьма высокое значение. На расстояниях $4f$, $8f$ и ∞ отклонения от плоскости составляют единицы и доли миллиметров.

На рисунках 3.101 и 3.102 приведены графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке *объектива №7*. Из рисунка 3.101 видно, что на расстояниях $s = 4f$, $8f$ и ∞ наблюдается уменьшение заднего лучевого фокусного расстояния относительно параксиального, а на расстоянии $s = 2f$ происходит его увеличение. Из рисунка 3.102 видно, что на расстояниях $s = 2f$, $4f$ и $8f$ наблюдается увеличение переднего лучевого фокусного расстояния относительно параксиального, а на расстоянии $s = \infty$ происходит его уменьшение.

Для оценки аберраций *объектива №7* на рисунках 3.103, 3.104, 3.105, 3.106, 3.107, 3.108, 3.109 и 3.110 представлены точечные диаграммы в ПГ и в ПНУ для различных расстояний s . Анализ полученных результатов позволяет заключить, что наибольшее отклонение профилей задней главной поверхности объектива от плоскости наблюдается в случае минимальных аберраций, а наименьшее отклонение – в случае средних аберраций ($s = 4f$). Что касается профилей передней главной поверхности, то их отклонения от плоскости уменьшаются с уменьшением аберраций объектива.

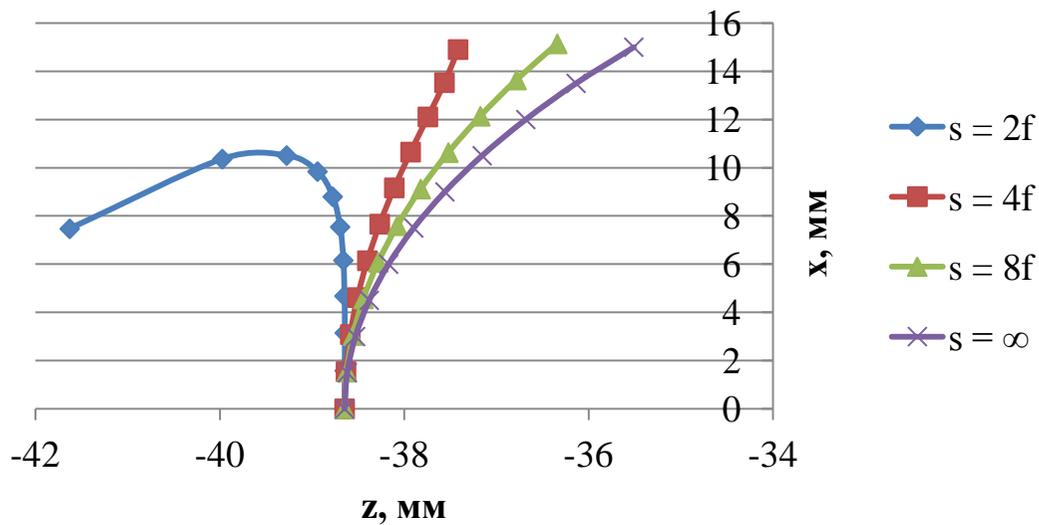


Рисунок 3.99 – Профили задней главной поверхности объектива №7

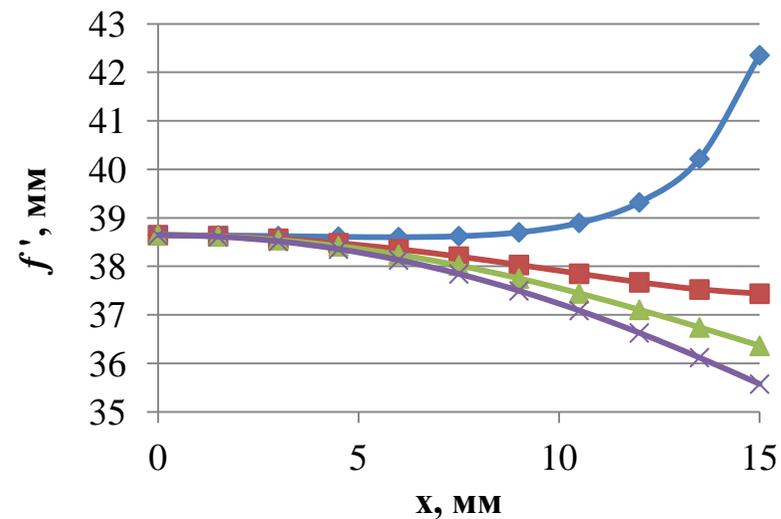


Рисунок 3.101 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №7

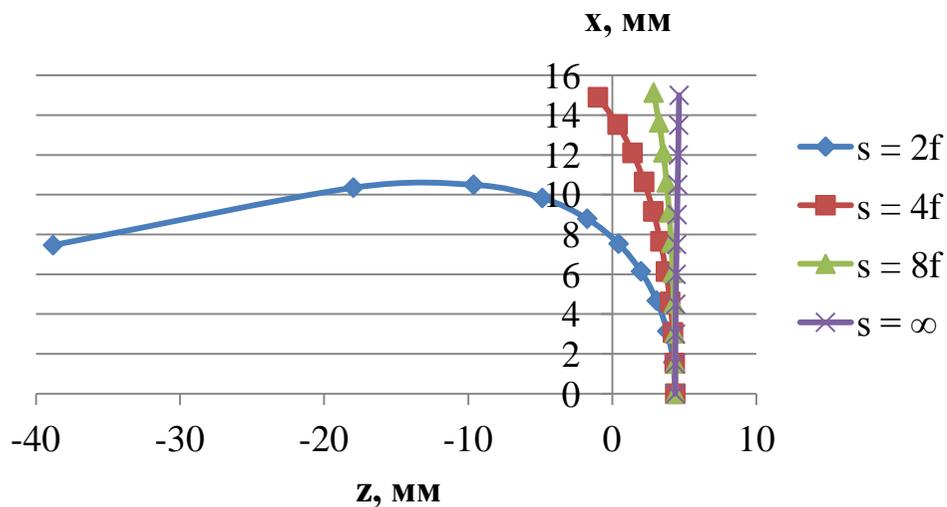


Рисунок 3.100 – Профили передней главной поверхности объектива №7

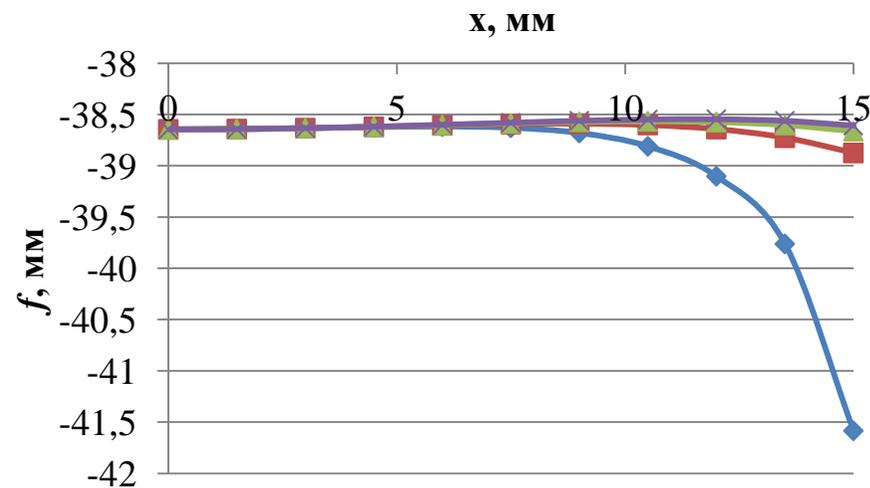


Рисунок 3.102 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке объектива №7

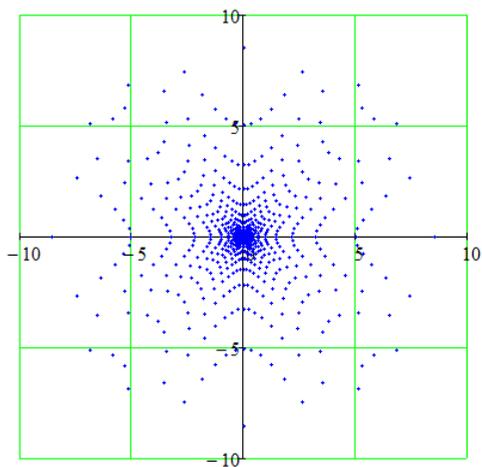


Рисунок 3.103 – Точечные
диаграммы объектива №7 в ПГ
для $s = 2f$

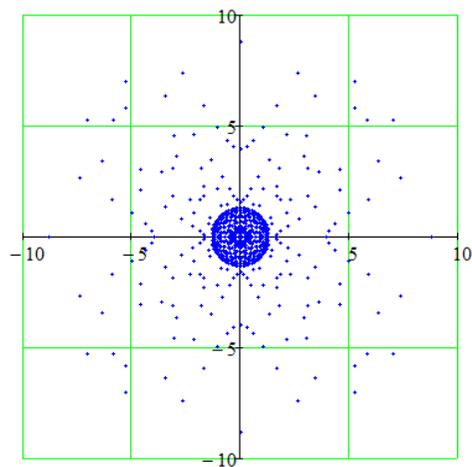


Рисунок 3.104 – Точечные
диаграммы объектива №7 в ПНУ
для $s = 2f$

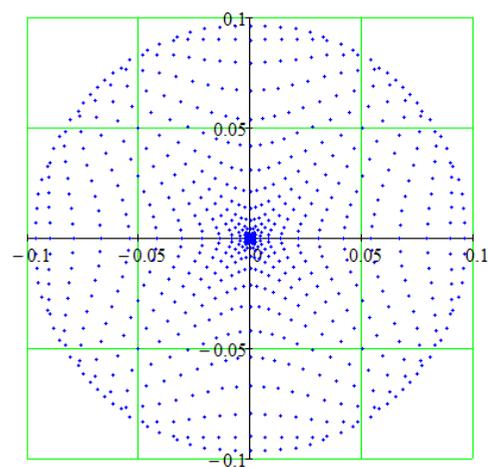


Рисунок 3.107 – Точечные
диаграммы объектива №7 в ПГ
для $s = 8f$

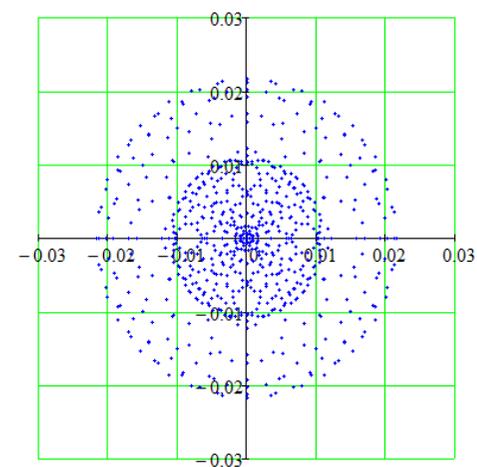


Рисунок 3.108 – Точечные
диаграммы объектива №7 в ПНУ
для $s = 8f$

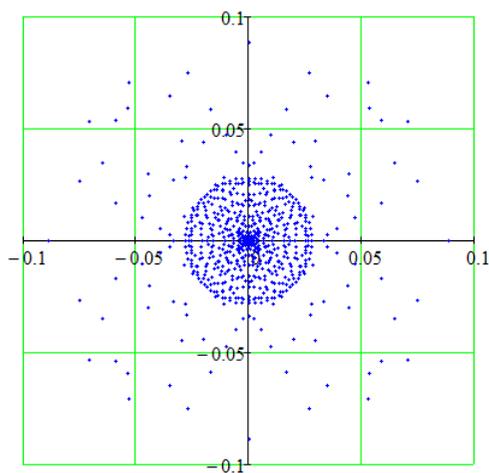


Рисунок 3.105 – Точечные
диаграммы объектива №7 в ПГ
для $s = 4f$

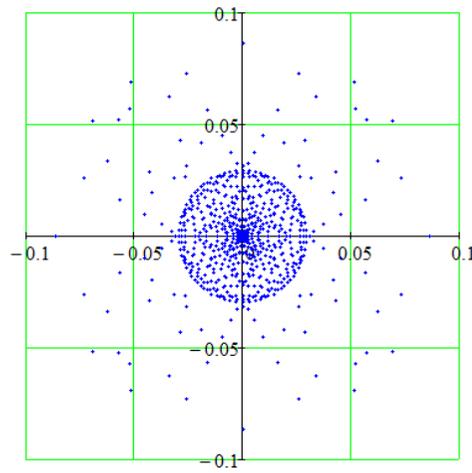


Рисунок 3.106 – Точечные
диаграммы объектива №7 в ПНУ
для $s = 4f$

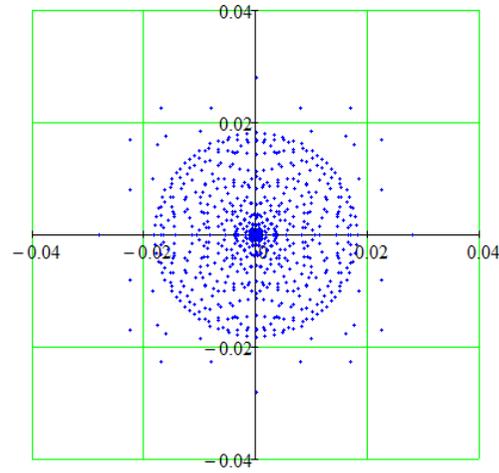


Рисунок 3.109 – Точечные
диаграммы объектива №7 в ПГ
для $s = \infty$

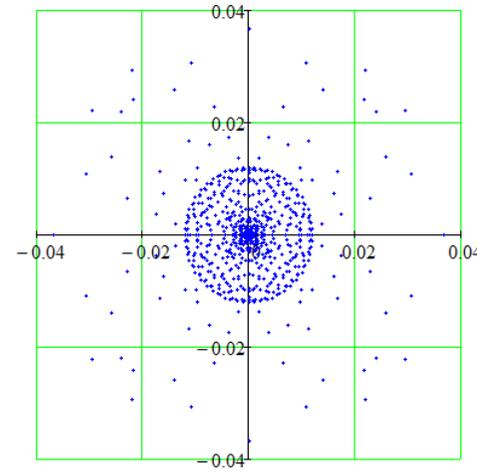


Рисунок 3.110 – Точечные
диаграммы объектива №7 в ПНУ
для $s = \infty$

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В данном разделе магистерской диссертации проведен анализ коммерческой ценности исследования кардинальных элементов оптических систем в области реальных лучей.

Основной целью раздела является оценка потенциала и перспективности проведения исследований, позволяющая упростить поиски источников финансирования, а также планирование научно-исследовательских работ, которое обеспечивает структурированное проведение расчетов и рациональное распределение затрат.

4.1. Предварительный анализ научного исследования

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Целевым рынком, где результаты исследования кардинальных элементов оптической системы в области реальных лучей могут быть высоко востребованы, являются научно-исследовательские и научно-технические организации, занимающиеся изучением, проектированием, моделированием и реализацией различных оптических систем.

Для сегментирования рынка выбрано два основных критерия, это:

- географический (государственное распределение);
- технологический (отраслевое распределение).

На основании выбранных критериев построена карта сегментирования целевого рынка (таблица 4.1), которая наглядно демонстрирует, какие ниши на рынке уже удалось охватить, а какие еще не заняты. Россия – основной потребитель проводимых исследований, а это значит, что укрепление позиций стоит проводить именно в этом направлении. Перспективными потребителями в будущем могут стать Китай и Америка, поэтому стоит реализовать интенсивное ориентирование в их сторону.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования целевого рынка

		Государство-потребитель		
		РФ	США	КНР
Отрасль работ организации	Научные исследования			
	Приборостроение			

4.1.2. SWOT-анализ

Выделив сильные и слабые стороны исследования, а также оценив его потенциальные возможности и угрозы, можно выполнить комплексный анализ научного исследования и выявить его соответствие внешним условиям окружающей среды (таблица 4.2), которое позволяет определить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны: <u>С1.</u> Научная новизна исследования. <u>С2.</u> Уникальное программное обеспечение. <u>С3.</u> Понятная визуализация результатов исследования.</p>	<p>Слабые стороны: <u>Сл1.</u> Малоизвестность проводимого исследования.</p>
<p>Возможности: <u>В1.</u> Получение уникальных результатов исследования. <u>В2.</u> Расширение целевого рынка.</p>	<p>1. Достижение высоких результатов исследования за счет использования уникального программного обеспечения. 2. Увеличение заинтересованности к исследованию за счет его новизны и понятного представления полученных результатов.</p>	<p>1. Трудности расширения целевого рынка в связи с малоизвестностью проводимого исследования.</p>
<p>Угрозы: <u>У1.</u> Невостребованность результатов исследования.</p>	<p>1. Невостребованность результатов исследования в связи с их научной новизной.</p>	<p>1. Слабая заинтересованность в результатах исследования в связи с его малоизвестностью.</p>

Анализ матрицы SWOT позволяет сделать вывод о том, что исследование имеет хороший потенциал за счет своей новизны и простоты

представления полученных результатов. Благодаря сильным сторонам научного исследования реализация возможностей является посильной задачей, однако наличие угроз может негативно сказаться на исследовании, поэтому необходимо обратить внимание на его слабые стороны и по возможности свести их к минимуму.

4.2. Инициация научного исследования

4.2.1. Цели и результаты научного исследования

Цели и ожидаемые результаты научного исследования представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Цели и результаты научного исследования

Цели исследования	Удостовериться в том, что главные плоскости оптических систем в области реальных лучей представляют собой поверхности, которые можно описать полиномами некоторого порядка.
Ожидаемые результаты исследования	Выявить закономерность изменения профилей главных поверхностей оптических систем в области реальных лучей.
Требования к результату исследования	Понятная визуализация результатов. Грамотное объяснение полученных результатов.

4.2.2. Организационная структура научного исследования

Рабочая группа исследования, роль и функции каждого ее участника представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Рабочая группа научного исследования

ФИО, основное место	Роль в исследовании	Функции	Трудо- затраты,
--------------------------------	----------------------------	----------------	----------------------------

работы, должность			часы
Агапов Н.А., профессор кафедры ЛиСТ ИФВТ НИ ТПУ	Научный руководитель	Координация деятельности исполнителя; проверка и анализ результатов исследования.	200
Калошина М.А., магистрант кафедры ЛиСТ ИФВТ НИ ТПУ	Исполнитель	Выполнение расчетов; визуализация и анализ полученных результатов.	300

4.3. Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1. План научного исследования

Планированием называют оптимальное распределение ресурсов для достижения поставленных целей. Именно поэтому ему стоит уделить особое внимание. Для получения высокой эффективности планирования был составлен календарный план исследования, а также проведено распределение исполнителей по видам работ (таблица 4.5). Наглядная иллюстрация календарного плана представлена диаграммой Ганта (таблица 4.6).

Таблица 4.5 – Календарный план научного исследования

Вид работ	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Изучение теоретического материала	80	1.10.15	20.12.15	Калошина М.А.
Литературный обзор	80	1.02.16	20.04.16	Калошина М.А.
Проведение расчетных работ	285	1.05.16	15.02.17	Калошина М.А.
Анализ полученных результатов	40	1.03.17	10.04.17	Агапов Н.А., Калошина М.А.

Таблица 4.6 – Диаграмма Ганта

Вид работ	Исполнители	Длительность, дни	Продолжительность выполнения работ											
			2015 год											
			октябрь			ноябрь			декабрь					
Изучение теоретического материала	Калошина М.А.	80												
2016 год														
			февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	
Литературный обзор	Калошина М.А.	80												
Проведение расчетных работ	Калошина М.А.	285												
2017 год														
			январь			февраль			март			апрель		
Проведение расчетных работ	Калошина М.А.	285												
Анализ полученных результатов	Агапов Н.А., Калошина М.А.	40												

 – научный руководитель

 – студент

ания

При выполнении научного исследования затраты приходились на следующие статьи:

- специальное оборудование;
- заработная плата;
- отчисления на социальные нужды;
- накладные расходы.

4.3.2.1. Специальное оборудование для научных работ

Так как научное исследование заключается в выполнении компьютерных расчетов и построении графиков и диаграмм, то единственным необходимым оборудованием является персональный компьютер (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Затраты на приобретение спецоборудования

Наименование оборудования	Количество единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Затраты на доставку и монтаж (15% от цены оборудования), руб.	Общая стоимость, руб.
Ноутбук	1	25 000	3 750	28 750
Итого: 28 750 руб.				

4.3.2.2. Зарботная плата исполнителей исследования

Зарботная плата ($C_{зн}$) участников исследования складывается из основной зарботной платы ($Z_{осн}$) и дополнительной ($Z_{дон}$), которая составляет 15% от основной:

$$C_{зн} = Z_{осн} + Z_{дон}. \quad (4.1)$$

Основная зарботная плата научного руководителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дон} \cdot T_p, \quad (4.2)$$

где $Z_{дон}$ – среднедневная зарботная плата работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником (см. таблицу 4.5).

Среднедневная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{\text{он}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_D}, \quad (4.3)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 48 рабочих дней $M = 10,4$ месяца);

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель
Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней:	
• выходные дни	104
• праздничные дни	14
Потери рабочего времени:	
• отпуск	48
• невыходы по болезни	7
Действительный годовой фонд рабочего времени	192 дня

Месячный должностной оклад работника определяется по формуле:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.4)$$

где Z_b – базовый оклад;

k_{np} – премиальный коэффициент;

k_d – коэффициент доплат и надбавок;

k_p – районный коэффициент.

Результаты расчетов занесены в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель	Z_b , руб.	k_{np}	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{\text{он}}$, руб.	T_p , раб.дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Научный руководитель	36 800	0,3	0,4	1,3	81 328	4 405	40	176 200

Зная основную заработную плату, можно рассчитать заработную плату в целом:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} = Z_{осн} + Z_{осн} \cdot 0,15 = 176\,200 + 26\,430 = 202\,630 \text{ (руб.)}$$

Заработная плата научного руководителя составляет **202 630 рублей**.

4.3.2.3. Отчисления на социальные нужды

Данная статья расходов включает в себя обязательные отчисления во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и др.) и рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.5)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, который составляет 27,1% для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Научный руководитель	176 200	26 430
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого: 54 913 руб.		

4.3.2.4. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты, не попавшие в предыдущие статьи расходов и рассчитываются по формуле:

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.6)$$

где $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов ($0,8 \div 1$).

Накладные расходы научного исследования составляют:

$$C_{накл} = 202\,630 \cdot 0,8 = 162\,104 \text{ (руб.)}$$

4.3.2.5. Формирование бюджета научного исследования

В таблице 4.11 представлен итоговый бюджет исследования, учитывающий все вышеперечисленные статьи расходов.

Таблица 4.11 – Бюджет научного исследования

Наименование статьи	Сумма, руб.
Затраты на специальное оборудование	28 750
Затраты по основной заработной плате	176 200
Затраты по дополнительной заработной плате	26 430
Отчисления на социальные нужды	54 913
Накладные расходы	162 104
Итого: 448 397 руб.	

4.3.3. План управления коммуникациями научного исследования

План управления коммуникациями научного исследования представлен в таблице 4.12, которая отражает требования к коммуникациям со стороны участников научного исследования.

Таблица 4.12 – План управления коммуникациями научного исследования

Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передается информация
Обмен информацией о текущем состоянии исследования	Исполнитель	Научному руководителю	Еженедельно (четверг)
Документы по исследованию	Исполнитель	Научному руководителю	Не позже сроков календарного плана

4.4. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

4.4.1. Оценка сравнительной эффективности научного исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель исследования определяется по следующей формуле:

$$I_{\phi}^u = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (4.7)$$

где Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения научного исследования;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научного исследования.

Так как вариант исполнения один, то $\Phi_{pi} = \Phi_{max}$, а это значит, что:

$$I_{\phi}^u = 1.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности исследования определяется следующим образом:

$$I_p^u = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i, \quad (4.8)$$

где a_i – весовой коэффициент варианта исполнения исследования;

b_i – балльная оценка варианта исполнения исследования, которая устанавливается экспертным путем по пятибалльной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Данные для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Оценка характеристик варианта исполнения научного исследования

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исполнение 1
----------	-------------------------------	--------------

1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5
3. Помехоустойчивость	0,15	4
4. Энергосбережение	0,2	4
5. Надежность	0,25	4
6. Материалоемкость	0,15	5

$$I_p^u = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 4,4$$

Интегральный показатель эффективности варианта исполнения научного исследования определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I = \frac{I_p^u}{I_\phi^u} = \frac{4,4}{1} = 4,4. \quad (4.9)$$

Высокий показатель эффективности исследования подтверждает его продуктивность и результативность, а также доказывает отсутствие необходимости введения других вариантов исполнения.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В данном разделе магистерской диссертации проведен анализ возможных опасных и вредных факторов, возникающих при выполнении расчетных работ за компьютером. Рабочим местом является аудитория 248, расположенная в учебном корпусе 16-В.

Основной целью раздела является рассмотрение оптимальных норм для улучшения условий труда, обеспечения производственной безопасности человека, повышения его производительности, сохранения работоспособности в процессе деятельности, а также охраны окружающей среды

5.1. Производственная безопасность

Любое рабочее место несет в себе потенциальные риски и угрозы здоровью человека. Необходимо четко структурировать всевозможные опасные и вредные факторы (таблица 5.1), чтобы в дальнейшем как можно лучше уберечь себя от них. Знание опасных и вредных факторов позволяет обеспечить их допустимые нормы и предусмотреть средства коллективной и индивидуальной защиты с целью уменьшения негативного воздействия того или иного фактора на человека.

Рассмотрим подробнее вредные факторы, которые могут возникнуть на рабочем месте. Основным источником *электромагнитного излучения* при выполнении расчетных работ является ПЭВМ. Длительное воздействие такого излучения на человека может вызвать ослабление иммунной системы, расстройство нервной системы, а также развитие онкологических заболеваний. По СанПин 2.2.4/2.1.8.055-96 [17] при непрерывной работе за компьютером в течение 5 часов предельно допустимое значение напряженности электрической составляющей ($E_{\text{ПДУ}}$) электромагнитного поля составляет 63 В/м, допустимое значение напряженности магнитной составляющей ($H_{\text{ПДУ}}$) – 6,3 А/В. Во избежание вредного влияния электромагнитных волн на организм, можно применять средства индивидуальной защиты, такие как специальная одежда, защитные очки. Однако при работе за компьютером такими средствами защиты

пользуются крайне редко. Чаще всего в ПЭВМ экранируются блоки управления электронно-лучевой трубкой, а корпус выполняется из стали или же металлизирован изнутри. Это помогает значительно снизить вредное воздействие электромагнитного излучения на организм человека.

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы при выполнении расчетных работ за персональным компьютером

Наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74 [8])		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа за персональным компьютером (расчет профилей главных поверхностей различных оптических систем; построение графиков зависимости лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входных зрачках различных оптических систем; расчет аберраций исследуемых оптических систем).	<p>Физические:</p> <ul style="list-style-type: none"> • повышенный уровень электромагнитных излучений; • повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; • повышенная или пониженная влажность воздуха рабочей зоны; • недостаточная освещенность рабочей зоны. <p>Психофизиологические:</p> <ul style="list-style-type: none"> • умственное перенапряжение; • монотонность труда. 	<p>Физические:</p> <ul style="list-style-type: none"> • повышенный уровень статического электричества; • повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека. 	<p>ГОСТ 12.1.006-84 [9]</p> <p>ГОСТ 12.1.005-88 [10]</p> <p>ГОСТ 12.1.045-84 [11]</p> <p>СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [12]</p> <p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [13]</p> <p>СанПиН 2.2.4.548-96 [14]</p> <p>СП 60.13330.2012 [15]</p> <p>ГОСТ 12.1.038-82 [16]</p>

Недостаточная освещенность рабочей зоны, вызванная нерациональной организацией освещения помещения, негативно сказывается

на здоровье человека, способствует ухудшению функционирования зрительного аппарата, утомляемости нервной системы, снижению работоспособности. По СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [12] для помещений типа зал ЭВМ коэффициент естественной освещенности (КЕО) при верхнем или комбинированном освещении при естественном освещении должен составлять 3,5%, КЕО при совмещенном освещении должен составлять 2,1%, а освещенность при общем освещении должна быть равна 500 лк.

В аудитории 248, рабочая площадь которой составляет 29,6 м², на высоте 3 м расположены шесть светодиодных светильников. Мощность каждого светильника составляет 35 Вт, световой поток – около 4600 лм. Также в помещении расположены два окна, которые обеспечивают наличие естественной освещенности.

Величину искусственной освещенности можно рассчитать по формуле:

$$E = \frac{\Phi \cdot N \cdot \eta}{S \cdot k_3 \cdot z}, \quad (5.1)$$

где Φ – световой поток источника света;

N – количество источников света;

η – коэффициент использования светового потока (0,7 ÷ 0,8 для светодиодных светильников);

S – площадь освещаемого помещения;

k_3 – коэффициент запаса (1,3 ÷ 1,5 для осветительных установок общественных зданий);

z – коэффициент минимальной освещенности (1,1 для светодиодных светильников).

$$E = \frac{4600 \cdot 6 \cdot 0,8}{29,6 \cdot 1,3 \cdot 1,1} \approx 522 \text{ (лк)}$$

Из расчета видно, что величина искусственной освещенности соответствует нормированному значению. Стоит отметить, что при расчете не учитывалась естественная освещенность, которая в светлое время суток будет способствовать увеличению значения общей освещенности. В большинстве

случаев равномерное освещение, превышающее норму, положительно сказывается на восприятии людьми окружающего пространства.

В данном случае освещенность рабочей зоны соответствует нормам, однако необходимо помнить, что при недостаточном уровне освещенности помещения требуется уделить внимание рациональности размещения осветительных установок, совмещению естественного и искусственного освещения, а также подбору соответствующего типа и мощности ламп.

Еще одним фактором, который может сказаться на работе человека, является *микроклимат* – климат помещения с такими параметрами, как температура, влажность и скорость движения воздуха, а также интенсивность теплового излучения от нагретых поверхностей (в данном случае – от ПЭВМ). Неблагоприятный микроклимат рабочей зоны может оказать негативное воздействие на организм человека, вызывать его перегрев, снижение работоспособности и внимания, возникновение сухости слизистых оболочек верхних дыхательных путей, а также различных простудных заболеваний. Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [14] допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне помещения представлены в таблице 5.2. Категория тяжести выполняемых в помещении работ – Ia (работы, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением).

Таблица 5.2 – Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне помещения

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура воздуха, С ⁰	Температура поверхностей, С ⁰	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/сек
Холодный	Легкая (категория Ia)	20-21,9	19-26	15-75	0,1
		24,1-25			0,1
Теплый		21-22,9	20-29		0,1
		25,1-28			0,2

Обеспечение необходимых норм микроклимата в помещении достигается путем правильной организации систем отопления и воздухообмена, а также применением систем местного кондиционирования воздуха.

Также вредными факторами при выполнении расчетных работ на персональном компьютере являются *умственное перенапряжение и монотонность труда*. Они возникают вследствие длительной умственной работы при выполнении расчетных работ на персональном компьютере и вызывают быструю утомляемость человеческого организма, а также снижение внимания и работоспособности. Для обеспечения нормального нервно-психического состояния человеку необходимо чередовать различные виды деятельности и соблюдать систематический отдых.

Перейдем к рассмотрению опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте. Как известно, персональный компьютер является источником *электростатического поля*. Его воздействие на организм человека может вызывать появление раздражительности, обострение заболеваний сердечнососудистой системы, изменение кожной чувствительности. По ГОСТ 12.1.045-84 [11] предельно допустимый уровень напряженности ($E_{\text{пред}}$) электростатического поля в течение 1 часа составляет 60 кВ/м. Для защиты от его опасного воздействия экран монитора компьютера покрывается токопроводящей заземленной пленкой. Также методами снижения влияния электростатического поля на организм человека могут служить ограничение времени работы за ПЭВМ и использование средств индивидуальной защиты, таких как антистатическая обувь, антистатический халат, заземляющий браслет.

Еще одним фактором, причиной возникновения которого служит ПЭВМ, является *электрическое напряжение*. Поражение электрическим током может вызывать появление ожогов, поражение слизистой оболочки глаз, разрыв тканей организма, и даже летальный исход. По ГОСТ 12.1.038-82 [16] для переменного напряжения частотой 50 Гц при нормальном (неаварийном) режиме работы компьютера напряжение прикосновения не должно превышать

2 В, а ток, протекающий через тело человека, должен быть не больше 0,3 мА. Данные значения приведены для продолжительности воздействий не более 10 минут в сутки. Чтобы избежать опасного воздействия электрического тока на организм человека, необходимо соблюдать ряд мер безопасности по ГОСТ Р 50571.3-2009 [18], таких как:

- изоляция проводов;
- обеспечение защитного заземления и отключения;
- использование устройств автоматического отключения.

5.2. Экологическая безопасность

5.2.1. Защита атмосферы и гидросферы

При проведении исследований на рабочем месте загрязнение атмосферы и гидросферы не осуществлялось.

5.2.2. Защита литосферы

Источниками загрязнения литосферы являются такие виды отходов, как светодиодные источники света и тетрадная бумага. Согласно ГОСТ Р 53691-2009 [19] это отходы IV класса (малоопасные).

Светодиодная лампа является одним из самых экологически чистых источников света. Срок службы такой лампы достигает 50 тысяч часов. При выходе светодиодных ламп из строя не требуется их специальной утилизации, так как они не содержат ртутьсодержащих веществ. Утилизация ламп происходит по стандартной схеме утилизации твердых бытовых отходов. Однако существуют компании, которые занимаются утилизацией светодиодных ламп с их дальнейшей переработкой. Такие компании советуют предприятиям собирать нерабочие лампы в контейнеры для отходов, а затем сдавать их в специальные пункты приема. Стекланный цоколь светодиодной лампы и ее

корпус, изготовленный из поликарбоната и алюминия, перерабатывают, а затем используют в качестве вторичного сырья.

Следующий тип отходов – *бумага* – известнейший вид сырья с возможностью многократной переработки, которая позволяет не только защитить литосферу от загрязнений, но и предотвратить истощение лесных запасов. Вообще бумага не требует специальной утилизации – ее можно выкидывать как обычный бытовой мусор. Однако, попав в мусорный контейнер вместе с другими типами отходов, бумага становится непригодной для вторичного использования. Почти в каждом городе (в том числе и в Томске) есть центры по переработке бумажных отходов и пункты приема макулатуры, куда можно сдать ненужную бумагу и тем самым защитить окружающую среду от загрязнения.

5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайной ситуацией (ЧС) принято называть обстановку на определенной территории, сложившуюся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь за собой человеческие смерти, а также ущерб здоровью людей или окружающей среде. По характеру возникновения ЧС могут быть:

- 1) техногенного характера (транспортные аварии, аварии с выбросом опасных веществ, пожары, взрывы и др.);
- 2) стихийного характера (землетрясение, наводнение, ураган и др.);
- 3) экологического характера (деградация почвы, изменение состояния гидросферы, недостаток кислорода, разрушение озонового слоя и др.);
- 4) социального характера (шантаж, мошенничество, террор, заложничество, суицид, высокий уровень бедности, нехватка продовольствия и др.).

При работе с ПЭВМ наиболее вероятной ЧС является пожар, причинами возникновения которого могут стать отсутствие заземления, перегрев

оборудования, неисправность разъемов, наличие изломов и повреждений изоляции проводов, наличие открытых токоведущих частей, попадание влаги, механические повреждения, близкорасположенные источники тепла, недостаточная вентиляция оборудования.

По СП 12.13130.2009 [20] рабочее помещение относится к категории В1-В4 (пожароопасное), так как находящиеся в нем деревянные столы, оконные рамы, стулья и компьютерная техника могут стать очагами возгорания. Поэтому необходимо знать меры по предупреждению возникновения ЧС и порядок действий при ее возникновении.

В случае сбоя в работе компьютерного оборудования необходимо вызвать представителя инженерно-технической службы.

При появлении рези в глазах, резком ухудшении видимости, появлении боли в пальцах и кистях рук, усилении сердцебиения нужно немедленно покинуть рабочее место и обратиться к врачу.

При обнаружении обрыва проводов питания, неисправности заземления и других повреждений электрооборудования, а также при появлении запаха гари, необходимо немедленно отключить питание и сообщить об аварийной ситуации дежурному электрику.

При возгорании оборудования следует немедленно отключить питание и принять меры по тушению очага пожара при помощи углекислотного или порошкового огнетушителя. При возгорании оборудования, которое не удалось потушить самостоятельно, срочно произвести эвакуацию людей из аудитории и вызвать пожарную команду (по N 69-ФЗ [21]). Зону пожара нужно покинуть как можно быстрее, при необходимости использовать запасные пожарные выходы и лестницы, обязательное наличие которых предусмотрено СНиП 21-01-97* [22]. Также необходимо использовать простейшие средства защиты органов дыхания от угарного газа: смоченные водой платки, ватно-марлевые повязки. При сильном задымлении к выходу лучше всего пробираться ползком, так около пола дыма меньше и, соответственно, ниже вероятность потери сознания. Уходя, не закрывать входную дверь в помещение

возгорания на ключ. При невозможности покинуть необходимо стараться обратить на себя внимание: выбить окно, кричать, размахивать яркой тканью (по N 123-ФЗ [23]).

План эвакуации из аудитории 248 при пожаре и других ЧС и расположение средств пожаротушения в 16-В корпусе представлены на рисунке 5.1. В качестве средств пожаротушения выступают углекислотные огнетушители и находящийся в специальном ящике пожарный кран, который состоит из запорного вентиля, установленного на пожарном водопроводе, пожарного рукава – гибкого трубопровода для транспортировки воды, и ствола – устройства для формирования и направления струи воды. Также в корпусе находится блок автоматической установки пожарной сигнализации (АУПС), предназначенный для обнаружения пожара, извещения о нем и включения автоматической установки пожаротушения (АУП) и систем приточно-вытяжной противодымной вентиляции.

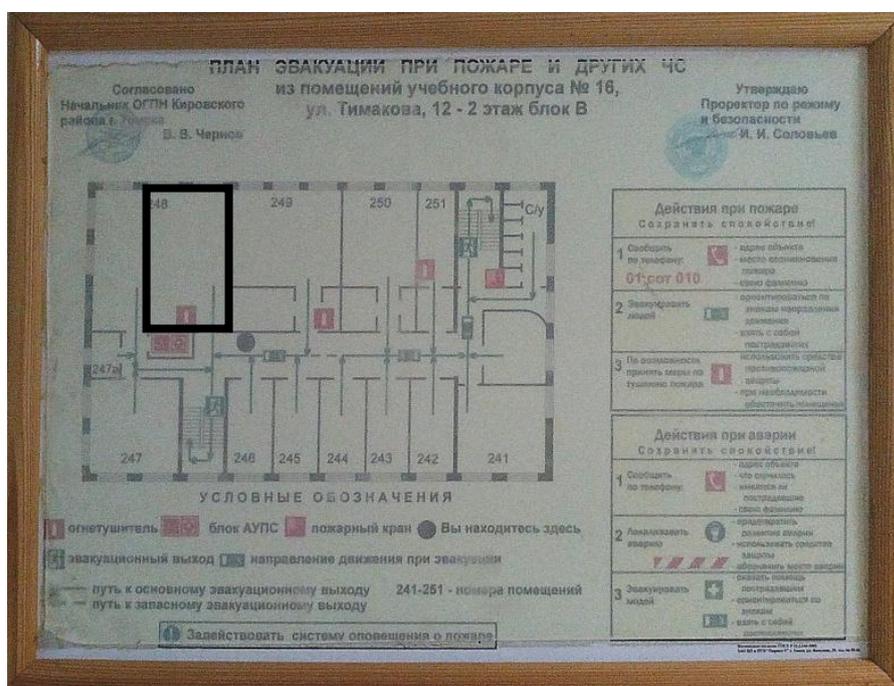


Рисунок 5.1 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса 16-В

5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.4.1. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Правильная компоновка рабочей зоны – один из важных факторов, обеспечивающих как безопасность человека, так и высокую производительность его труда.

Прежде всего, рабочее помещение должно иметь естественное и искусственное освещение [12]. Рабочие места с ПЭВМ по отношению к световым проемам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, желательно слева, а оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами, такими как жалюзи, занавеси, внешние козырьки и др.

По СП 60.13330.2012 [15] помещения с компьютерами должны оборудоваться системами отопления, кондиционирования воздуха или эффективной приточно-вытяжной вентиляцией.

По СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [13] в помещениях с ПЭВМ ежедневно должна проводиться влажная уборка. Также они должны быть оснащены аптечкой первой помощи и углекислотными огнетушителями.

При работе за компьютером экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, а также характера выполняемой работы. Целесообразно применение столов, имеющих отдельную от основной столешницы специальную рабочую поверхность для размещения клавиатуры. Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм. При отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм. Также стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не

менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Для обеспечения рациональной рабочей позы и создания условий для ее изменения в течение рабочего дня применяются подъемно-поворотные рабочие стулья с сиденьем и спинкой, регулируемые по высоте и углам наклона. Конструкция стула должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с закругленным передним краем; регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углом наклона вперед до 15 градусов и назад до 5 градусов. Поверхность сиденья и спинки должна быть полумягкой, с нескользящим воздухопроницаемым покрытием, легко очищаемым от загрязнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были обозначены основные кардинальные элементы оптической системы, изучены задние и передние главные поверхности оптических линз и объективов с заданными параметрами, а также построены графики зависимостей лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входных зрачках оптических систем.

Результаты исследования наглядно демонстрируют форму профилей главных поверхностей линз и объективов и их изменение в зависимости от расстояния до точечного источника света.

Оптимизация исследуемых линз позволила предположить, что при определенных значениях относительного отверстия в любой оптической системе будет происходить пересечение профилей главных поверхностей в одной точке.

Исследование профилей главных поверхностей оптических объективов и построение точечных диаграмм, отражающих присутствующие в системе aberrации, показало, что даже у систем высокого качества главные поверхности имеют профиль, отличный от плоского.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Агапов Н.А., Калошина М.А. Исследование кардинальных элементов оптической системы в области реальных лучей. «Молодежь в науке: новые аргументы»: Сборник научных работ VI Международного конкурса (Россия, г. Липецк, 30 апреля 2017 г.), часть I, стр. 12-21, ISBN 978-5-9909486-7.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Апенко М.И. Прикладная оптика / М.И. Апенко, А.С. Дубовик. – 2-е изд., перераб. – Москва: Наука, 1982. – 352 с.: ил. – (Физико-математическая библиотека инженера). – Библиогр.: с. 349-352.
2. Агапов Н.А. К вопросу о главных поверхностях оптических систем. Ред. журн. «Изв. вузов. Физика». – Томск, 2010. – Деп. в ВИНТИ 20.12.2010, Рег. № 707-В2010, 24 стр.
3. Турыгин И.А. Прикладная оптика. Геометрическая оптика и методы расчета оптических схем: учебное пособие / И.А. Турыгин. – Москва: Машиностроение, 1965. – 362 с. – Библиогр.: с. 357.
4. Монахова Н.И. Методические указания к выполнению лабораторных работ общего физического практикума. Геометрическая оптика и дисперсия света / Н.И. Монахова, Е.А. Филиппова, А.И. Фишман. – Казань: Изд-во КГУ, 2006.
5. Агапов Н.А. Прикладная оптика: учебное пособие / Н.А. Агапов; Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 319 с.
6. ГОСТ 7427-76. Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения. – М.: Издательство стандартов, 1988.
7. Русинов М.М. Техническая оптика: учебное пособие / М.М. Русинов. – 2-е изд. – Москва: Либроком, 2011. – 488 с.: ил.
8. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
9. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – М.: Минздрав России, 1999.
10. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.

11. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – М.: Стандартинформ, 2006.
12. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. – М.: Минздрав России, 2003.
13. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – М.: Минздрав России, 2003.
14. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997.
15. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Минрегион России, 2012.
16. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
17. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. – М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996.
18. ГОСТ Р 50571.3-2009. Электроустановки низковольтные. Часть 4-41. Требования для обеспечения безопасности. Защита от поражения электрическим током. – М.: Стандартинформ, 2011.
19. ГОСТ Р 53691-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I-IV класса опасности. Основные требования. – М.: Стандартинформ, 2011.
20. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – М.: МЧС России, 2009.
21. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. N 69-ФЗ. О пожарной безопасности.

22. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 1997.
23. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ABSTRACT

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ5Б	Калошина Маргарита Александровна		

Консультант кафедры ЛиСТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЛиСТ ИФВТ НИ ТПУ	Карнаухова А.А.	к. ф.-м. н.		

Консультант-лингвист кафедры ЛиСТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ИЯ ФТИ НИ ТПУ	Устюжанина А.К.	к. ф. н.		

RESEARCH OF THE OPTICAL SYSTEM CARDINAL ELEMENTS IN THE AREA OF REAL RAYS

INTRODUCTION

Cardinal elements are the main characteristics of any optical system. There are focal lengths, focal distances, principal and nodal points and planes. The theory of ideal optical system developed by Johann Carl Friedrich Gauss in 1841 allows to find cardinal elements of any centred optical system in paraxial region. However in the literature there were opinions that principal and nodal planes of the real optical systems are not planes but surfaces that can be described by polynomials of some degree.

1. OBJECTS AND METHODS OF RESEARCH

1.1. Objectives with given parameters

The objects of research are objectives, the list and parameters of which are presented in Table 1. The calculations were made at the distances f , $4f$, $8f$ and ∞ (where f is front focal length) between the point light source placed on optical axis and front surfaces of objectives.

Table A.1 – Objectives and their parameters

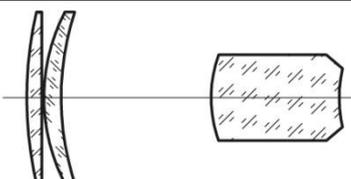
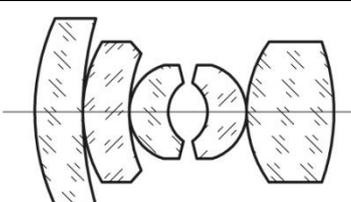
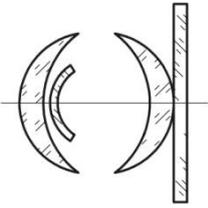
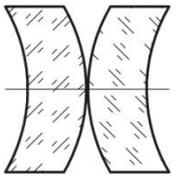
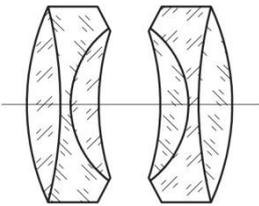
Number of objective	Name of objective	Optical scheme of objective	Back focal length f' , mm	Aperture stop D , mm
1	Extreme aperture objective with confocal surface		100	100
2	Planar-type objective with front isoplanatic lens		101,912	20

Table A.1 continuation

Number of objective	Name of objective	Optical scheme of objective	Back focal length f' , mm	Aperture stop D, mm
3	Russar-1		97,372	17
4	Symmetric objective of two meniscus lenses		100,013	10
5	Dagor		103,05	14

1.2. Software for calculation and presentation of results

The calculation of front and back principal surfaces profiles and ray focal lengths was made in the program based on Mathcad 15.

Principal surfaces profiles and the objectives ray focal lengths dependences on the height of ray on the objective entrance pupil were designed in Microsoft Excel.

The calculation of the objectives aberrations to assess their impact on the changes in the principal surfaces profiles was made in program OPTIKA.

2. RESULTS OF RESEARCH

The results of principal surfaces profiles calculation for objective 1 are presented in Figures A.1.1 and A.1.2. The presented graphs demonstrate that principal surfaces have a profile which differs from the plane. At the distances $4f$, $8f$ and ∞ the change of profiles has the same character. At the distance f the change of

profiles occurs in a different way. It can be explained by the fact the point light source is in focus of an optical system. This exception is observed in calculations of other objectives.

The calculation of back principal surfaces of objective 1 (Figure A.1.1) demonstrates that profiles have minor differences from the plane, and the longer the distance between point light source and front surfaces of objective is, the more these differences are (for $s = f$ the difference from the plane in the endpoint is 8 mm, for $s = 4f$ is 9 mm, for $s = 8f$ is 11 mm, for $s = \infty$ is 13 mm).

The calculation of front principal surfaces of objective 1 (Figure A.1.2) demonstrates that profiles also have minor differences from the plane, however, the longer the distance between point light source and front surfaces of objective is, the less these differences are, and when the light source is in focus of the objective the difference has a high value (for $s = f$ the difference from the plane in the endpoint is 74 mm, for $s = 4f$ is 14 mm, for $s = 8f$ is 8 mm, for $s = \infty$ is 3 mm). It should be noted that these are significant differences from plane that means that application of ideal optical system theory for real objective is thrown into question.

Graphs of the ray focal length dependence on the height of ray on the entrance pupil of objective 1 are presented in Figures A.1.3 and A.1.4. The presented graphs demonstrate that the ray focal length of objective is not constant.

The calculation of back ray focal length of objective 1 (Figure A.1.3) demonstrates that its value decreases insignificantly. At the distances $4f$, $8f$ and ∞ the ray focal length of the objective decreases when the distance increases (for $s = 4f$, low value of the ray focal length is 90,5 mm, for $s = 8f$ is 89 mm, for $s = \infty$ is 86 mm). At the distance $s = f$, the regularity of the ray focal length behaviour is not similar (low value of the ray focal length is 87 mm).

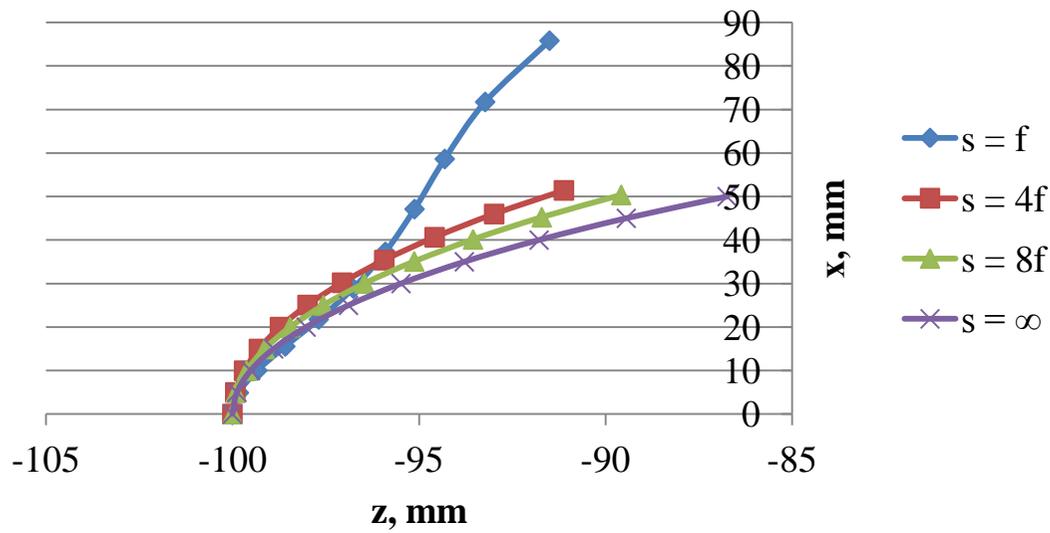


Figure A.1.1 – Profiles of back principal surface of objective 1

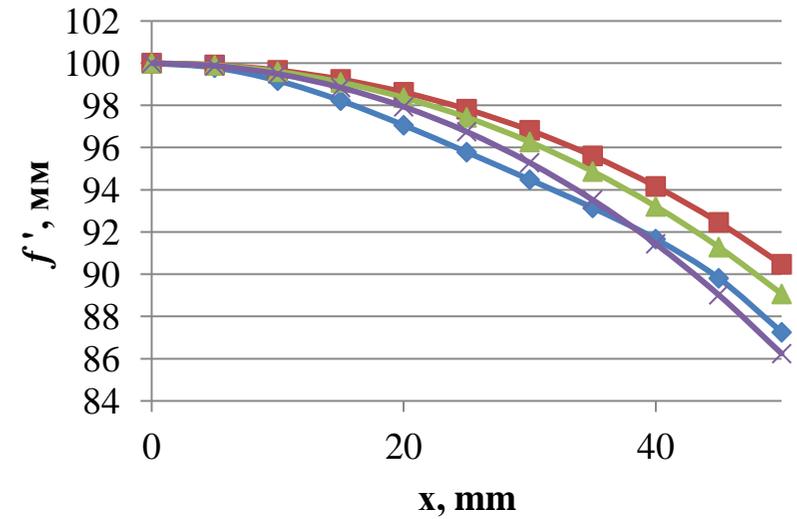


Figure A.1.3 – Dependence of back ray focal length of objective 1 on the height of ray on the entrance pupil of objective

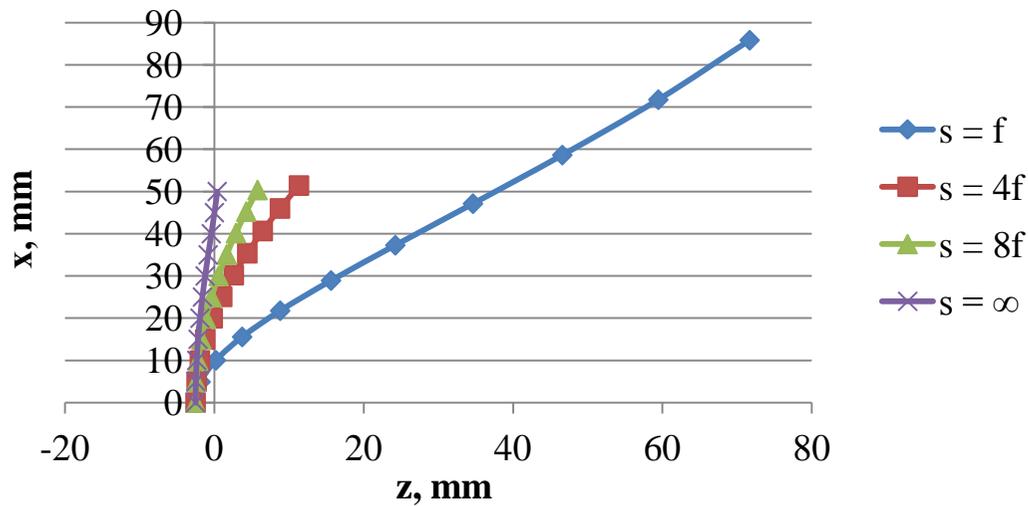


Figure A.1.2 – Profiles of front principal surface of objective 1

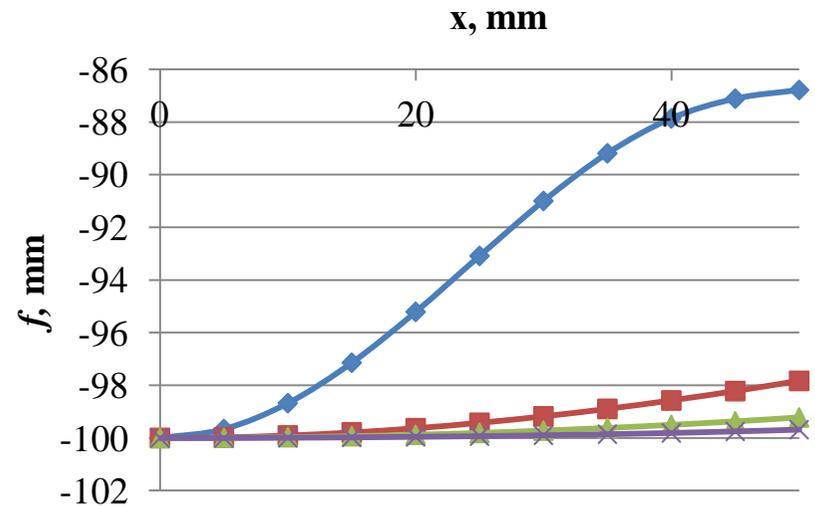


Figure A.1.4 – Dependence of front ray focal length of objective 1 on the height of ray on the entrance pupil of objective

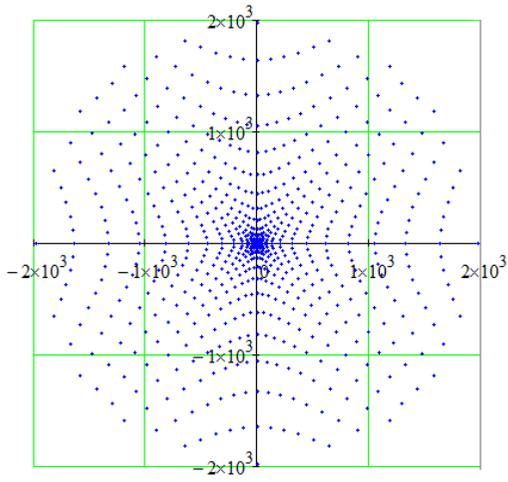


Figure A.1.5.1 – Dot diagram of objective 1 in GP for $s = f$

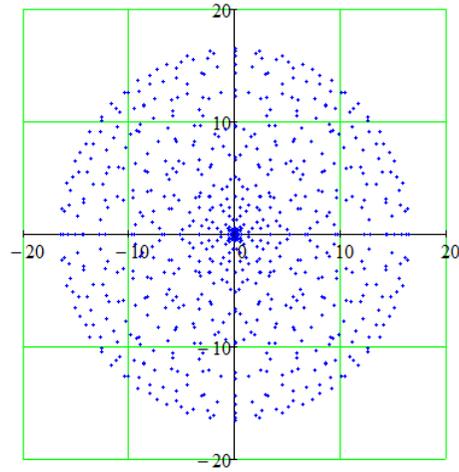


Figure A.1.5.2 – Dot diagram of objective 1 in BPP for $s = f$

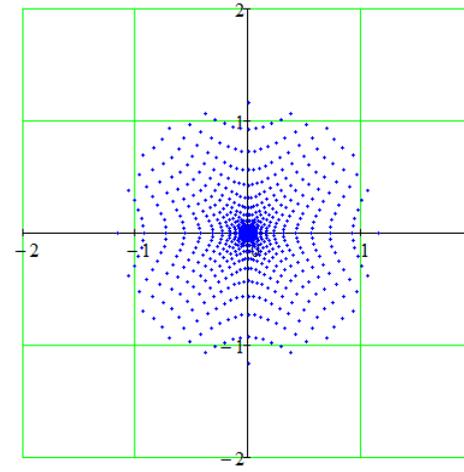


Figure A.1.7.1 – Dot diagram of objective 1 in GP for $s = 8f$

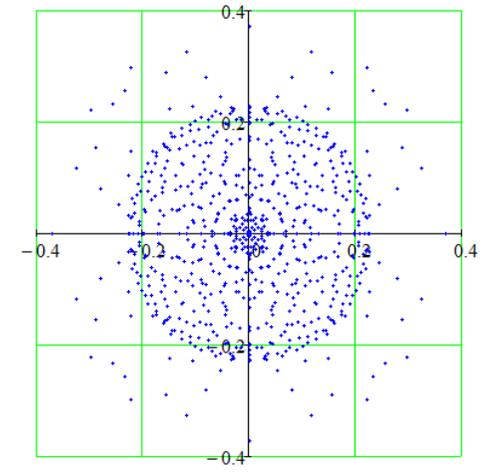


Figure A.1.7.2 – Dot diagram of objective 1 in BPP for $s = 8f$

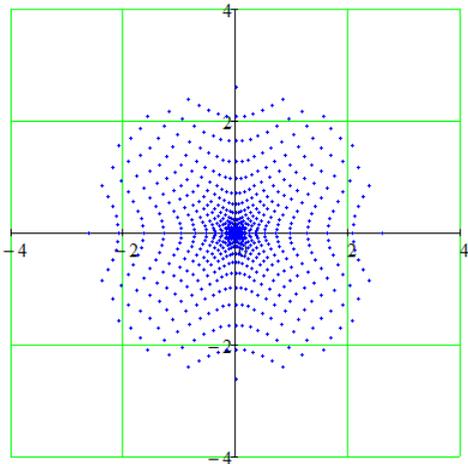


Figure A.1.6.1 – Dot diagram of objective 1 in GP for $s = 4f$

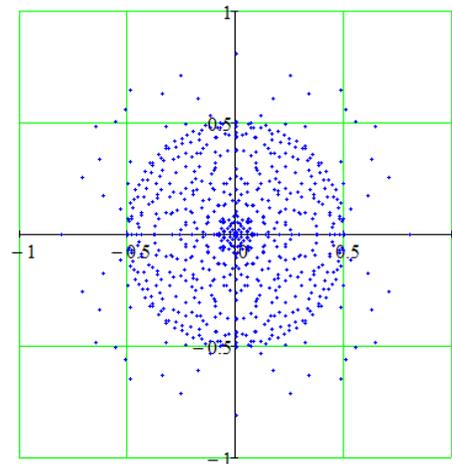


Figure A.1.6.2 – Dot diagram of objective 1 in BPP for $s = 4f$

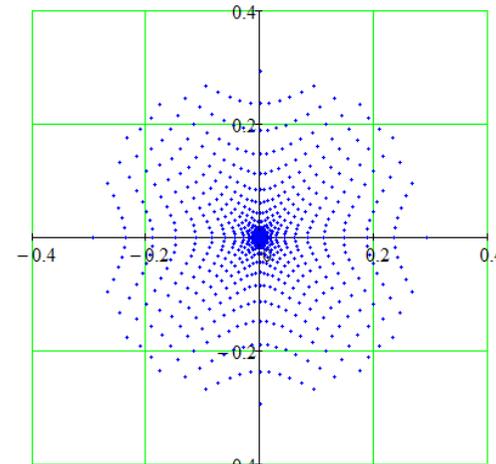


Figure A.1.8.1 – Dot diagram of objective 1 in GP for $s = \infty$

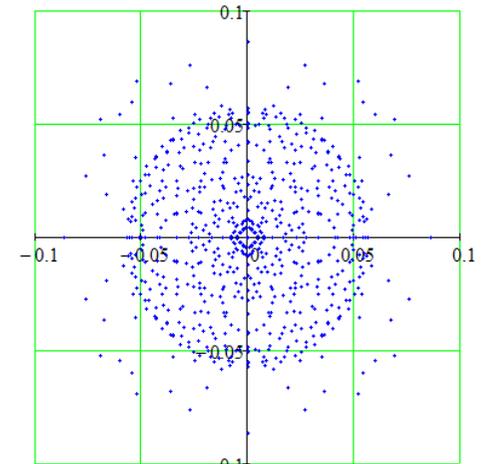


Figure A.1.8.2 – Dot diagram of objective 1 in BPP for $s = \infty$

The calculation of front ray focal length of objective 1 (Figure A.1.4) demonstrates that its value increases when the distance between point light source and front surfaces of objective increases. At the distance $s = f$, the ray focal length of objective has the maximum difference from the fixed value of focal length of an objective (for $s = f$, low value of the ray focal length is 86,8 mm, for $s = 4f$ is 97,8 mm, for $s = 8f$ is 99,2 mm, for $s = \infty$ is 99,7 mm).

Figures A.1.5.1, A.1.5.2, A.1.6.1, A.1.6.2, A.1.7.1, A.1.7.2, A.1.8.1 and A.1.8.2 present dot diagrams of objective 1 in Gaussian plane (GP) and in the best positioning plane (BPP) for different distances between the point light source and front surfaces of objective to determine the dependence of the principal surfaces profiles shape on the aberrations of objective. As the point light source is placed on optical axis then there is only the spherical aberration of optical system.

The presented graphs demonstrate that the circle of diffusion decreases when the distance between point light source and front surface of objective increases. It proves that aberrations decrease. The results allow for the conclusion that front principal surfaces profiles shape changes more intensively when the aberrations of optical system increase, and back principal surfaces profiles shape changes less intensively when the aberrations of optical system increase.

The results of principal surfaces profiles calculation for objective 2 are presented in Figures A.2.1 and A.2.2. Figure A.2.1 demonstrates that back principal surfaces profiles of objective 2 not only differ from the plane but also change the curvature sign. For $s = f$ the difference from the plane in the endpoint is 1,5 mm, for $s = 4f$ is 0,055 mm, for $s = 8f$ is 0,064 mm, for $s = \infty$ is 0,16 mm.

Figure A.2.2 demonstrates that front principal surfaces profiles of objective 2 also differ from the plane and change the curvature sign. For $s = f$ the difference from the plane in the endpoint is 0,8 mm, for $s = 4f$ is 0,48 mm, for $s = 8f$ is 0,49 mm, for $s = \infty$ is 0,44 mm. It can be observed that the maximum profiles differences from the plane appear at the minimum distances, and the minimum profiles differences from the plane appear at the maximum distances.

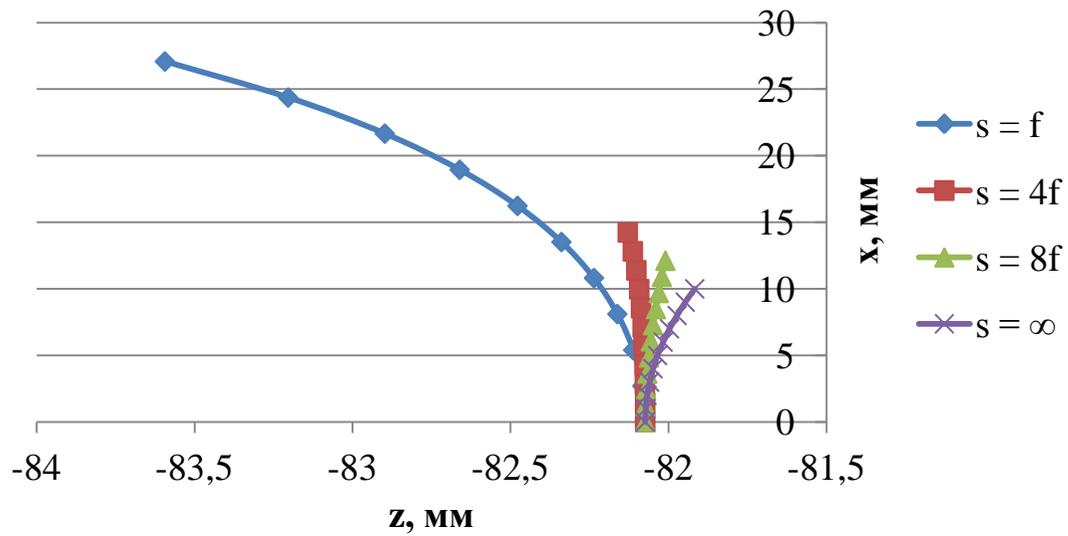


Figure A.2.1 – Profiles of back principal surface of objective 2

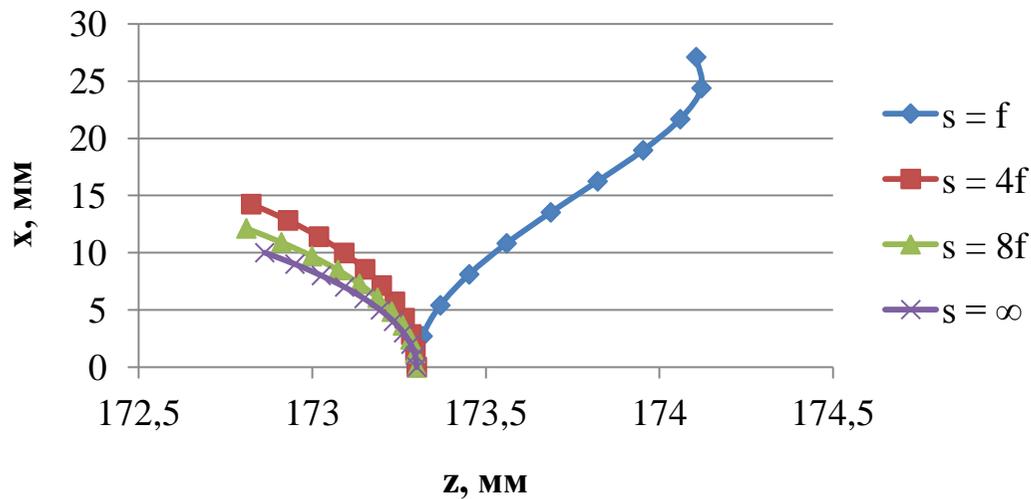


Figure A.2.2 – Profiles of front principal surface of objective 2

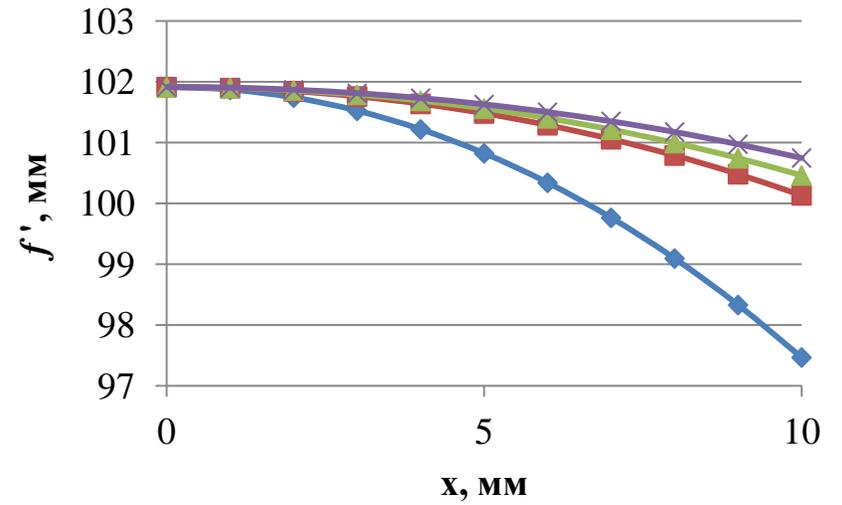


Figure A.2.3 – Dependence of back ray focal length of objective 2 on the height of ray on the entrance pupil of objective

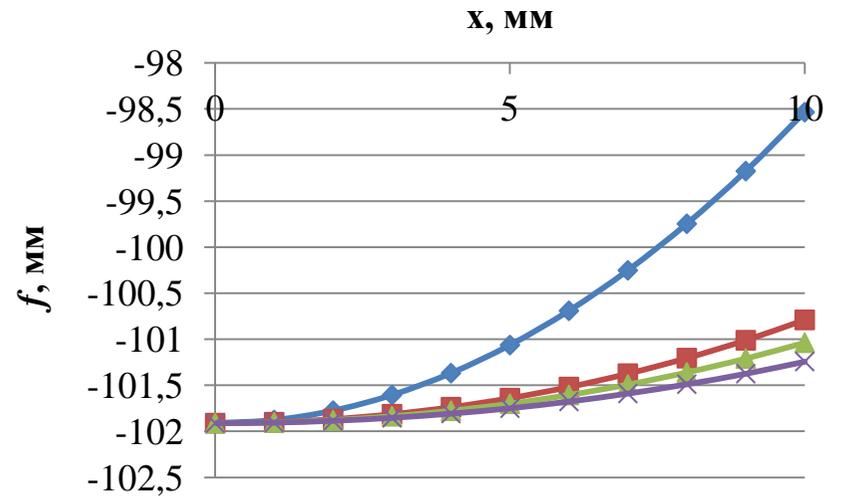


Figure A.2.4 – Dependence of front ray focal length of objective 2 on the height of ray on the entrance pupil of objective

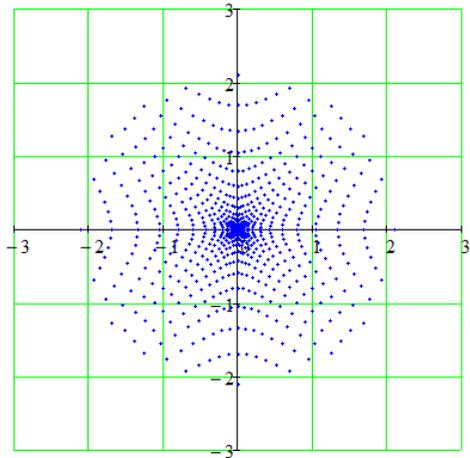


Figure A.2.5.1 – Dot diagram of objective 2 in GP for $s = f$

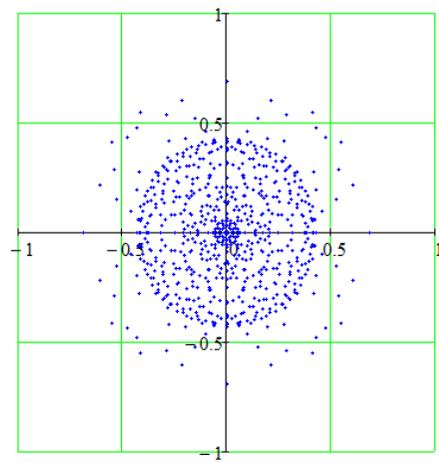


Figure A.2.5.2 – Dot diagram of objective 2 in BPP for $s = f$

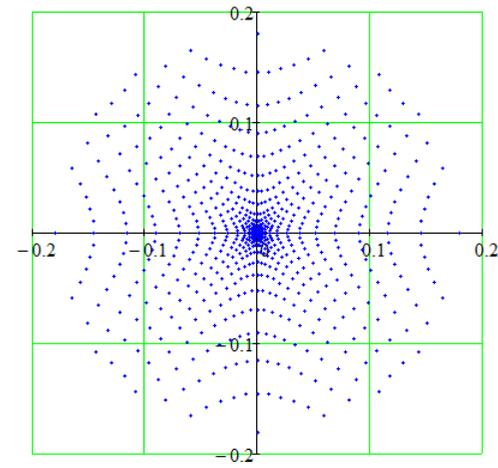


Figure A.2.7.1 – Dot diagram of objective 2 in GP for $s = 8f$

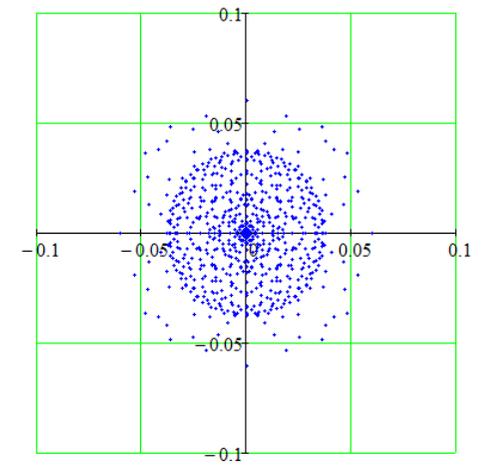


Figure A.2.7.2 – Dot diagram of objective 2 in BPP for $s = 8f$

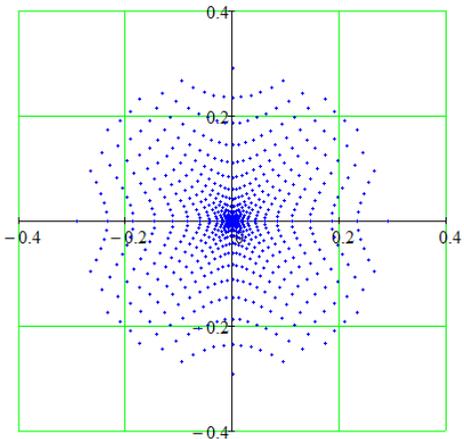


Figure A.2.6.1 – Dot diagram of objective 2 in GP for $s = 4f$

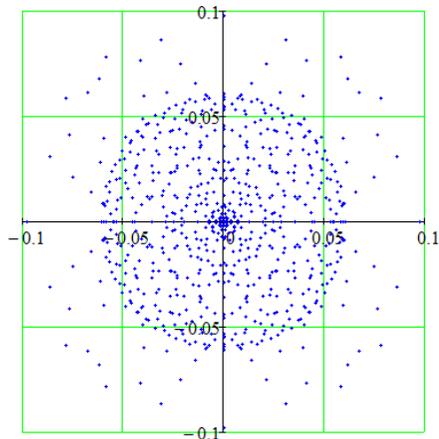


Figure A.2.6.2 – Dot diagram of objective 2 in BPP for $s = 4f$

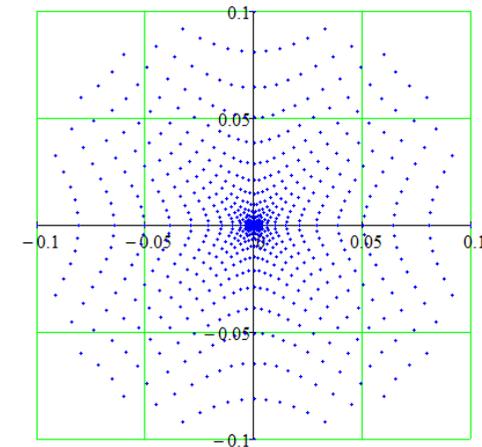


Figure A.2.8.1 – Dot diagram of objective 2 in GP for $s = \infty$

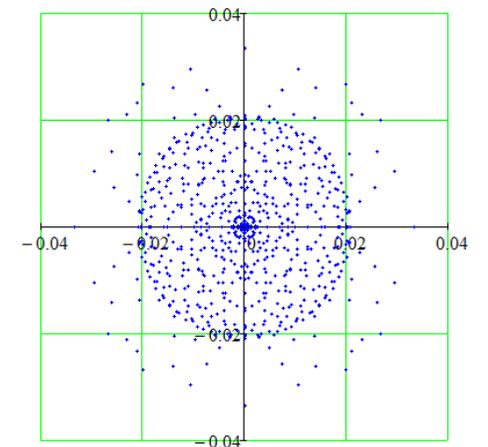


Figure A.2.8.2 – Dot diagram of objective 2 in BPP for $s = \infty$

Graphs of the ray focal length dependence on the height of ray on the entrance pupil of objective 2 are presented in Figures A.2.3 and A.2.4. The presented graphs demonstrate that the ray focal length of objective is also not constant.

The calculation of back ray focal length of objective 2 (Figure A.2.3) demonstrates that its value decreases when the distance between point light source and front surfaces of objective decreases (for $s = f$, low value of the ray focal length is 97,5 mm, for $s = 4f$ is 100 mm, for $s = 8f$ is 100,5 mm, for $s = \infty$ is 100,7 mm).

The calculation of front ray focal length of objective 2 (Figure A.2.4) demonstrates that its value also decreases when the distance between point light source and front surfaces of objective decreases. For $s = f$, low value of the ray focal length is 98,5 mm, for $s = 4f$ is 100,8 mm, for $s = 8f$ is 101 mm, for $s = \infty$ is 101,2 mm.

Figures A.2.5.1, A.2.5.2, A.2.6.1, A.2.6.2, A.2.7.1, A.2.7.2, A.2.8.1 and A.2.8.2 present dot diagrams of objective 2 in Gaussian plane and in the best positioning plane for different distances between the point light source and front surfaces of objective to determine the dependence of the principal surfaces profiles shape on the aberrations of objective. The presented graphs demonstrate that the circle of diffusion decreases when the distance between point light source and front surface of objective increases (in the same way as for objective 1). It proves that aberrations decrease.

The results allow for the conclusion that principal surfaces profiles shape have maximum difference from the plane when the aberrations of optical system are maximal, and principal surfaces profiles shape have minimum difference from the plane when the aberrations of optical system are minimal.

The results of principal surfaces profiles calculation for objective 3 are presented in Figures A.3.1 and A.3.2. Figure A.3.1 demonstrates that back principal surfaces profiles of objective 3 do not only differ from the plane but also change the curvature sign. Back principal surfaces profiles have insignificant differences from the plane, and the longer the distance between point light source and front surface of objective is, the more these differences are (for $s = f$ the difference from the plane in

the endpoint is 0,133 mm, for $s = 4f$ is 0,397 mm, for $s = 8f$ is 0,472 mm, for $s = \infty$ is 0,543 mm).

Figure A.3.2 demonstrates that front principal surfaces profiles of objective 3 also differ from the plane and change the curvature sign. Front principal surfaces profiles have insignificant differences from the plane, and the longer the distance between point light source and front surfaces of objective is, the less these differences are (for $s = f$ the difference from the plane in the endpoint is 0,979 mm, for $s = 4f$ is 0,128 mm, for $s = 8f$ is 0,017 mm, for $s = \infty$ is 0,087 mm).

Graphs of the ray focal length dependence on the height of ray on the entrance pupil of objective 3 are presented in Figures A.3.3 and A.3.4. The presented graphs demonstrate that the ray focal length of objective is not constant.

The calculations of back ray focal length (Figure A.3.3) and front ray focal length of objective 3 (Figure A.3.4) demonstrate that their values in the endpoint are more than the fixed value of the focal length (97,372 mm). It is observed at the all distances. For $s = f$ back ray focal length in the endpoint is 156,69 mm, for $s = 4f$ is 102,05 mm, for $s = 8f$ is 99,84 mm, for $s = \infty$ is 98,15 mm. For $s = f$ front ray focal length in the endpoint is 156,13 mm, for $s = 4f$ is 102,25 mm, for $s = 8f$ is 100,13 mm, for $s = \infty$ is 98,52 mm.

The results allow for the conclusion that distinction between the ray focal length in the endpoint and the fixed value of the focal length increases when the distance between point light source and front surfaces of objective decreases.

Figures A.3.5.1, A.3.5.2, A.3.6.1, A.3.6.2, A.3.7.1, A.3.7.2, A.3.8.1 and A.3.8.2 present dot diagrams of objective 3 in Gaussian plane and in the best positioning plane for different distances between the point light source and front surfaces of objective to determine the dependence of the principal surfaces profiles shape on the aberrations of objective. The presented graphs demonstrate that the aberrations of optical system decrease when the distance between point light source and front surface of objective increases.

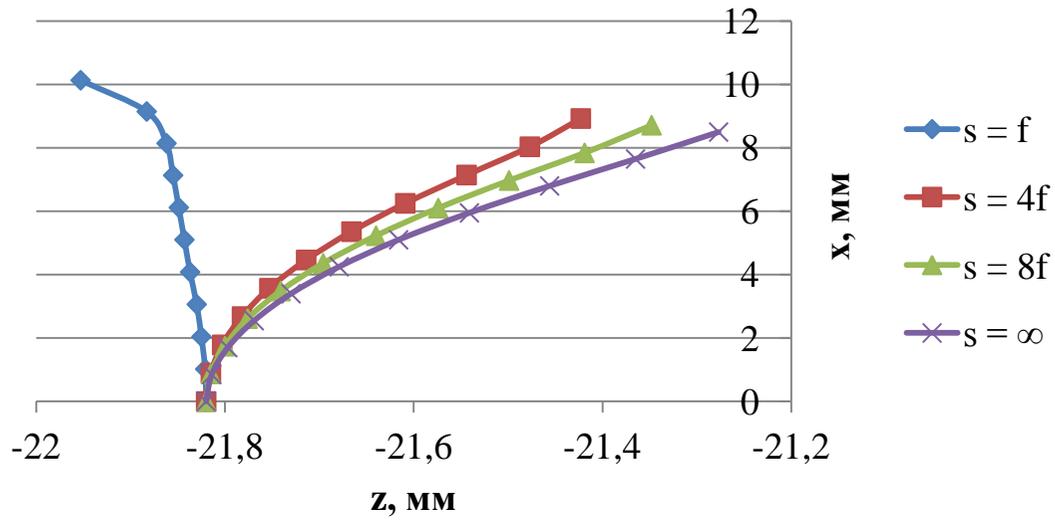


Figure A.3.1 – Profiles of back principal surface of objective 3

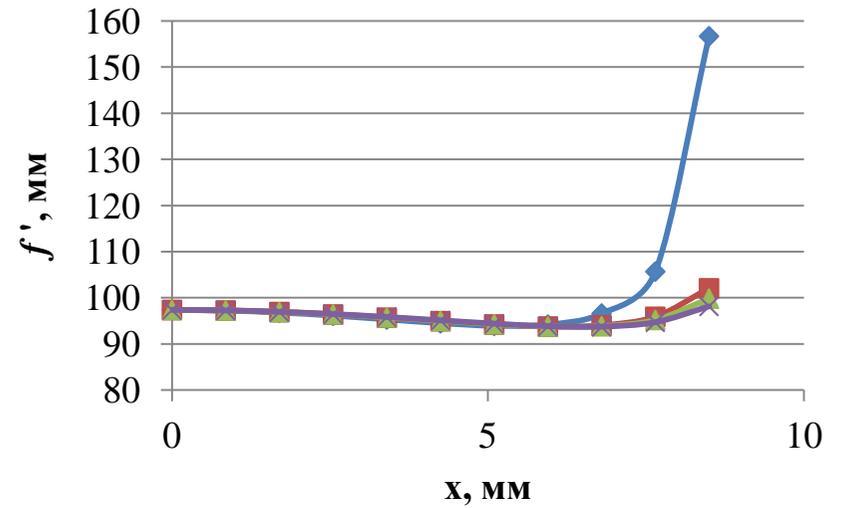


Figure A.3.3 – Dependence of back ray focal length of objective 3 on the height of ray on the entrance pupil of objective

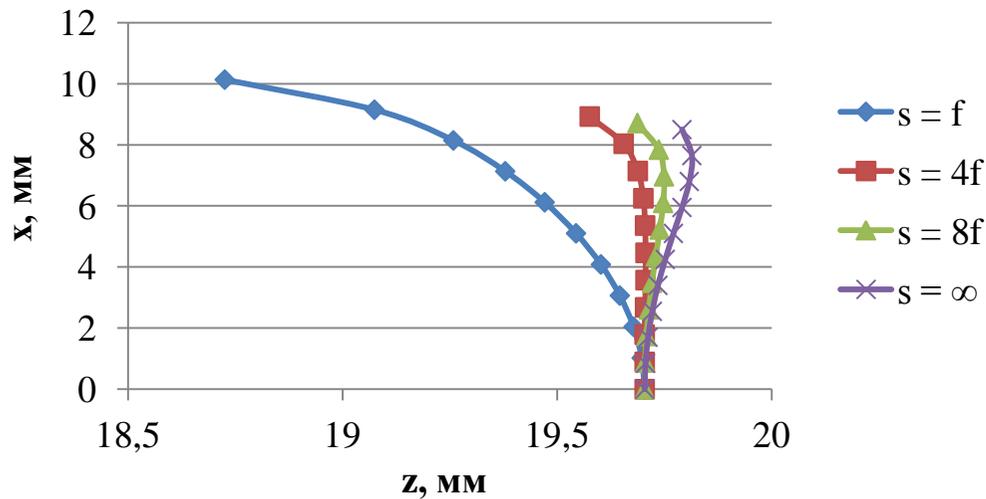


Figure A.3.2 – Profiles of front principal surface of objective 3

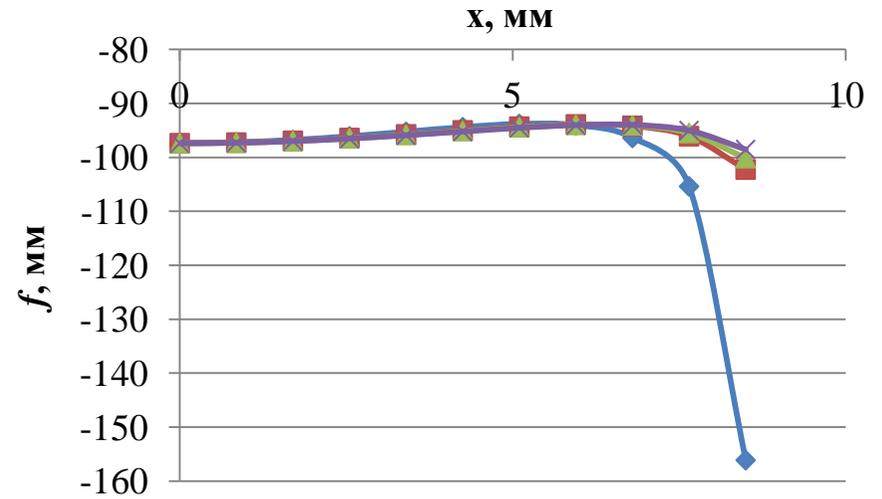


Figure A.3.4 – Dependence of front ray focal length of objective 3 on the height of ray on the entrance pupil of objective

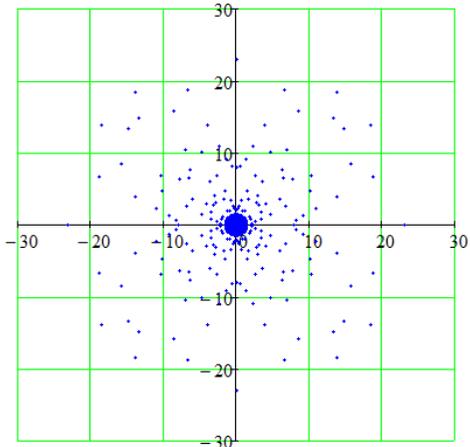


Figure A.3.5.1 – Dot diagram of objective 3 in GP for $s = f$

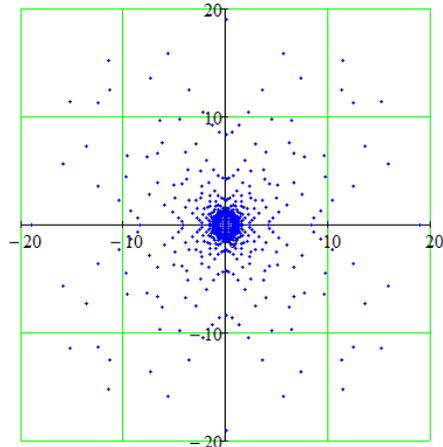


Figure A.3.5.2 – Dot diagram of objective 3 in BPP for $s = f$

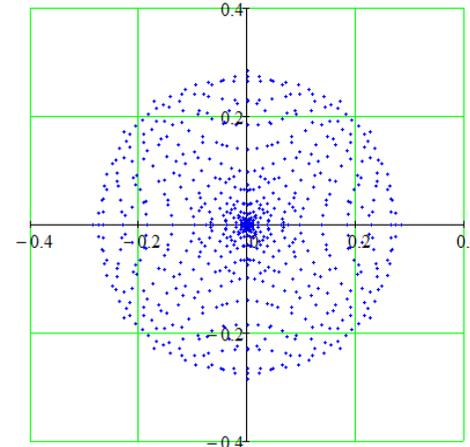


Figure A.3.7.1 – Dot diagram of objective 3 in GP for $s = 8f$

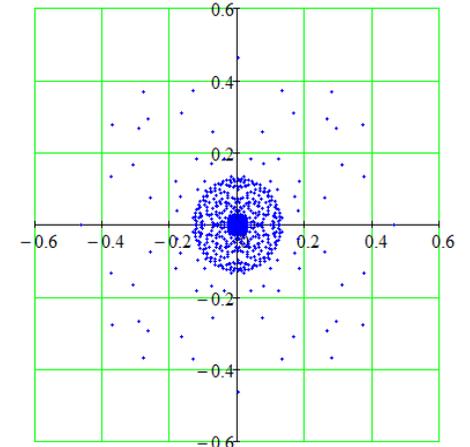


Figure A.3.7.2 – Dot diagram of objective 3 in BPP for $s = 8f$

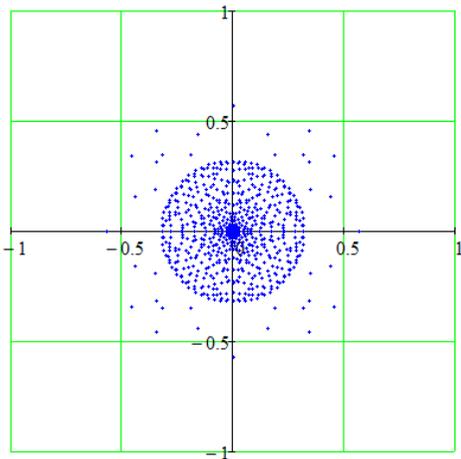


Figure A.3.6.1 – Dot diagram of objective 3 in GP for $s = 4f$

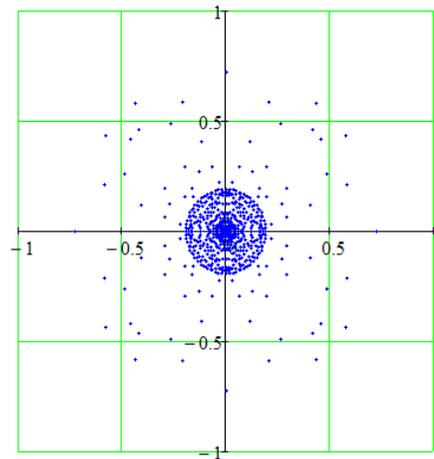


Figure A.3.6.2 – Dot diagram of objective 3 in BPP for $s = 4f$

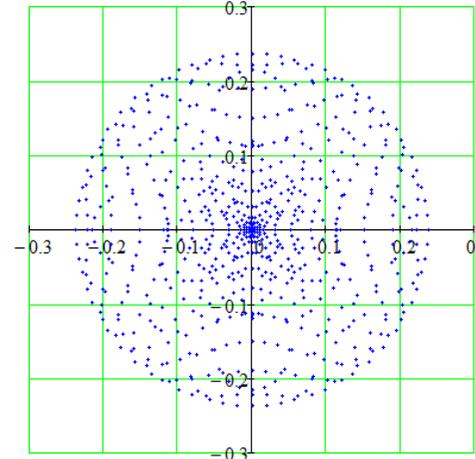


Figure A.3.8.1 – Dot diagram of objective 3 in GP for $s = \infty$

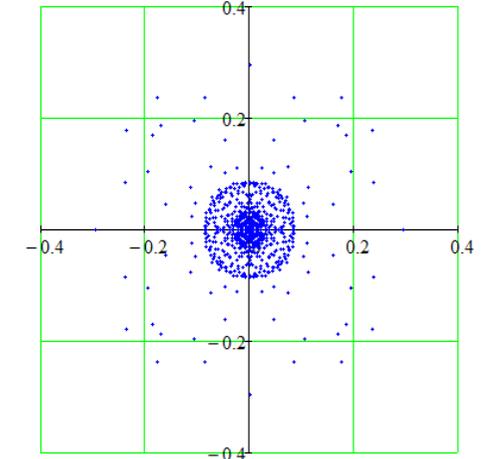


Figure A.3.8.2 – Dot diagram of objective 3 in BPP for $s = \infty$

The results allow for the conclusion that front principal surfaces profiles shape changes more intensively when the aberrations of optical system increase, and back principal surfaces profiles shape changes more intensively when the aberrations of optical system decrease.

The results of principal surfaces profiles calculation for objective 4 are presented in Figures A.4.1 and A.4.2. Figure A.4.1 demonstrates that back principal surfaces profiles of objective 4 differ from the plane and change the curvature sign. For $s = f$ the difference from the plane in the endpoint is 0,023 mm, for $s = 4f$ is 0,084 mm, for $s = 8f$ is 0,103 mm, for $s = \infty$ is 0,121 mm. It can be observed that back principal surfaces profiles have insignificant differences from the plane, and the longer the distance between point light source and front surface of objective is, the more these differences are.

Figure A.4.2 demonstrates that front principal surfaces profiles behave in a different way. Dependence of profiles shapes on the distance between point light source and front surface of objective is not observed. Front principal surfaces profiles have insignificant differences from the plane in the endpoints (for $s = f$ the difference is 0,114 mm, for $s = 4f$ is 0 mm, for $s = 8f$ is 0,018 mm, for $s = \infty$ is 0,035 mm). It can be observed that at the distance $4f$ the surface profile is plane.

Graphs of the ray focal length dependence on the height of ray on the entrance pupil of objective 4 are presented in Figures A.4.3 and A.4.4. The presented graphs demonstrate that at the different distances between point light source and front surface of objective 4, front and back focal lengths behave in the same way.

Figure A.4.3 demonstrates that low value of back ray focal length for $s = f$ is 94,9 mm, for $s = 4f$ is 95,13 mm, for $s = 8f$ is 95,16 mm, for $s = \infty$ is 95,19 mm. Figure A.4.4 demonstrates that low value of front ray focal length for $s = f$ is 94,8 mm, for $s = 4f$ is 95,19 mm, for $s = 8f$ is 95,26 mm, for $s = \infty$ is 95,32 mm. These results allow for the conclusion that distinction between the ray focal length and the fixed value of the focal length decreases when the distance between point light source and front surfaces of objective increases.

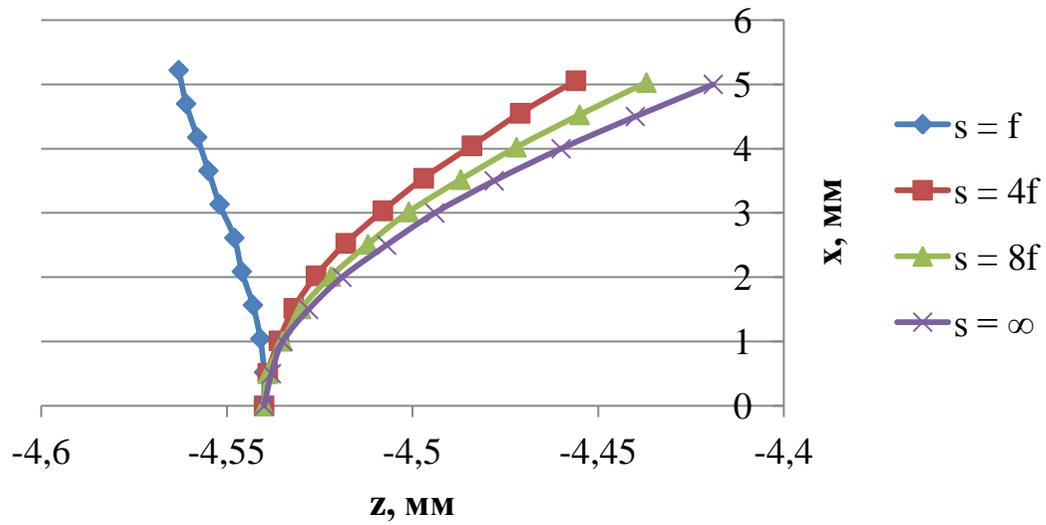


Figure A.4.1 – Profiles of back principal surface of objective 4

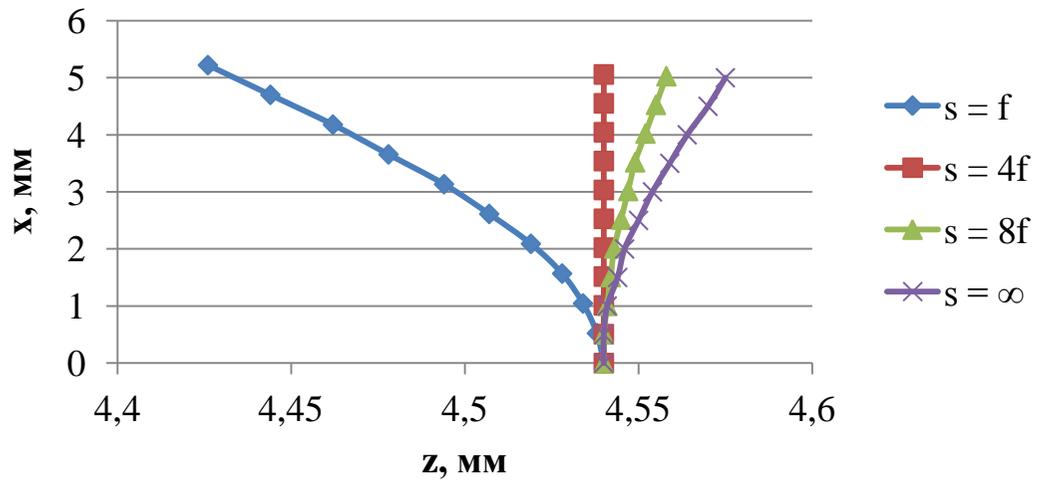


Figure A.4.2 – Profiles of front principal surface of objective 4

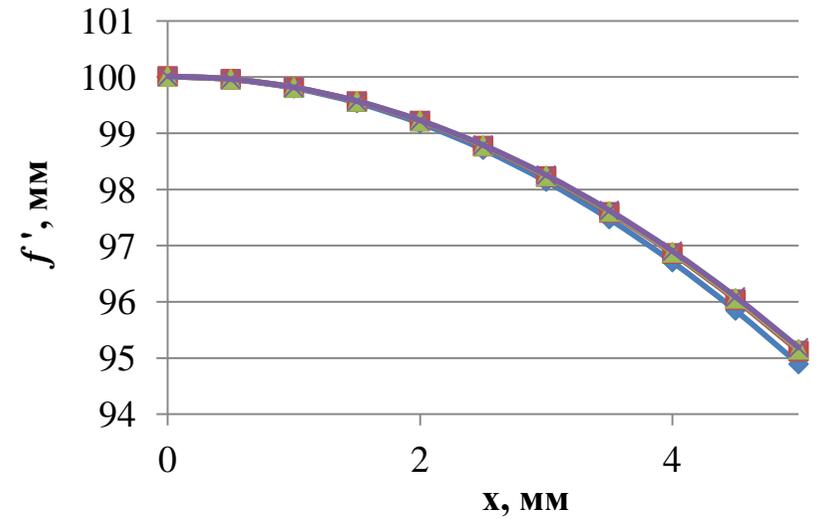


Figure A.4.3 – Dependence of back ray focal length of objective 4 on the height of ray on the entrance pupil of objective

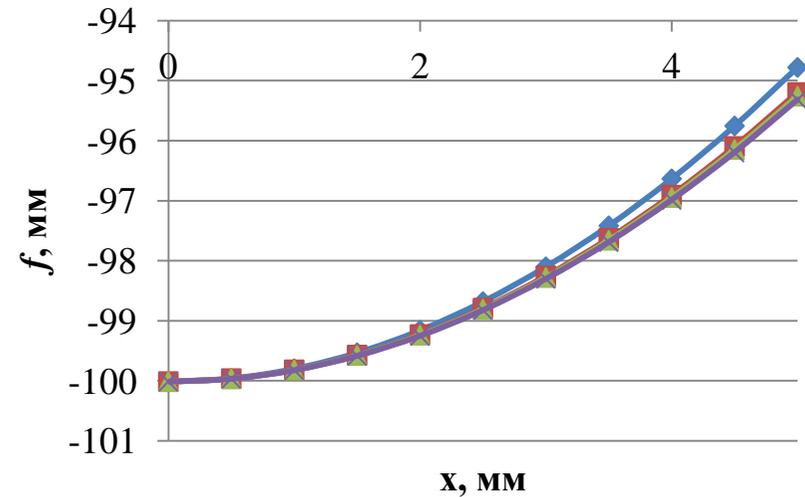


Figure A.4.4 – Dependence of front ray focal length of objective 4 on the height of ray on the entrance pupil of objective

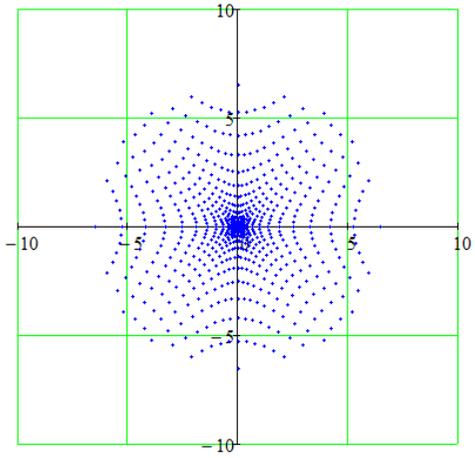


Figure A.4.5.1 – Dot diagram of objective 4 in GP for $s = f$

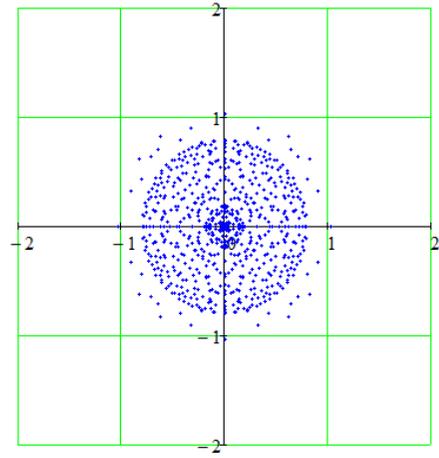


Figure A.4.5.2 – Dot diagram of objective 4 in BPP for $s = f$

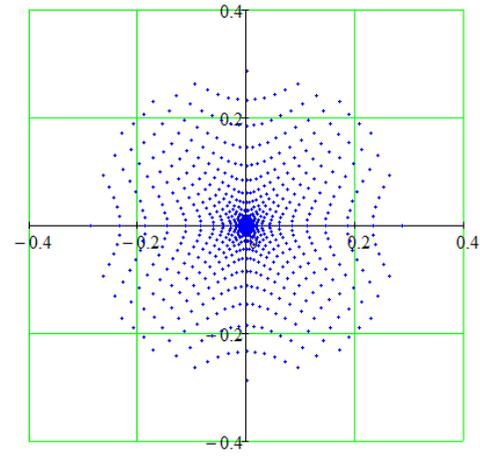


Figure A.4.7.1 – Dot diagram of objective 4 in GP for $s = 8f$

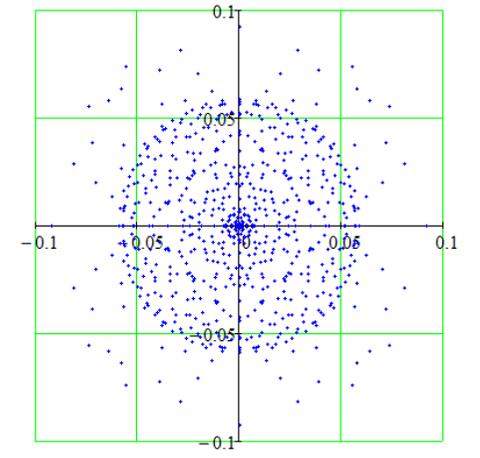


Figure A.4.7.2 – Dot diagram of objective 4 in BPP for $s = 8f$

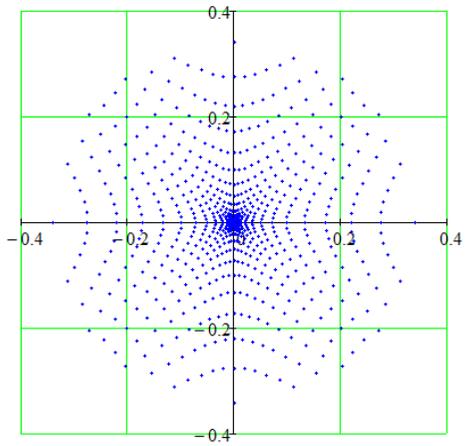


Figure A.4.6.1 – Dot diagram of objective 4 in GP for $s = 4f$

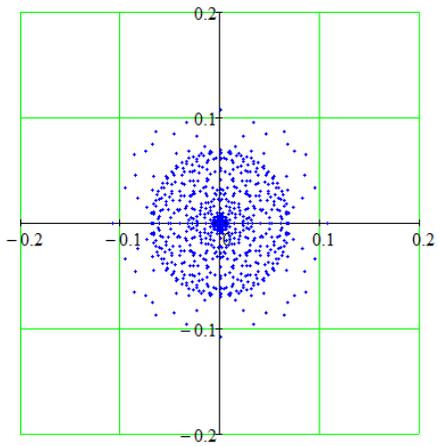


Figure A.4.6.2 – Dot diagram of objective 4 in BPP for $s = 4f$

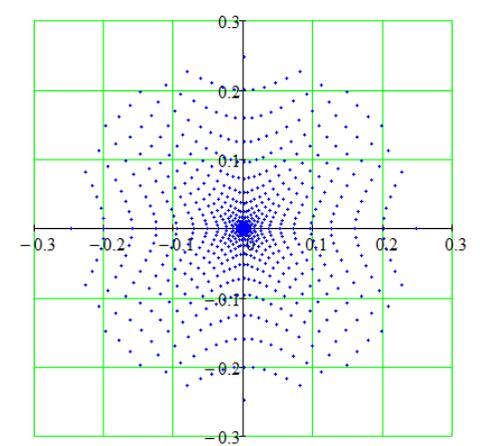


Figure A.4.8.1 – Dot diagram of objective 4 in GP for $s = \infty$

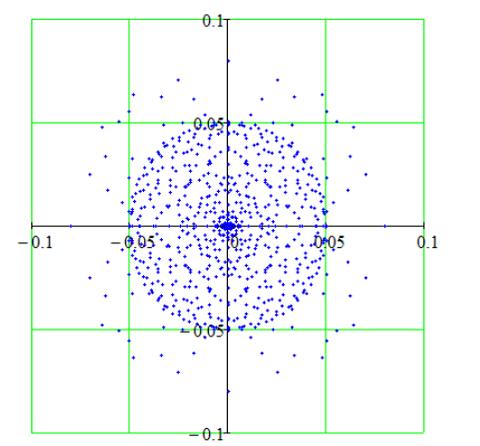


Figure A.4.8.2 – Dot diagram of objective 4 in BPP for $s = \infty$

Figures A.4.5.1, A.4.5.2, A.4.6.1, A.4.6.2, A.4.7.1, A.4.7.2, A.4.8.1 and A.4.8.2 present dot diagrams of objective 4 in Gaussian plane and in the best positioning plane for different distances between the point light source and front surfaces of objective to determine the dependence of the principal surfaces profiles shape on the aberrations of objective. The presented graphs demonstrate that the circle of diffusion decreases when the distance between point light source and front surface of objective increases. It proves that aberrations decrease.

The results allow for the conclusion that back principal surfaces profiles shape changes more intensively when the aberrations of optical system decrease. Front principal surface profile has maximum difference from the plane when the optical system has maximum aberrations. And when the optical system has average aberrations ($s = 4f$), front principal surface profile has minimum difference from the plane.

The results of principal surfaces profiles calculation for objective 5 are presented in Figures A.5.1 and A.5.2. Figure A.5.1 demonstrates that back principal surfaces profiles of objective 5 differ from the plane and change the curvature sign. It can be observed that back principal surfaces profiles have insignificant differences from the plane, and the longer the distance between point light source and front surface of objective is, the more these differences are (for $s = f$ the difference from the plane in the endpoint is 0,137 mm, for $s = 4f$ is 0,221 mm, for $s = 8f$ is 0,276 mm, for $s = \infty$ is 0,329 mm).

Figure A.5.2 demonstrates that front principal surfaces profiles of objective 5 also differ from the plane and change the curvature sign. Dependence of profiles shapes on the distance between point light source and front surface of objective 5 is not observed. Front principal surfaces profiles have insignificant differences from the plane in the endpoints (for $s = f$ the difference is 0,349 mm, for $s = 4f$ is 0,029 mm, for $s = 8f$ is 0,087 mm, for $s = \infty$ is 0,145 mm).

Graphs of the ray focal length dependence on the height of ray on the entrance pupil of objective 5 are presented in Figures A.5.3 and A.5.4. The presented graphs demonstrate that the ray focal length of objective is not constant.

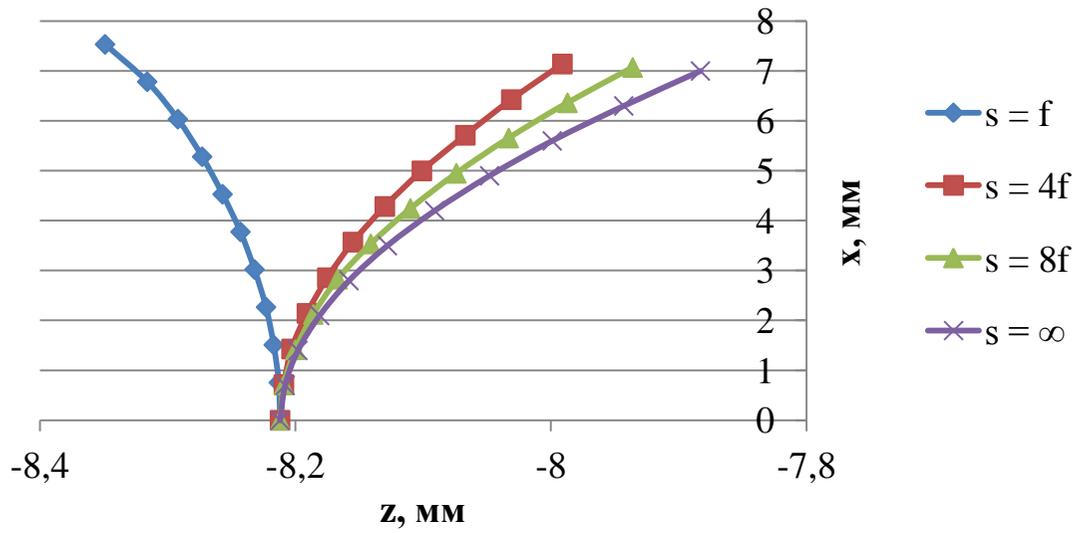


Figure A.5.1 – Profiles of back principal surface of objective 5

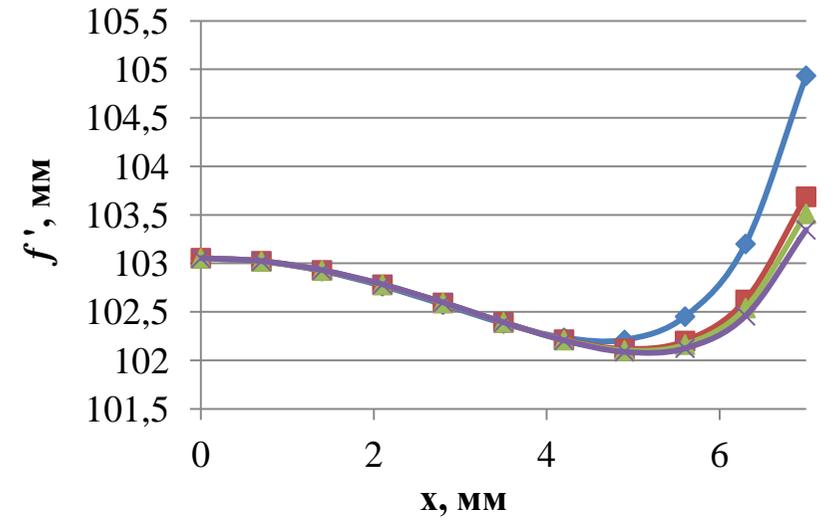


Figure A.5.3 – Dependence of back ray focal length of objective 5 on the height of ray on the entrance pupil of objective

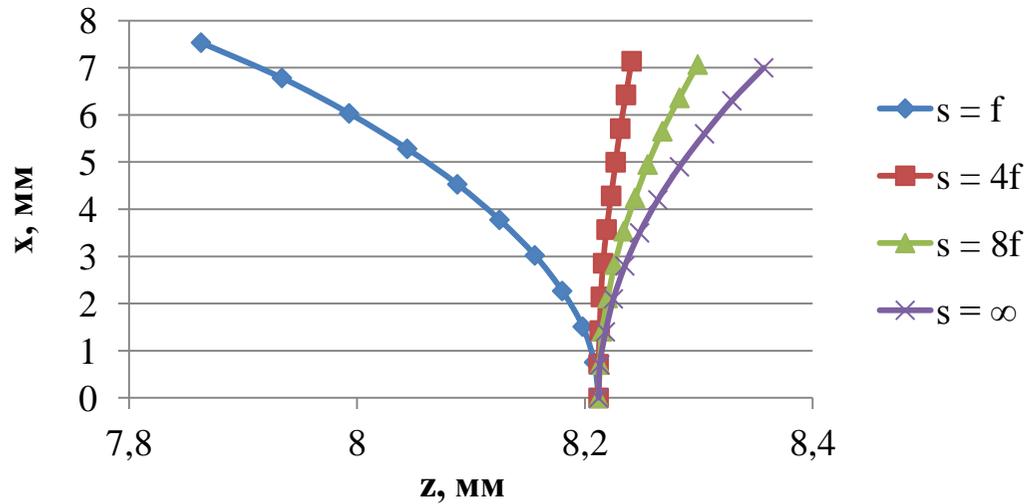


Figure A.5.2 – Profiles of front principal surface of objective 5

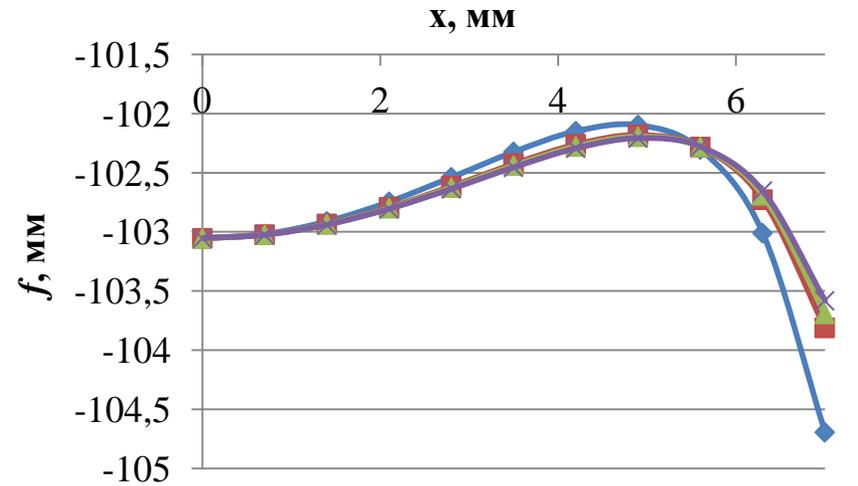


Figure A.5.4 – Dependence of front ray focal length of objective 5 on the height of ray on the entrance pupil of objective

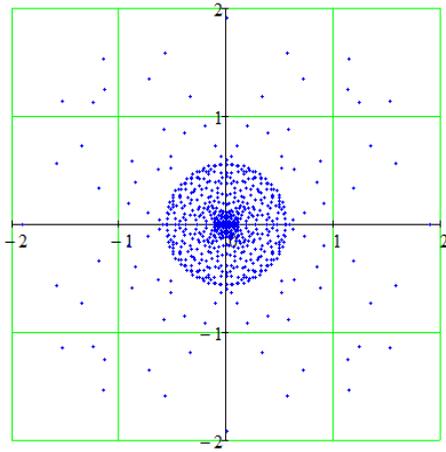


Figure A.5.5.1 – Dot diagram of objective 5 in GP for $s = f$

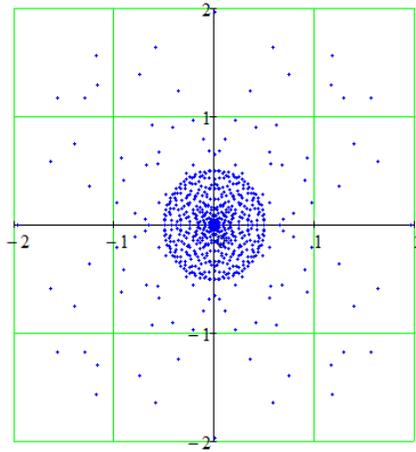


Figure A.5.5.2 – Dot diagram of objective 5 in BPP for $s = f$

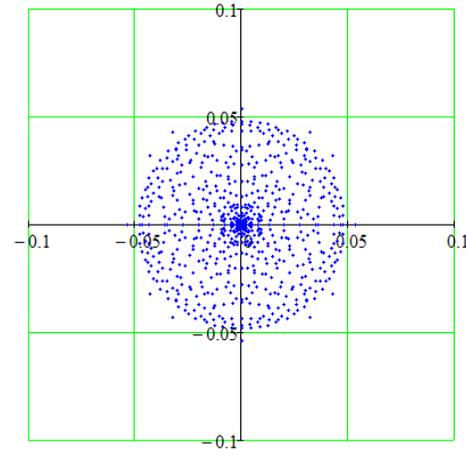


Figure A.5.7.1 – Dot diagram of objective 5 in GP for $s = 8f$

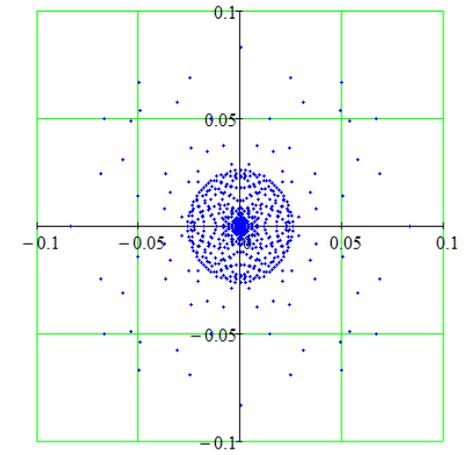


Figure A.5.7.2 – Dot diagram of objective 5 in BPP for $s = 8f$

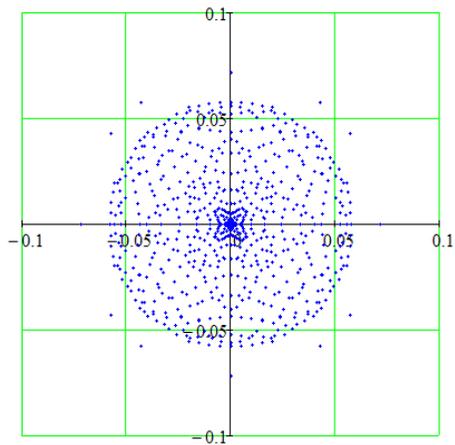


Figure A.5.6.1 – Dot diagram of objective 5 in GP for $s = 4f$

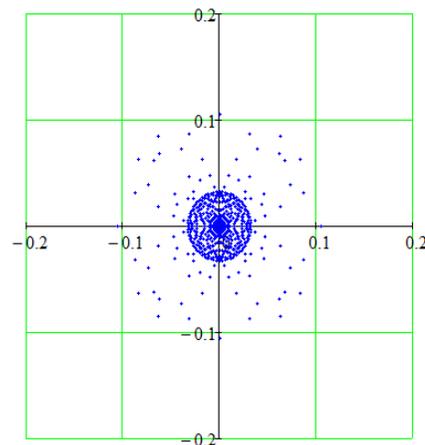


Figure A.5.6.2 – Dot diagram of objective 5 in BPP for $s = 4f$

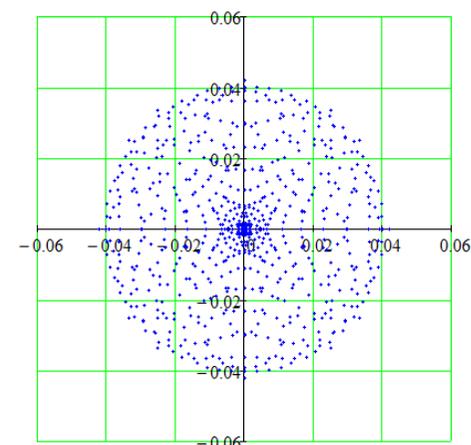


Figure A.5.8.1 – Dot diagram of objective 5 in GP for $s = \infty$

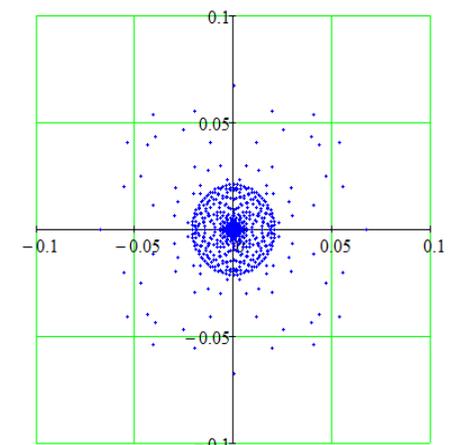


Figure A.5.8.2 – Dot diagram of objective 5 in BPP for $s = \infty$

The calculations of back ray focal length (Figure A.5.3) and front ray focal length of objective 5 (Figure A.5.4) demonstrate that their values in the endpoint are more than the fixed value of the focal length (103,05 mm). It is observed at the all distances. For $s = f$ back ray focal length in the endpoint is 104,94 mm, for $s = 4f$ is 103,69 mm, for $s = 8f$ is 103,512 mm, for $s = \infty$ is 103,345 mm. For $s = f$ front ray focal length in the endpoint is 104,69 mm, for $s = 4f$ is 103,81 mm, for $s = 8f$ is 103,69 mm, for $s = \infty$ is 103,58 mm.

The results allow for the conclusion that distinction between the ray focal length in the endpoint and the fixed value of the focal length increases when the distance between point light source and front surfaces of objective decreases.

Figures A.5.5.1, A.5.5.2, A.5.6.1, A.5.6.2, A.5.7.1, A.5.7.2, A.5.8.1 and A.5.8.2 present dot diagrams of objective 5 in Gaussian plane and in the best positioning plane for different distances between the point light source and front surfaces of objective to determine the dependence of the principal surfaces profiles shape on the aberrations of objective. The presented graphs demonstrate that the aberrations of optical system decrease when the distance between point light source and front surface of objective increases.

The results allow for the conclusion that back principal surfaces profiles shape changes more intensively when the aberrations of optical system decrease. Front principal surface profile has maximum difference from the plane when the optical system has maximum aberrations. And when the optical system has average aberrations ($s = 4f$), front principal surface profile has minimum difference from the plane.

3. CONCLUSION

In the course of the scientific work, five objectives have been researched, their principal surfaces profiles have been calculated and also the ray focal lengths dependences on the height of rays on the entrance pupils of objectives have been designed.

The results clearly demonstrate the shapes of principal surfaces profiles and their changes depending on the distance between point light source and front surfaces of objectives.

Dot diagrams of objectives in Gaussian plane and in the best positioning plane show the aberrations of optical systems and allow to assess their influence on the principal surfaces profiles behavior.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты расчета плосковыпуклых линз

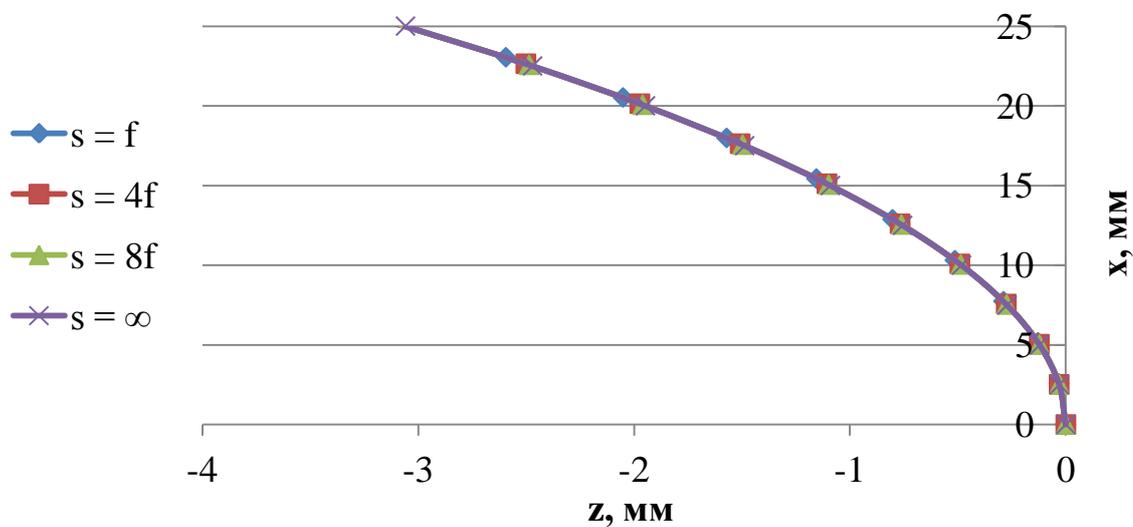


Рисунок Б.1 – Профили задних главных поверхностей плосковыпуклой линзы

$$с f' = 200 \text{ мм}$$

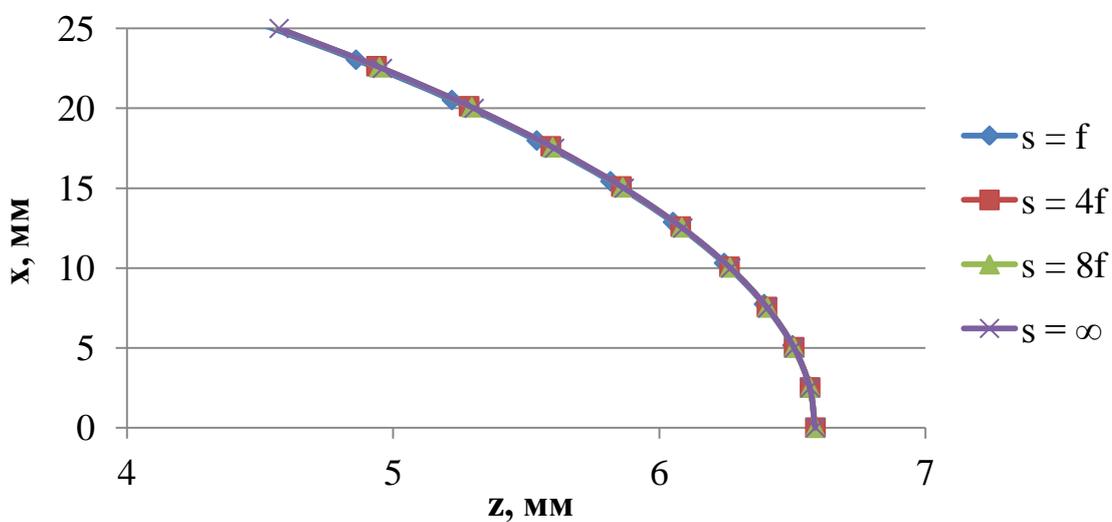


Рисунок Б.2 – Профили передних главных поверхностей плосковыпуклой линзы

$$с f' = 200 \text{ мм}$$

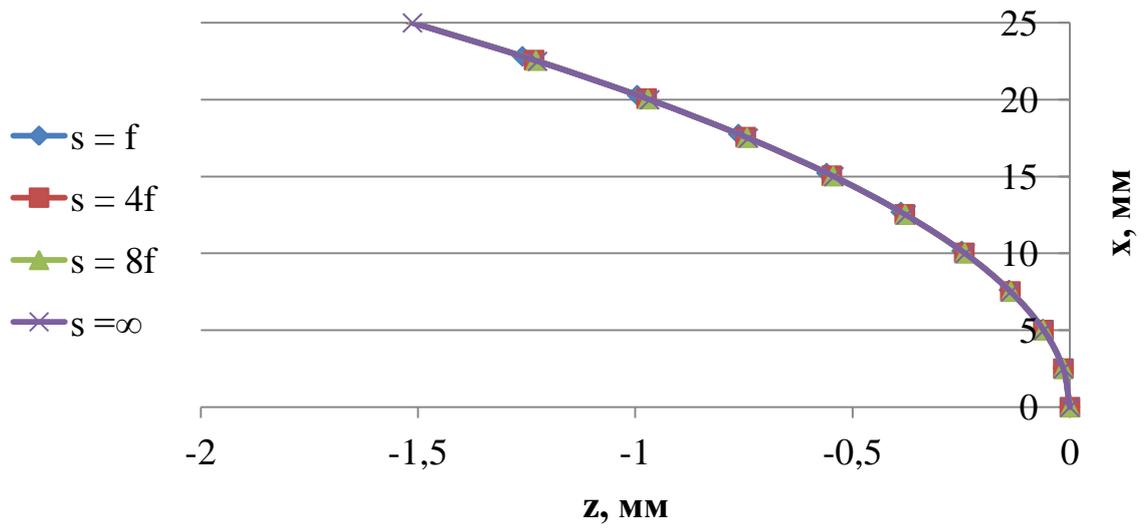


Рисунок Б.3 – Профили задних главных поверхностей плосковыпуклой линзы

$$с f' = 400 \text{ мм}$$

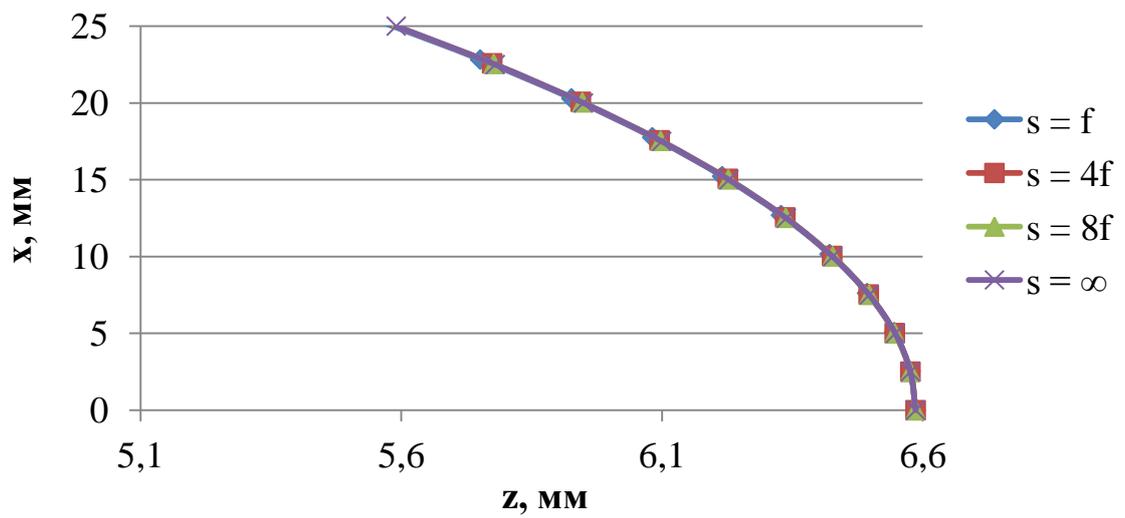


Рисунок Б.4 – Профили передних главных поверхностей плосковыпуклой линзы

$$с f' = 400 \text{ мм}$$

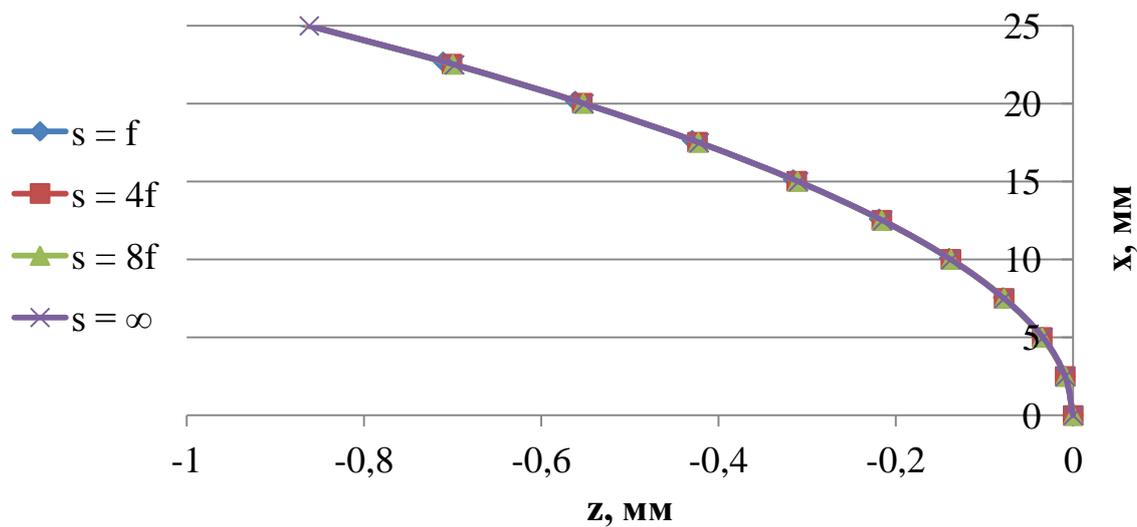


Рисунок Б.5 – Профили задних главных поверхностей плосковыпуклой линзы
с $f' = 700$ мм

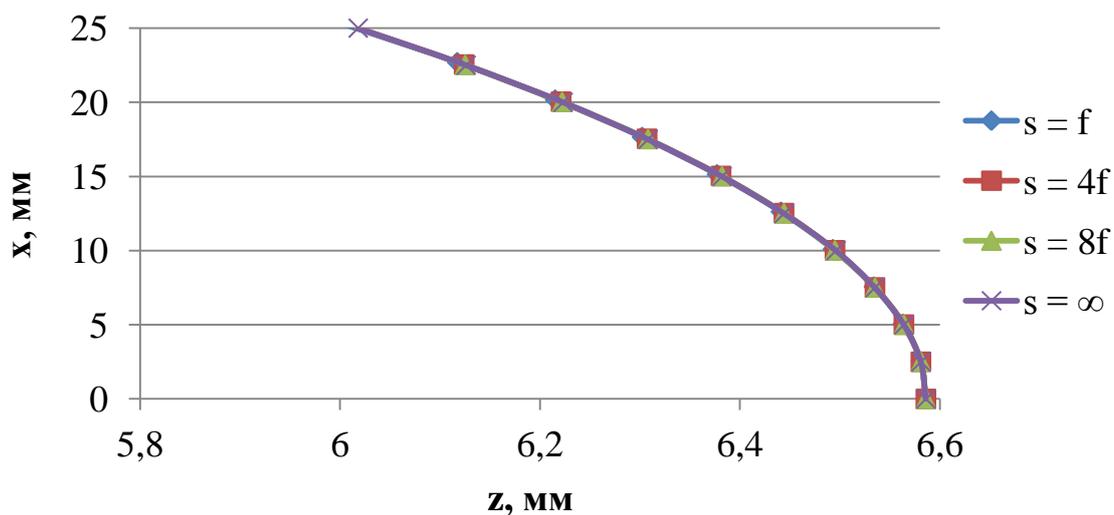


Рисунок Б.6 – Профили передних главных поверхностей плосковыпуклой линзы
с $f' = 700$ мм

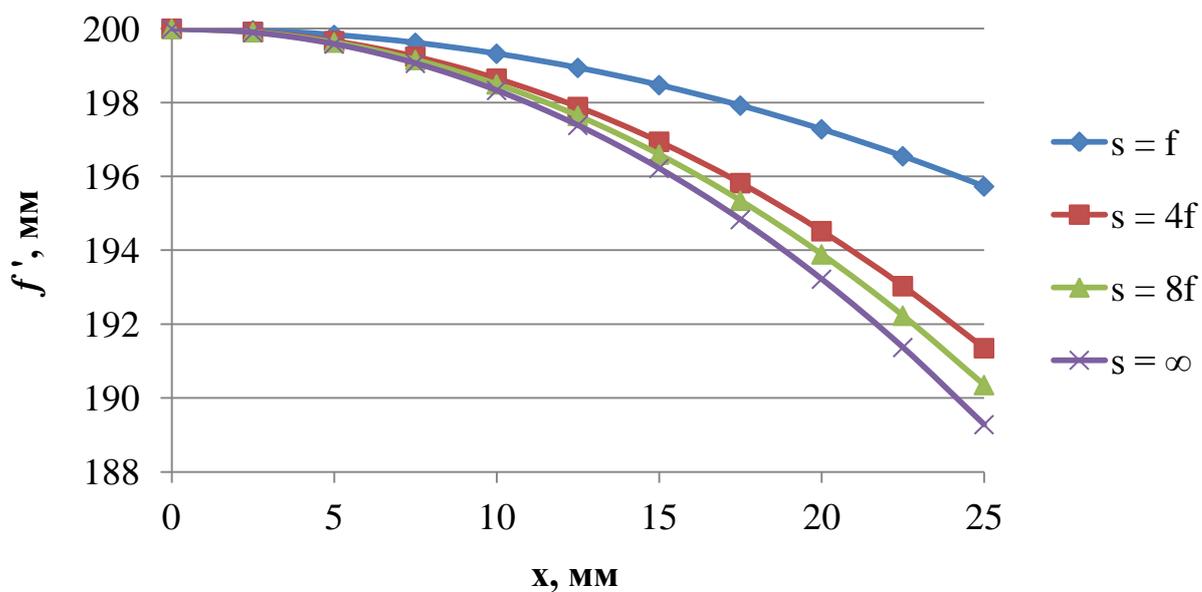


Рисунок Б.7 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 200$ мм

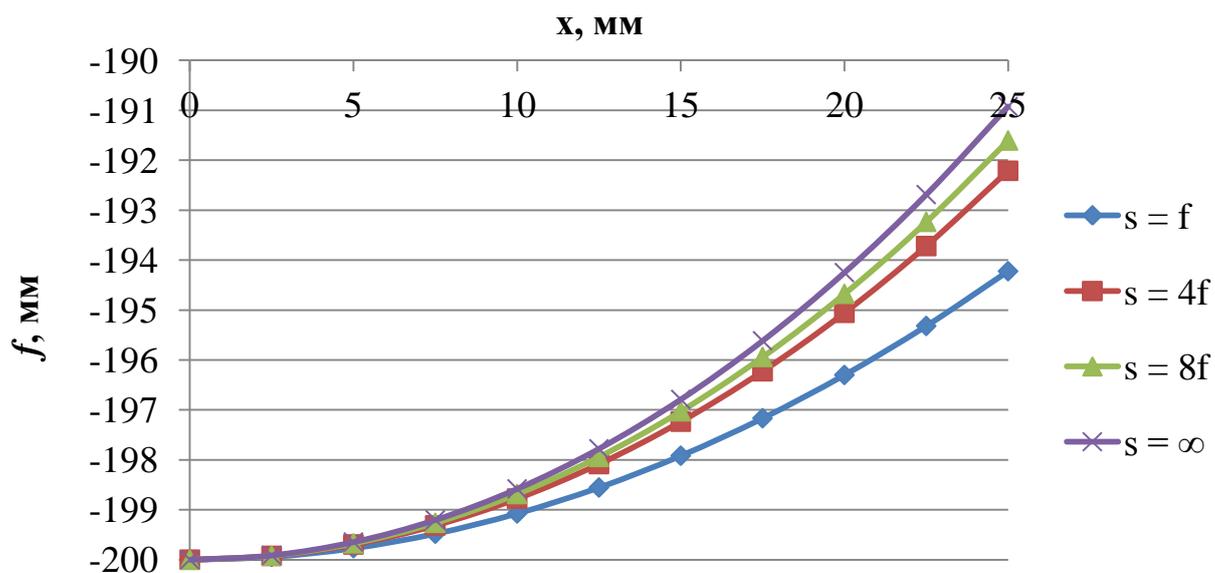


Рисунок Б.8 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 200$ м

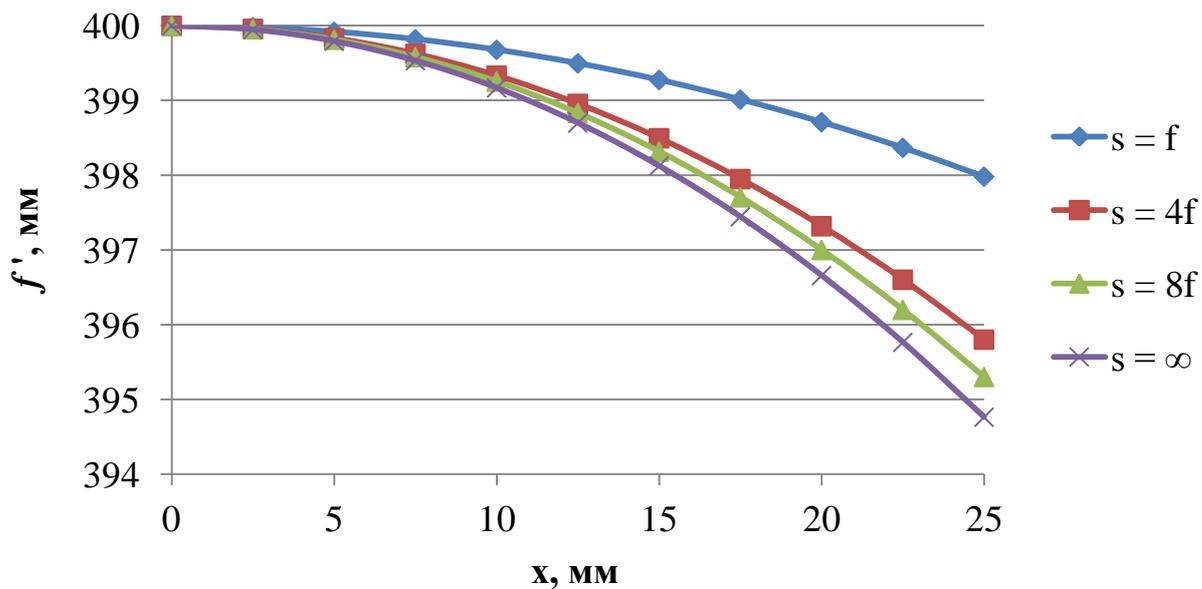


Рисунок Б.9 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 400$ мм

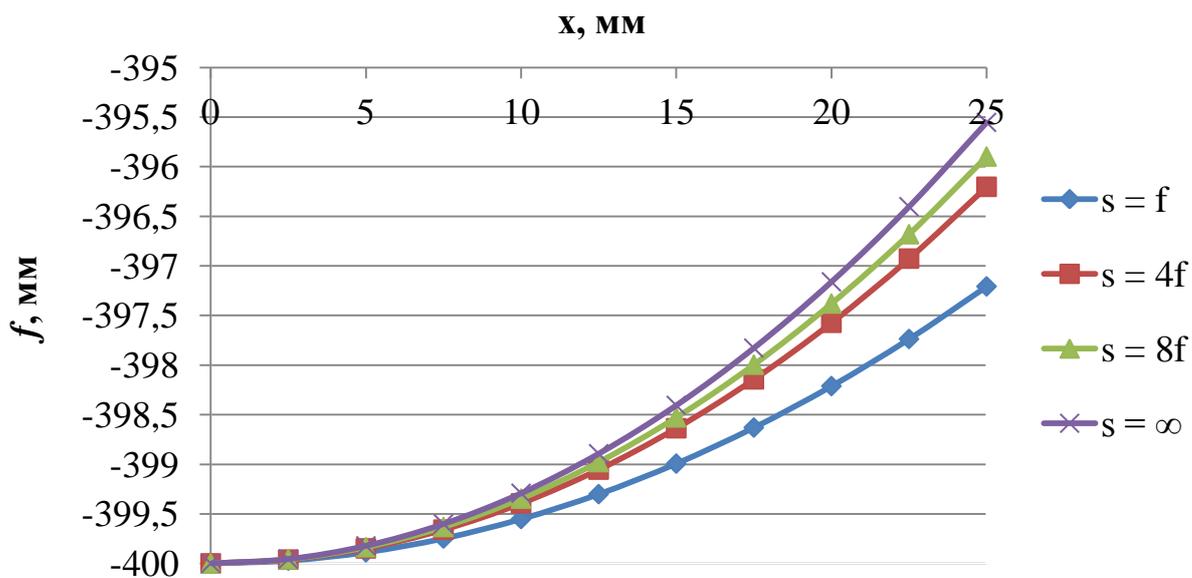


Рисунок Б.10 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 400$ м

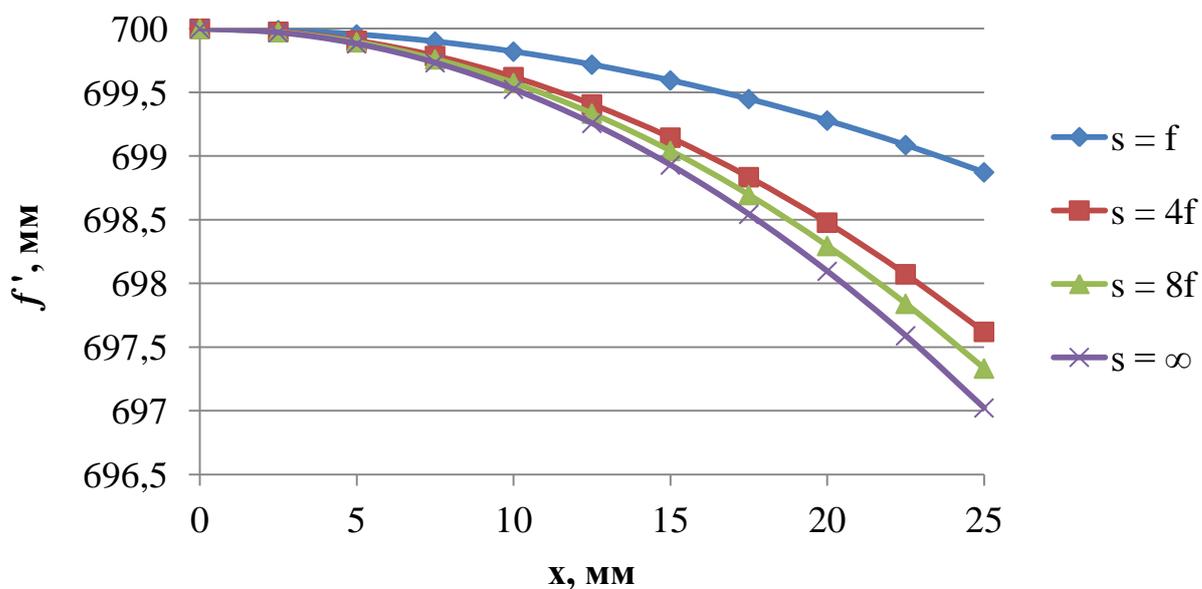


Рисунок Б.11 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 700$ мм

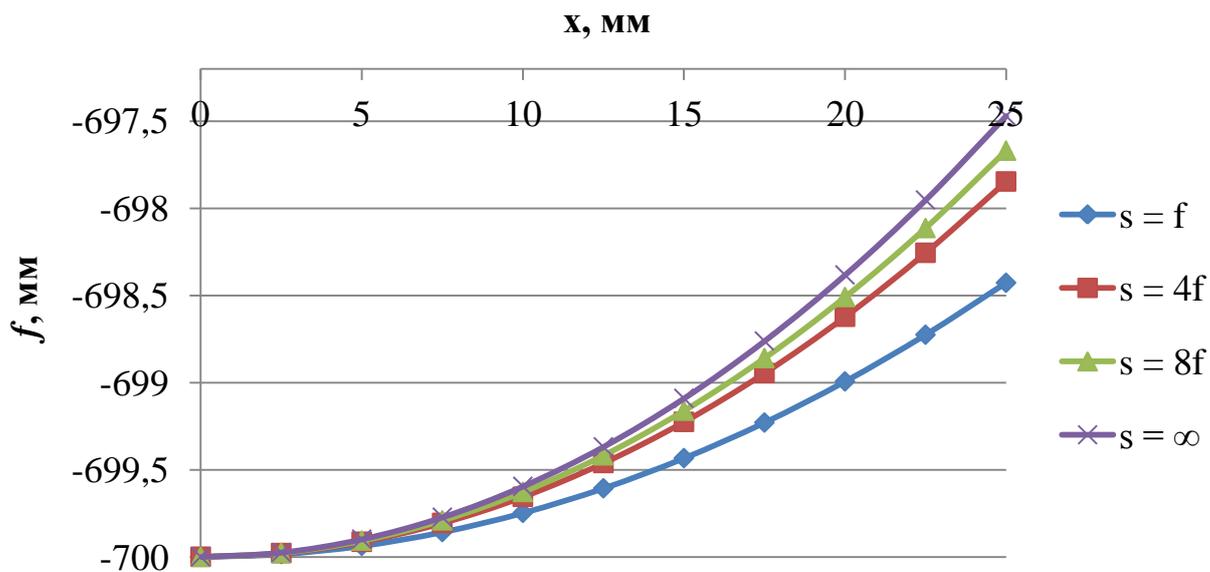


Рисунок Б.12 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке плосковыпуклой линзы с $f' = 700$ м

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты расчета двояковыпуклых линз

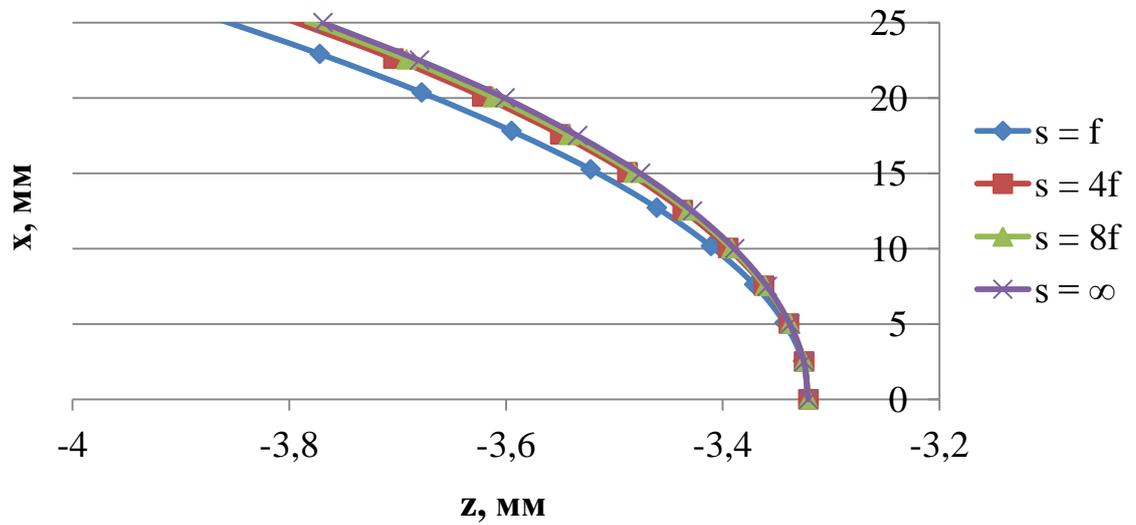


Рисунок В.1 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 200$ мм

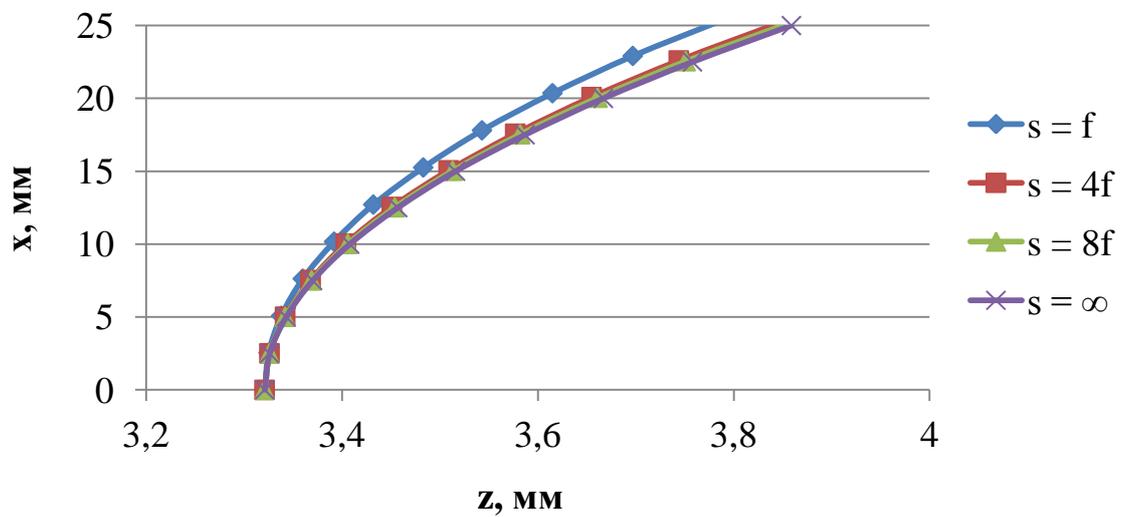


Рисунок В.2 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 200$ мм

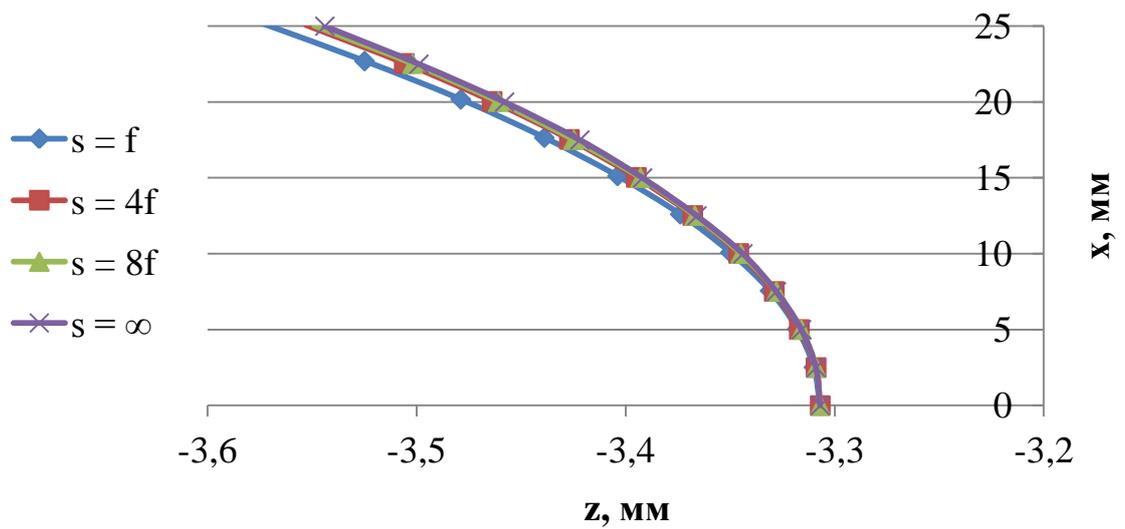


Рисунок В.3 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 400$ мм

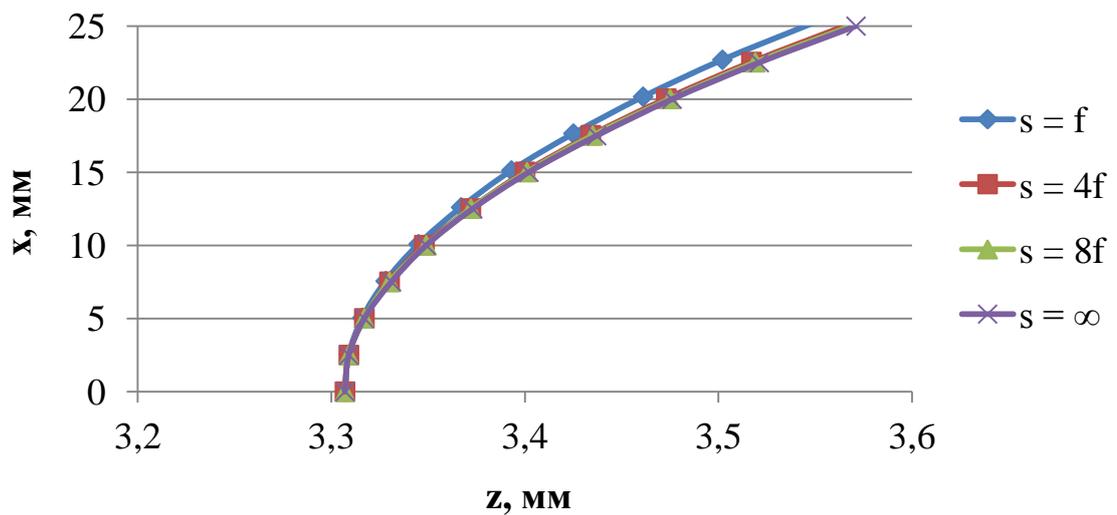


Рисунок В.4 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 400$ мм

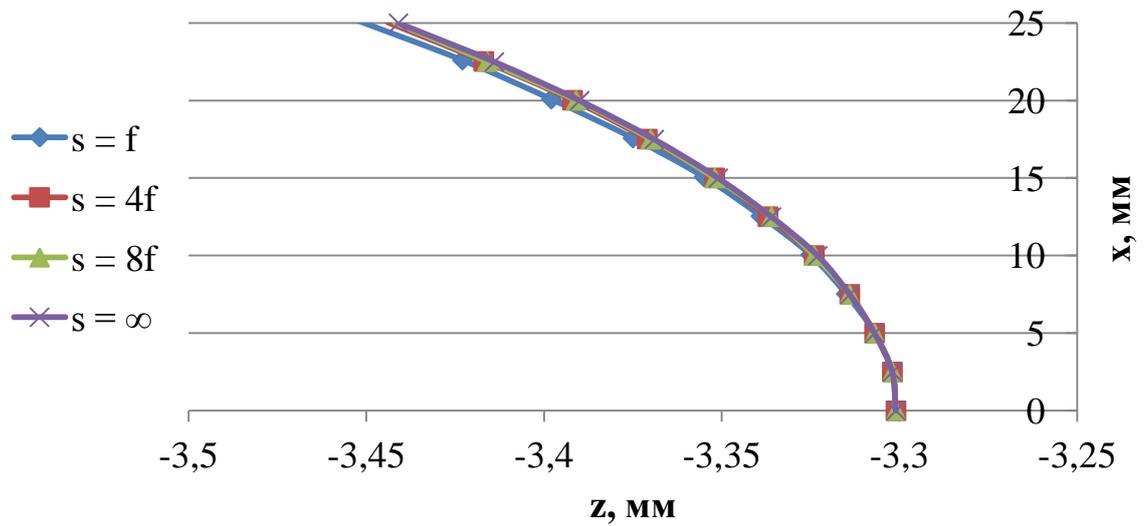


Рисунок В.5 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 700$ мм

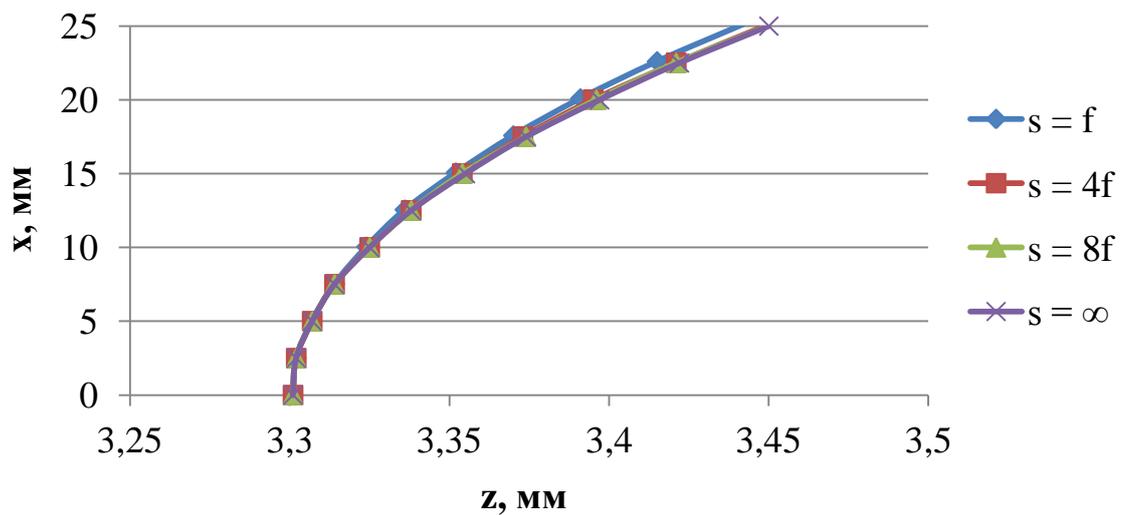


Рисунок В.6 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 700$ мм

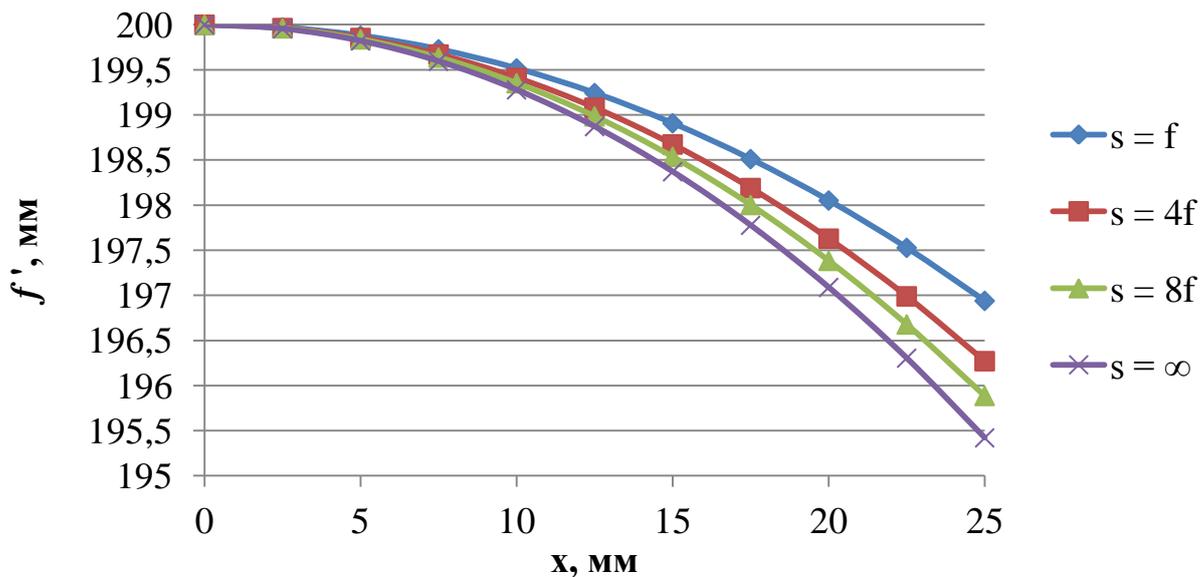


Рисунок В.7 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 200$ мм

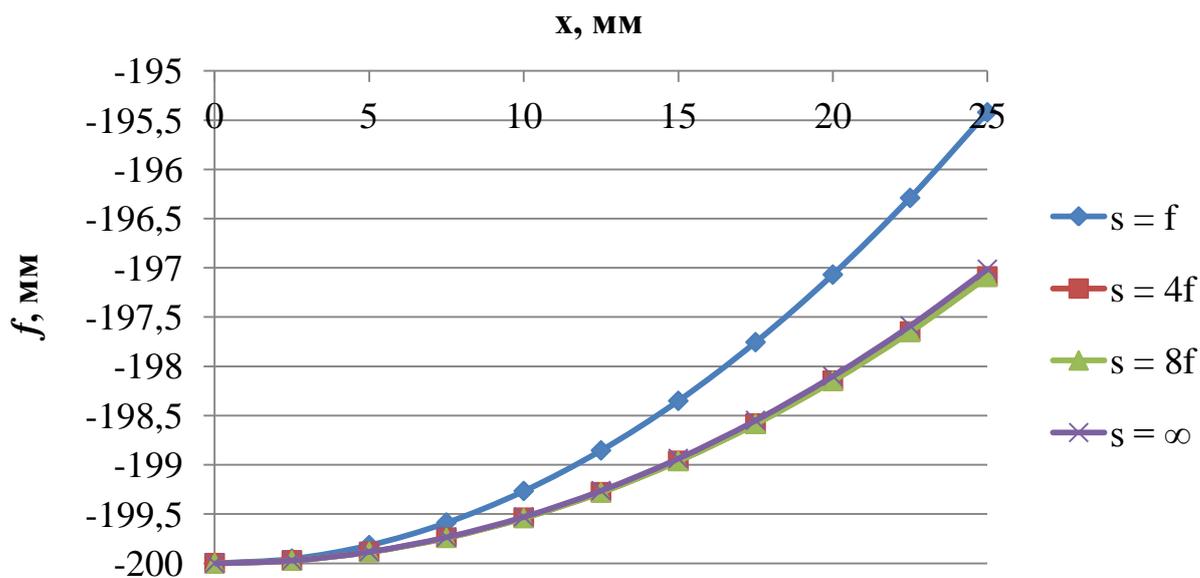


Рисунок В.8 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 200$ мм

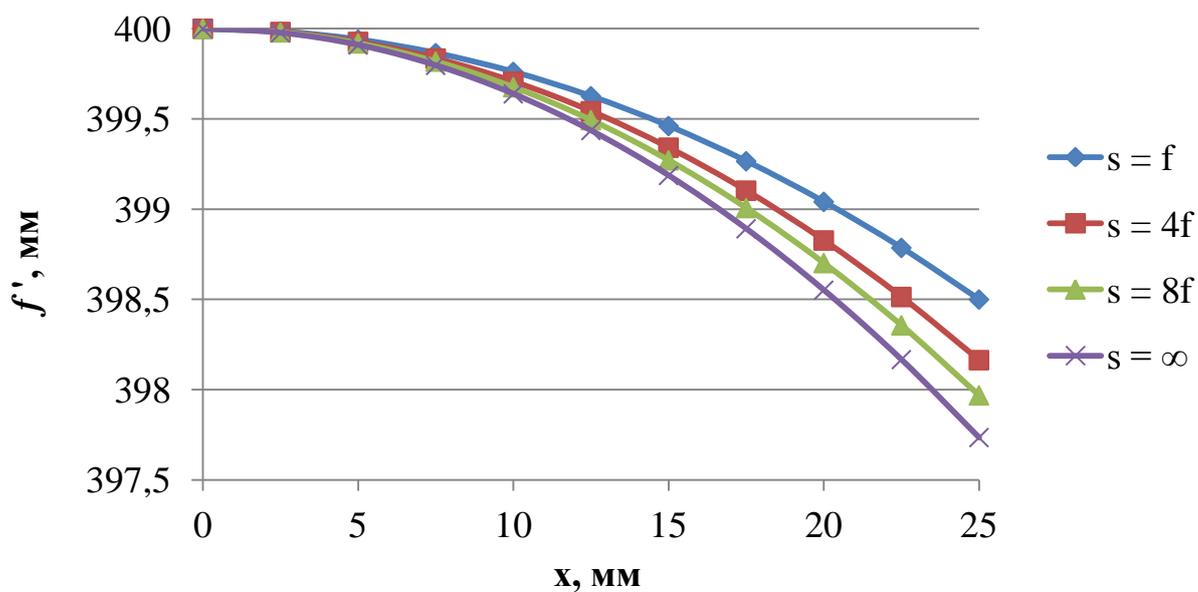


Рисунок В.9 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 400$ мм

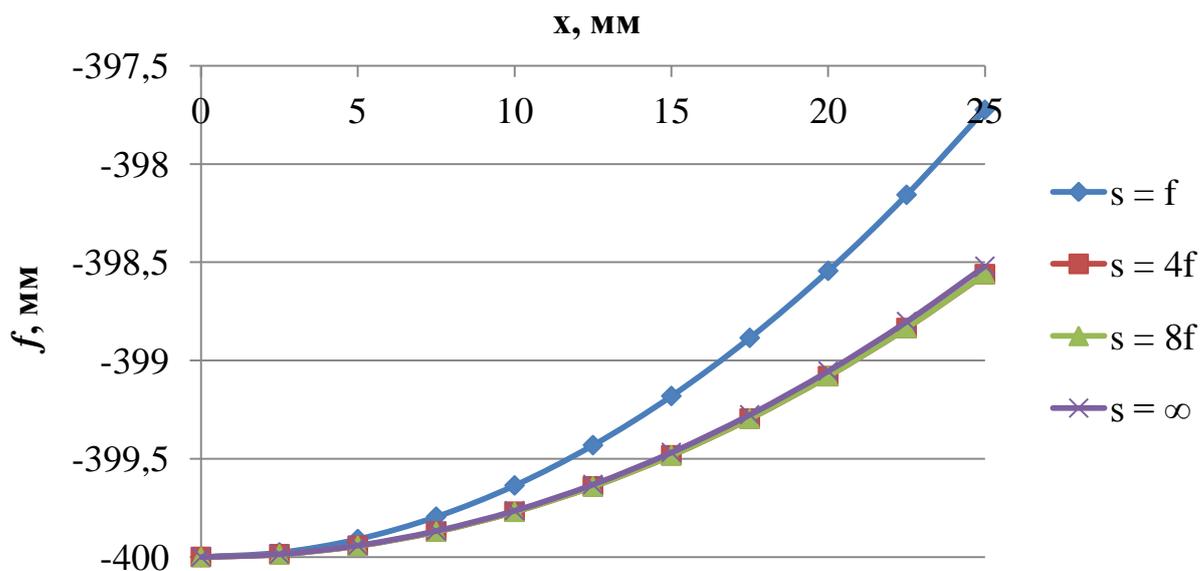


Рисунок В.10 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 400$ мм

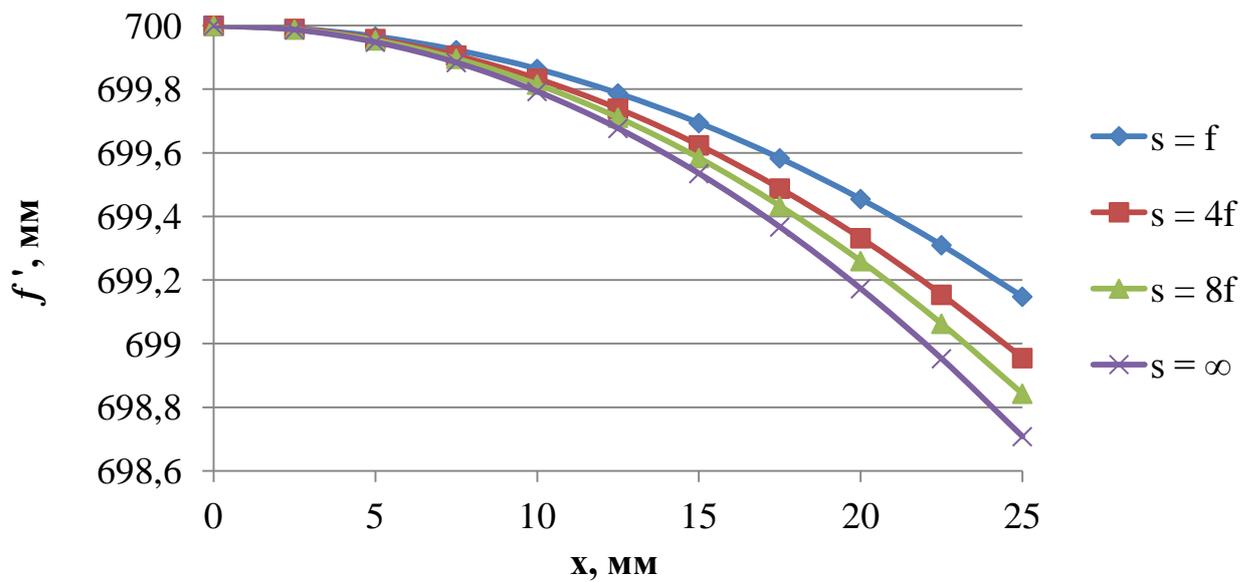


Рисунок В.11 – Зависимость задних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 700$ мм

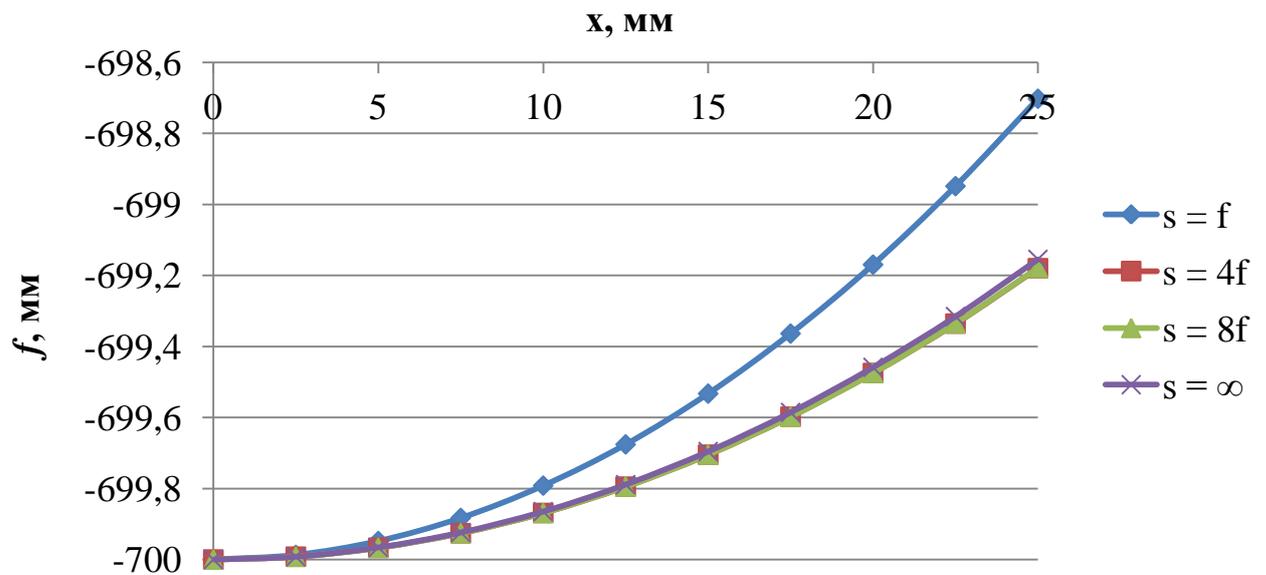


Рисунок В.12 – Зависимость передних лучевых фокусных расстояний от высоты луча на входном зрачке двояковыпуклой линзы с $f' = 700$ мм

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Профили главных поверхностей двояковыпуклых линз после оптимизации

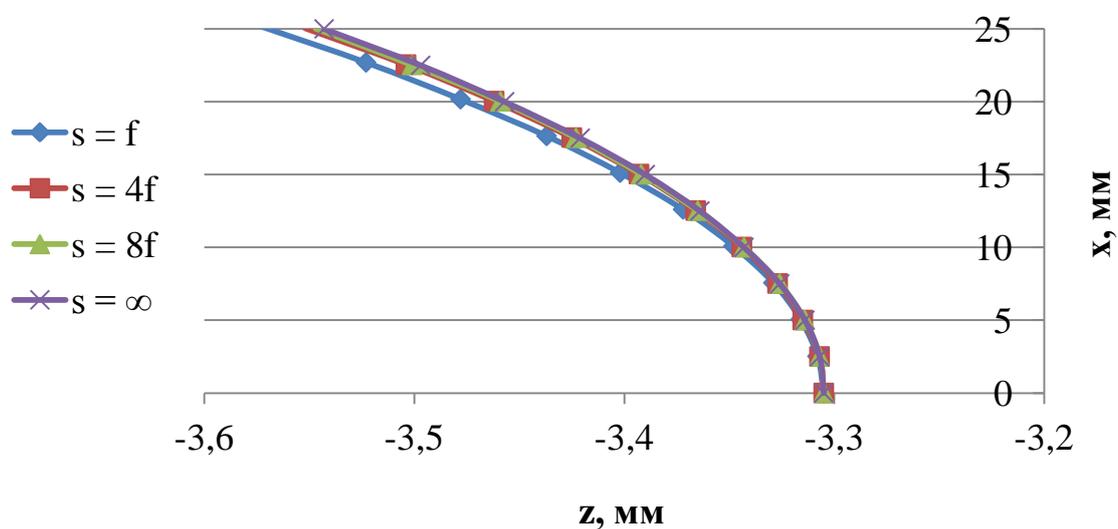


Рисунок Г.1 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 400$ мм после оптимизации

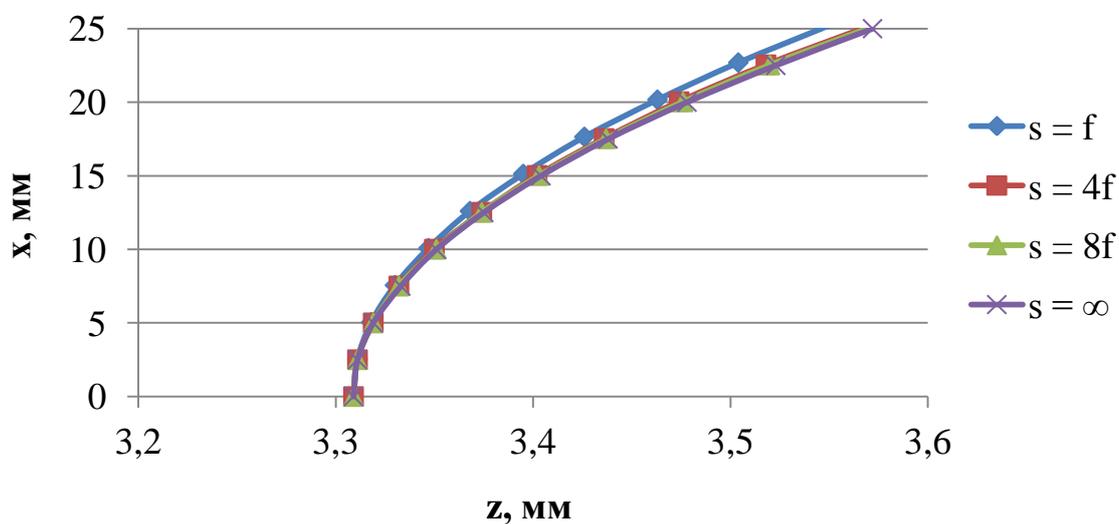


Рисунок Г.2 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 400$ мм после оптимизации

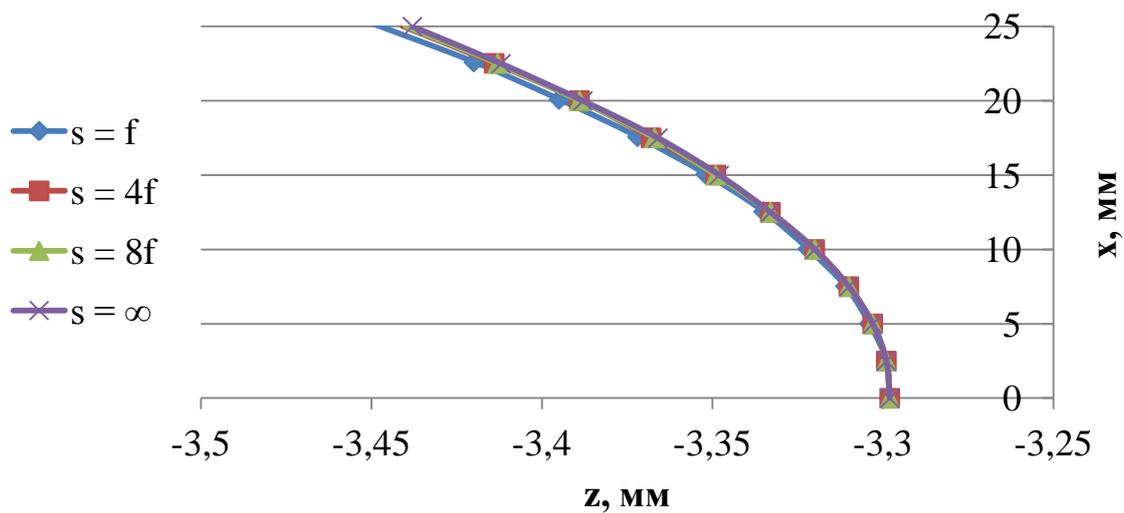


Рисунок Г.3 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 700$ мм после оптимизации

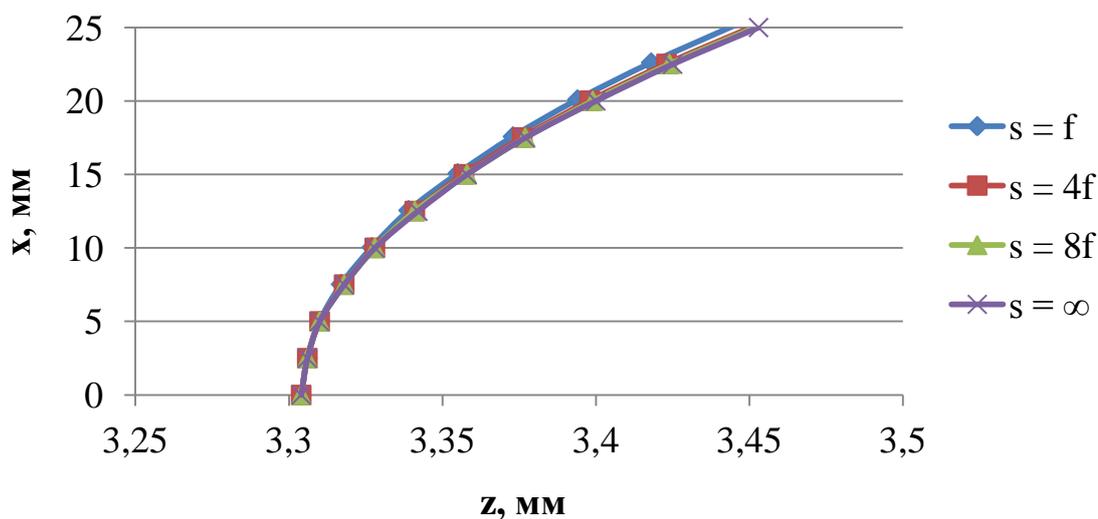


Рисунок Г.4 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы
с $f' = 700$ мм после оптимизации

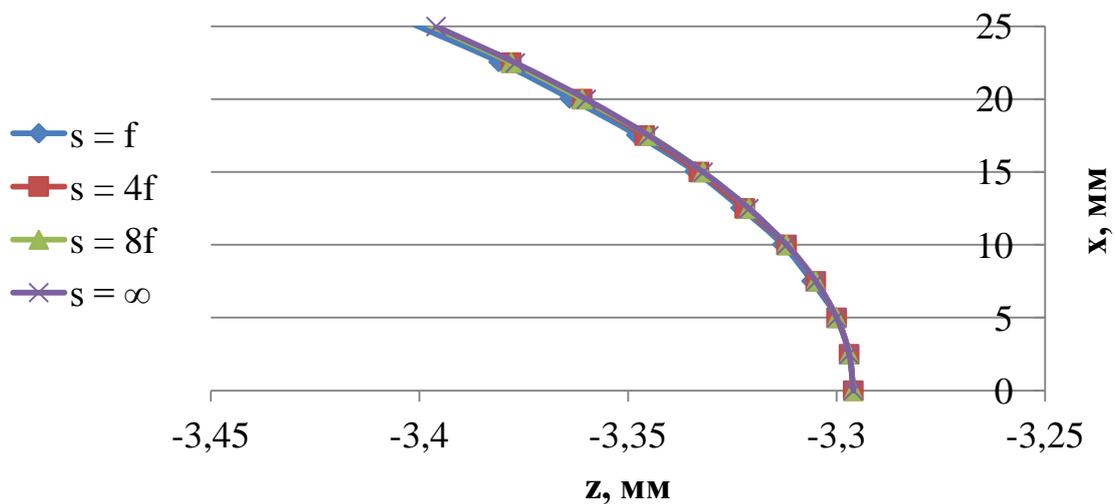


Рисунок Г.5 – Профили задних главных поверхностей двояковыпуклой линзы с $f' = 1000$ мм после оптимизации

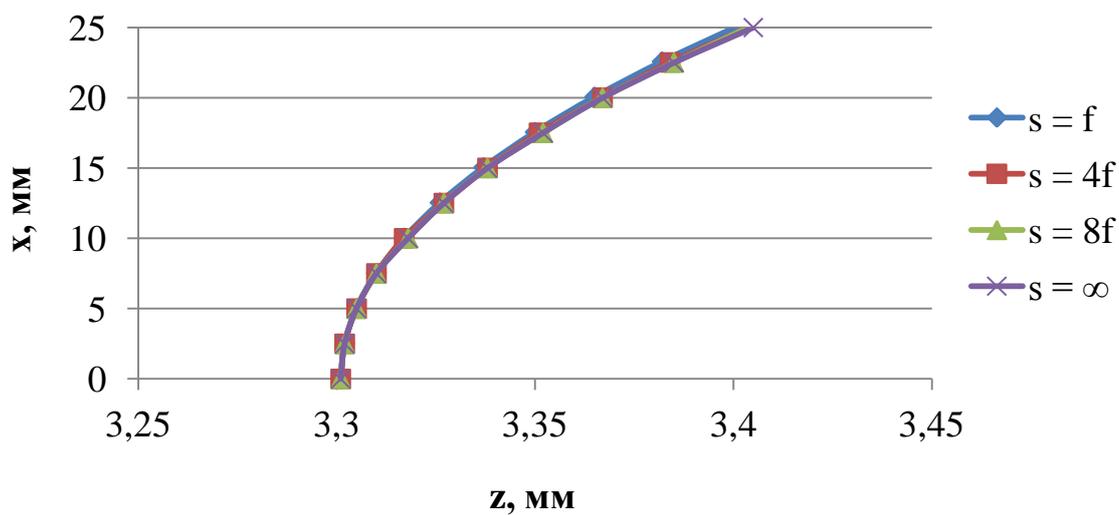


Рисунок Г.6 – Профили передних главных поверхностей двояковыпуклой линзы с $f' = 1000$ мм после оптимизации