



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ _____ «Радиоэлектроника и лазерная техника»

КАФЕДРА _____ «Лазерные и оптико-электронные системы»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

Акустооптический стереоскопический видеоспектрометр

Студент РЛ2-121
(Группа)

А.А. Головаха
(Подпись, дата) А.А. Головаха
(И.О.Фамилия)

Руководитель ВКР

В.И. Батшев
(Подпись, дата) В.И. Батшев
(И.О.Фамилия)

Консультант по конструкторской части

В.И. Батшев
(Подпись, дата) В.И. Батшев
(И.О.Фамилия)

Консультант по исследовательской части

В.И. Батшев
(Подпись, дата) В.И. Батшев
(И.О.Фамилия)

Консультант по технологической части

Д.Г. Денисов
(Подпись, дата) Д.Г. Денисов
(И.О.Фамилия)

Консультант по
организационно-экономической части

Ю.Б. Сажин
(Подпись, дата) Ю.Б. Сажин
(И.О.Фамилия)

Консультант по охране труда и экологии

И.И. Старостин
(Подпись, дата) 4.06.21 И.И. Старостин
(И.О.Фамилия)

Нормоконтролер

А.А. Патрикеева
(Подпись, дата) А.А. Патрикеева
(И.О.Фамилия)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой РЛ2
(Индекс)

Н.В. Барышников
(И.О.Фамилия)

« » 20 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

Студент группы РЛ2-121

Головаха Анна Алексеевна

(фамилия, имя, отчество)

Тема квалификационной работы акустический
стереоскопический видеоспектроскоп

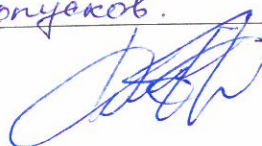
Источник тематики (НИР кафедры, заказ организаций и т.п.)

Тема квалификационной работы утверждена распоряжением 03.03.-04/03РЛМ
от «13» декабря 2020 г.

Часть 1. Конструкторская спроектировать конструкцию макета
АО стереоспектроскопа.

Часть 2. Исследовательская рассчитать оптическую систему АО стерео-
спектроскопа, работающего на основе бинарного АОФ в
квадратной схеме формирования.

Часть 3. Технологическая разработать методику сборки
АО спектрогра. провести анализ влияния конструк-
тивных параметров на пятно функции рассеяния
в пределах назначенных допусков.



Часть 4. Организационно-экономическая

Оценить целесообразность проведения НИР по разработке акустооптического стереоскопического видеоспектрометра. Провести временное планирование НИР с определением ее сроков и этапов. Рассчитать затраты на проведение НИР

Консультант

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Часть 5. Охрана труда и экология

Провести анализ потенциальных опасностей и вредных факторов при изготовлении акустооптической ячейки. Рассчитать систему вентиляции для производственного помещения, обеспечивающую безопасные условия труда при изготовлении АО ячейки.

Консультант

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Исходные данные и общие задачи работы: задача - проектирование стереоскопического АО видеоспектрометра для измерений трехмерного пространственного спектра св-в объекта. Исх. данные: АОП с углом среза $\theta = 7^\circ$, оптич.-й для констр.-й схемы в диам.-е $0,45-0,9 \text{ мм}$; угловое поле $2\omega = 3^\circ$; размеры вх. грани АО ячейки $8 \times 11 \text{ мм}^2$; двухмиллиметровые объективы для компенсации хроматизма АОП

Оформление квалификационной работы:

Расчетно-пояснительная записка на 101 листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)

- 1) Ход лучей в оптич.-й системе - 1 лист А1;
- 2) Схема оптич.-ой принципиальная - 1 лист А1;
- 3) Оптич.-й выпуск - 1 лист А1;
- 4) Оптич.-й выпуск - 1 лист А1;
- 5) Макет СБ - 1 лист А1;
- 6) Длинный канал СБ - 1 лист А2;
- 7) Короткий канал СБ - 1 лист А2;
- 8) Анализ качества изображений - 1 лист А1;
- 9) Функция-я схема - 1 лист А1;
- 10) Анализ допусков - 1 лист А1;
- 11) АО фильтр - 1 лист А1;
- 12) Экономика - 1 лист А1;
- 13) Схема проектирования - 1 лист А1.

Дата выдачи задания « ____ » ____ 20 ____ г.

В соответствии с учебным планом выпускную квалификационную работу выполнить в полном объеме в срок до « ____ » ____ 20 ____ г.

Руководитель квалификационной работы

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Студент

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Примечание: Задание оформляется в двух экземплярах: один выдается студенту, второй хранится на кафедре.

АННОТАЦИЯ

Расчетно – пояснительная записка включает: стр. 101, 36 рис., 18 табл., 30 источников, 1 приложение.

АКУСТООПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ,
ТРЕХМЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРИЯ.

Объектом разработки является акустооптический стереоскопический видеоспектрометр.

Особенность прибора заключается в возможности трехмерной визуализации спектрального изображения по всему полю зрения. В устройстве используется перестраиваемый акустооптический фильтр, который осуществляет спектральное сканирование объекта.

Целью работы является расчет оптической схемы прибора, анализ её качества и разработка экспериментальной установки.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	1
СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Научно – исследовательская часть.....	6
1.1 Акустооптическая фильтрация.....	6
1.2 Оптические схемы АО спектрометров	9
1.2.1 Схема с параллельным ходом лучей через АОФ	10
1.2.2 Конфокальная схема АО фильтрации	10
1.2.3 Схема с АОФ в сходящихся пучках лучей	11
1.3 Теоретические основы создания стереоскопического спектрометра	12
1.4 Выбор оптической схемы АОФ	14
2 Расчетно – конструкторская часть	17
2.1 Габаритный расчет ОС стереоскопического изображающего спектрометра.....	17
2.2 Абберационный расчет ОС.....	22
2.2.1 Синтез ахроматического объектива длинного канала	22
2.2.2 Объектив системы сопряжения.....	26
2.2.3 Оптимизация ахроматического объектива длинного канала.....	27
2.2.4 Короткий канал	32
2.2.5 Разработка конструкции	38
3 Технологическая часть	39
3.1 Анализ чувствительности одного из приёмных каналов оптической системы АО стереоскопического видеоспектрометра	39
3.2 Сборка АО фильтра	47
4 Организационно – экономическая часть	54
4.1 Обоснование экономической эффективности	54
4.2 Расчет цены	56
5 Охрана труда и экология	69
5.1 Вводная часть	69
5.2 Анализ потенциальных опасностей и вредности при производстве АО ячейки	70

5.2.1	Нормализация воздушной среды в производственном помещении	71
5.2.2	Освещение на рабочем месте	74
5.2.3	Шум и вибрация на рабочем месте.....	75
5.2.4	Пожарная и электрическая безопасность.....	76
5.3	Расчет местной вытяжной вентиляционной системы для производственного помещения	77
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	84
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	878

ВВЕДЕНИЕ

Существует множество оптических способов анализа различных объектов. Среди них для анализа химических, физических, биологических свойств нашли широкое применение спектральные методы. Мощным толчком к их развитию является возможность визуализации пространственного распределения спектральных свойств объектов. Для этого используются мульти- и гиперспектрометры. Перспективным является создание прибора для трехмерной пространственной визуализации спектральных свойств объектов.

Классический спектрометр отображает спектр исследуемого объекта в конкретной точке, не позволяя анализировать сразу всё изображение целиком. Для этого с помощью спектральной фильтрации выделяют те длины волн, которые соответствуют полосам поглощения, люминесценции или излучения изучаемого объекта. Такой прибор работает с плоскими поверхностями, но сейчас существует много различных медицинских, биологических и других задач, требующих возможности исследования трехмерных структур. Это позволило бы получить более полную картину расположения и формы элементов изучаемых объектов [1], [2].

Рассмотренный в данной работе стереоспектрометр позволяет отображать объект по 4-м координатам: (x, y, z, λ) . Такой эффект был достигнут прибавлением к классической системе регистрации двумерного изображения двух дополнительных координат: пространственной (z) и спектральной (λ) [3].

Существуют микроскопы с возможностью стереоскопической регистрации, в которых для получения спектрального изображения излучение необходимо дополнительно пропустить через оптический фильтр. Обычно для этого применяют набор сменных светофильтров, что не очень удобно, поскольку увеличиваются габариты системы, а выбор спектральных полос ограничен.

Приборов для построения стереоизображения на произвольных длинах волн пока не существует, что объясняет актуальность создания устройства с такой возможностью.

В данной работе используется акустооптический (АО) фильтр — это перестраиваемый оптический фильтр, управляемый акустическим сигналом. Из-за способности к перестройке такие фильтры идеально подходят для регистрации спектров оптического излучения.

Разработанный стереоскопический акустооптический видеоспектрометр основан на оптической схеме стереомикроскопа Аббе [4], в котором изображение независимо формируется в двух параллельных оптических каналах через одну общую объективную линзу.

Цель работы: разработка оптической схемы стереоскопического АО видеоспектрометра.

Задачи:

- габаритный расчет оптической системы стереоскопического изображающего спектрометра;
- абберационный расчет оптической системы;
- анализ качества рассчитанной оптической системы,
- проектирование макета разработанного прибора.

1 Научно – исследовательская часть

1.1 Акустооптическая фильтрация

При взаимодействии акустических возмущений с электромагнитными волнами в упругой среде возникают акустооптические явления. Наиболее сложные из них можно наблюдать в анизотропных твердых телах. Физической основой такого взаимодействия является упругооптический эффект, наблюдаемый в любых упругих средах [5].

Чаще всего в качестве упругой среды выступают одноосные кристаллы. Для инфракрасного и видимого диапазонов наибольшее применение нашел монокристаллический диоксид теллура TeO_2 , который также называют парателлурином.

В данной работе парателлурит выступает в качестве акустооптического фильтра (АОФ) – двулучепреломляющий кристалл, внутри которого с помощью пьезоэлектрического преобразователя возбуждается бегущая звуковая волна. При распространении волны в кристалле возникает бегущая периодическая последовательность изменений показателя преломления [5], которая представляет собой объёмную дифракционную решетку. Если ширина светового пучка больше периода последовательности, то наблюдается дифракция света на фазовой решетке, бегущей со скоростью звука.

Длина области взаимодействия электромагнитной волны с акустической определяет тип дифракции. При достаточно большой длине взаимодействия в направлении распространения света и относительно высоких частотах звука решетка представляется трехмерной. В таком случае углы падения света на звуковую волну должны удовлетворять условию Вульфа-Брэгга [6], иначе дифракция невозможна. Данное акустическое взаимодействие называется дифракцией Брэгга.

Дифракция света на ультразвуке для анизотропных и изотропных сред различна. В первой из них при дифракции падающая электромагнитная волна раскладывается на две взаимно ортогонально поляризованных световых волны. Для анизотропной дифракции в одноосных кристаллах был приведен расчет углов Брэгга в статье [7].

Перестройка АО фильтра осуществляется благодаря условию Брэгга, которое связывает длины волн света и ультразвука с углом падения электромагнитной волны. При падении сплошного спектра на АО ячейку дифрагировать на объёмной фазовой решетке будут лишь те длины волн, которые удовлетворяют условию Брэгга на заданной частоте звука. Оставляя неизменным угол падения света и меняя частоту звука, осуществляется перестройка АО фильтра, поскольку условие Брэгга будет выполняться уже для других длин волн.

Для реализации фильтрации оптических изображений используют неколлинеарное АО взаимодействие электромагнитной волны со звуком в анизотропной среде [5]. Такие фильтры являются широкоугольными. Дифракция в этом случае определяется условием брэгговского синхронизма:

$$\vec{k}_i + \delta\vec{k}_i \mp \vec{K} = \vec{k}_d + \delta\vec{k}_d, \quad (1.1)$$

где \vec{k}_i, \vec{k}_d – волновые векторы падающего и дифрагированного света соответственно;

$\delta\vec{k}_i, \delta\vec{k}_d$ – изменения векторов падения и дифракции;

\vec{K} – волновой вектор взаимодействующих волн.

Из выражения (1) следует векторное равенство:

$$\delta\vec{k}_i = \delta\vec{k}_d \quad (1.2)$$

На рисунке 1 показано, что векторы $\delta\vec{k}_i$, $\delta\vec{k}_d$ лежат в плоскостях, касательных к поверхностям волновых нормалей, проведенным через концы векторов \vec{k}_i , \vec{k}_d . Согласно выражению (2), эти плоскости должны быть параллельны. Поэтому направления векторов \vec{k}_i , \vec{k}_d , \vec{K} выбираются так, чтобы лучевые векторы падающего и дифрагированного света (ортогональные к касательным плоскостям на рисунке 1) были параллельны [5].

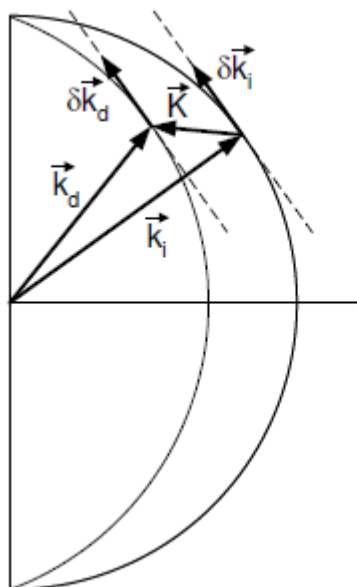


Рисунок 1 – Векторная диаграмма для широкоугольного фильтра

1.2 Оптические схемы АО спектрометров

Акустооптические (АО) перестраиваемые фильтры применяются во многих областях, таких как биомедицина, волоконно-оптическая связь, спектроскопия и т.д. Их основными преимуществами являются отсутствие подвижных частей, компактность, произвольный спектральный доступ и высокое спектральное и угловое разрешение. Ключевым фактором, ограничивающим применимость таких фильтров для визуализации изображений, являются аберрации, неизбежно возникающие при акустооптическом взаимодействии [8]. На проявление аберраций и, как следствие, на качество изображения влияет множество причин: однородность кристалла, конфигурации АО взаимодействия, однородность акустического поля и другие.

Аберрации изображения, вызванные АО фильтрацией, проявляются в виде уменьшения контраста, спектрального дрейфа и осевого сдвига, пространственных искажений, размытия изображения и так далее [8]. В области спектральных измерений наиболее важной является величина хроматических аберраций. Она пропорциональна двулучепреломлению кристалла и для парателлурита может достигать 10-20% всего поля зрения. Такие искажения не позволяют точно сопоставить изображения на разных длинах волн и получить точные спектральные характеристики.

Рассмотрим несколько различных оптических схем АО спектрометров, отличающихся конструкцией и присущих им аберрациями.

1.2.1 Схема с параллельным ходом лучей через АОФ

Широко используется схема с параллельным ходом лучей через АОФ, изображенная на рисунке 2 [8]. В ней можно получить высокое качество изображения, так как отсутствует сферическая aberrация, кома, астигматизм и кривизна поля. Но из-за нелинейной зависимости угла дифракции от углов падения, возникает дисторсия. Спектральная зависимость угла дифракции приводит к хроматическому сдвигу изображения. Обе aberrации можно компенсировать.

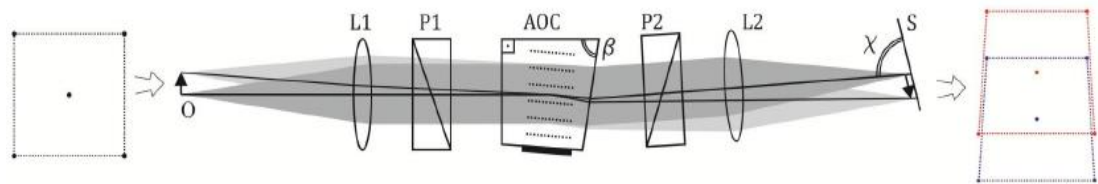


Рисунок 2 – Оптическая схема АОФ с параллельным ходом лучей

Иллюстрация типовых монохроматических и хроматических aberrаций изображения. Красный и синий представляют различные длины волн. L1, L2 – идеальные объективы, P1, P2 – поляризаторы.

1.2.2 Конфокальная схема АО фильтрации

В данной работе использовалась конфокальная схема, изображенная на рисунке 3, в ней отсутствуют две aberrации – дисторсия и хроматический сдвиг изображения, что даёт хорошее качество. Тем не менее, другие виды aberrаций не исчезают. Наибольший вклад даёт хроматизм положения. Монохроматические aberrации малы и можно получить систему, близкую к дифракционно-ограниченной.

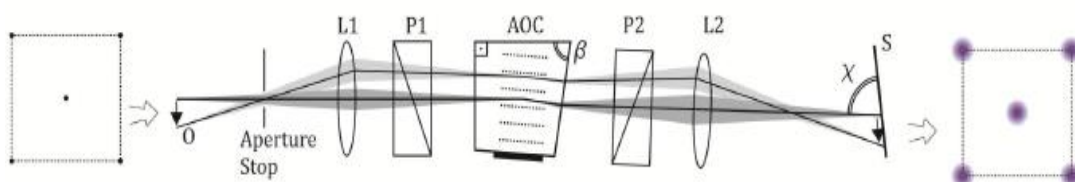


Рисунок 3 – Конфокальная схема АО фильтрации

Иллюстрация типовых монохроматических и хроматических aberrаций изображения. Красный и синий представляют различные длины волн. L1, L2 – идеальные объективы, P1, P2 – поляризаторы.

1.2.3 Схема с АОФ в сходящихся пучках лучей

В схеме с АОФ в сходящихся пучках лучей, изображенной на рисунке 4, присутствуют поперечные aberrации, а именно, сферическая aberrация и кома. Данная конструкция является наиболее компактной и дешёвой, поэтому, несмотря на низкое качество изображения, она используется чаще остальных.

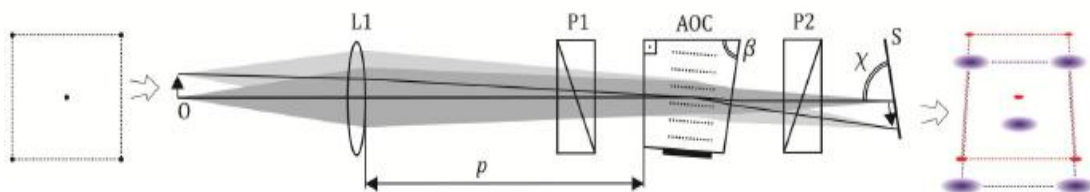


Рисунок 4 – Схема с АОФ в сходящихся пучках лучей

Иллюстрация типовых монохроматических и хроматических aberrаций изображения. Красный и синий представляют различные длины волн. L1, L2 – идеальные объективы, P1, P2 – поляризаторы.

1.3 Теоретические основы создания стереоскопического спектрометра

В данной работе используются широкоугольные АО фильтры, в которых реализуется неколлинеарное АО взаимодействие электромагнитной волны со звуком в анизотропной среде. Поскольку существует множество допустимых направлений распространения и поляризации взаимодействующих электромагнитных и звуковых волн, обеспечивается несколько вариантов одновременной фильтрации параллельных пар лучей [9].

Для широкоапертурной геометрии дифракции двух лучей на одном звуковом столбе направления распространения падающего света однозначно определяются направлениями распространения акустической волны. На рисунке 5 приведена схема АО ячейки, на которую падает свет под углом θ , q - волновой вектор распространения звука, γ – угол среза грани кристалла.

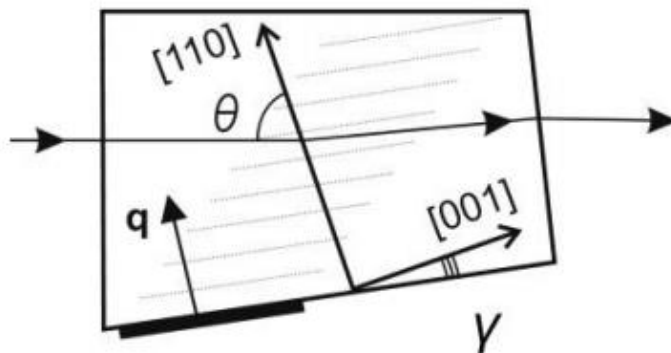


Рисунок 5 – Схема АО ячейки

Связь между углом распространения θ падающей световой волны и ориентацией волнового вектора q , определяемая углом среза γ грани кристалла, показана на рисунке 6 [9].

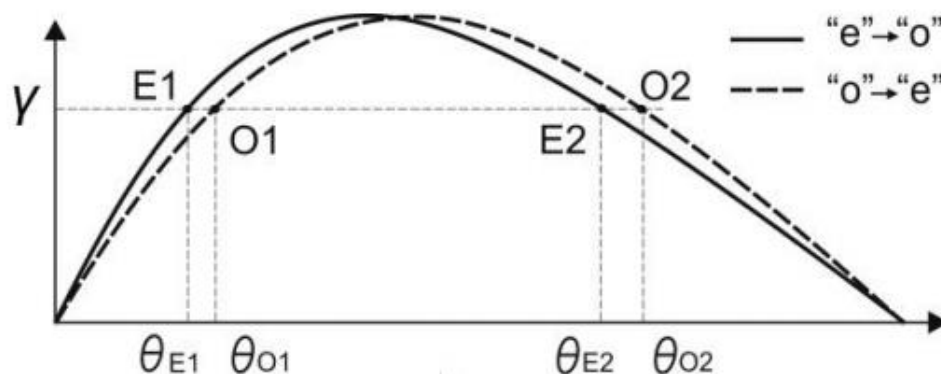


Рисунок 6 – Зависимость $\gamma(\theta)$ при широкоугольной дифракции

Пунктирная линия на рисунке 6 соответствует случаю дифракции, когда в АО ячейку вводится обыкновенное «о» - поляризованное излучение под углом θ_{01} или θ_{02} , а выходит из неё необыкновенное «е» - поляризованное излучение. Сплошная линия – дифракция входящего под углом θ_{E1} или θ_{E2} необыкновенно «е» - поляризованного света. Таким образом, для выбранного угла среза γ грани кристалла существует четыре возможных углов θ падения света: два обыкновенно поляризованных (θ_{01} , θ_{02}) и два необыкновенно поляризованных (θ_{E1} , θ_{E2}).

В данной работе использовался угол среза $\gamma = 7^\circ$, в статье [9] для него были рассчитаны все углы падения света, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Соответствие углов падения света θ углу среза γ

γ	θ_{E1}	θ_{01}	θ_{E2}	θ_{02}
7°	$6,75^\circ$	$7,73^\circ$	$73,85^\circ$	$75,74^\circ$

1.4 Выбор оптической схемы АОФ

Ранее было отмечено, что в данной работе используется конфокальная схема АО фильтрации. При этом для получения стереоизображения необходимо наличие двух оптических каналов. В этом случае внутри АО ячейки на одной звуковой волне будет одновременно дифрагировать два пучка световых лучей, возможность такой конфигурации была описана в предыдущем разделе.

Существует три основных схемы с распространением двух лучей одновременно через одну АО ячейку: с параллельными ($\theta_1 = \theta_2$), сходящимися ($\theta_1 \approx \theta_2$) и пересекающимися ($\theta_1 \neq \theta_2$) падающими лучами света [9]. Все эти конфигурации представлены на рисунке 7 и обозначены S-1, S-2, S-3 соответственно. Каждая из них предполагает индивидуальную форму АО ячейки и разные схемы спектрометра.

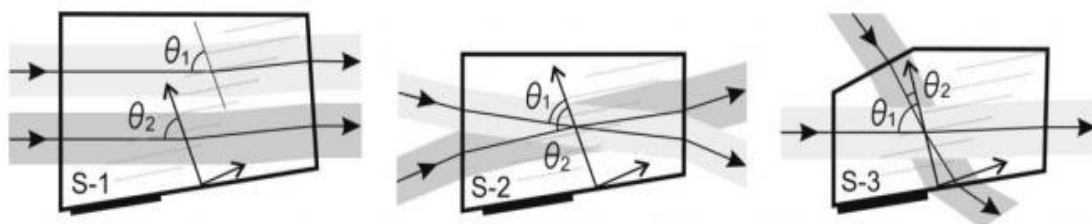


Рисунок 7 – Форма АО ячейки для случая параллельных (S-1), сходящихся (S-2), пересекающихся (S-3) падающих световых лучей

Первая схема на рисунке 7 (S-1) представляет собой ячейку, внутри которой дифрагируют два падающих на неё параллельных пучка лучей. Согласно исследованиям [9], при такой конфигурации лучи будут искажаться одинаково в обоих оптических каналах, что позволит получить идентичные изображения. Еще одно преимущество – параллельный ход лучей упрощает приёмную часть оптической системы (ОС) спектрометра. Основным недостатком является большой размер АО ячейки, необходимый для пространственного разделения лучей.

Вторая схема на рисунке 7 (S-2) обеспечивает малые габариты спектрометра, но имеет два существенных недостатка. Между падающими на АО ячейку лучами достаточно маленький угол, что значительно усложняет конструкцию входной ОС. Такая схема предполагает наличие призм или системы зеркал. Вторым недостатком являются большие остаточные aberrации. Поскольку оба луча преломляются на одних и тех же гранях, aberrации обоих лучей не могут быть исправлены одновременно.

Третья схема на рисунке 7 (S-3) представляет собой нетривиальную конфигурацию АО ячейки, что требует тщательной проработки. Такая форма фильтра позволяет уменьшить габариты и получить высокое качество изображения. Входная оптическая система может состоять из двух плоских зеркал или призм. Так как световые лучи падают на разные грани АО ячейки, aberrации в двух оптических каналах могут быть исправлены независимо. В статье [9] было отмечено, что предпочтительнее использовать дифракцию необыкновенного «е» - поляризованного излучения, поскольку это позволит уменьшить размеры ячейки в связи с отклонением лучей вверх.

Таким образом, для данной работы была выбрана третья конфигурация АО ячейки (S-3), поскольку она самая компактная и формирует изображение с лучшим качеством. Для реализации такой схемы было предложено использовать две треугольные призмы, приклеенные к граням фильтра [10]. Схема такого фильтра приведена на рисунке 8.

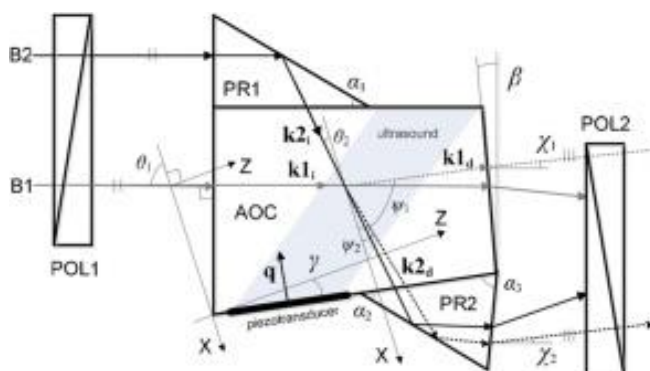


Рисунок 8 – Схема АО ячейки с двумя призмами

Внутри АО фильтра формируется структура, работающая как дифракционная решетка. Известно, что пучок белого света, падающий на дифракционную решетку, будет разложен на спектральные составляющие, поскольку угол дифракции, определяющий направление, в котором наблюдается главный дифракционный максимум, зависит от длины волны. Это явление называется *дисперсией света*. Для компенсации дисперсии света выходная грань АО фильтра наклонена относительно оптической оси, что проиллюстрировано на рисунке 8.

Фильтр работает в широкоугольном режиме, который необходим для визуализации изображений. Два оптических канала на рисунке 8 обозначены B_1 , B_2 . В первом канале B_1 широкополосный свет проходит напрямую через АО ячейку. Падающий луч k_{1i} имеет необыкновенную «е» - поляризацию, полученную с помощью входного поляризатора POL_1 . Он дифрагирует на фазовой решетке, сформированной внутри ячейки ультразвуком, возбужденным пьезопреобразователем. Распространение звуковой волны описывается волновым вектором q . В связи с особенностями брэгговской дифракции вышедший пучок света k_{1d} поляризован ортогонально входящему: обыкновенно «о». Чтобы оставить только дифрагированную часть излучения, на выходе из фильтра стоит поляризатор POL_2 , ортогональный первому POL_1 . Таким образом, недифрагированный свет исключается из спектра прошедшего излучения.

Во втором канале B_2 луч распространяется ближе к оси X. Чтобы свет проходил через боковые грани АО ячейки, используются две треугольные призмы PR_1 и PR_2 . Они изготавливаются из парателлурита с одинаковой ориентацией осей кристаллов. Призмы рассчитаны таким образом, чтобы входящее и выходящее излучение распространялось параллельно в двух каналах, а aberrации ОС были минимальны.

2 Расчетно – конструкторская часть

2.1 Габаритный расчет ОС стереоскопического изображающего спектрометра

Обобщенная схема разрабатываемого спектрометра приведена на рисунке 9. Входной объектив 2 формирует пару световых пучков, переносящих изображение объекта 1 в двух параллельных оптических каналах B_1 , B_2 . Объективы 3 и 6 представляют систему сопряжения, которая обеспечивает необходимое поле зрения и ограничивает апертуру лучей, входящих в АО фильтр 10. Пара одинаковых линз 6 фокусируют свет внутри АО ячейки 10, где он дифрагирует на объёмной фазовой решетке. Перед фильтром установлен поляризатор 7, который обеспечивает необыкновенную «е» - поляризацию падающего излучения. На выходе из фильтра стоит ортогональный первому 7 второй поляризатор 11, необходимый для пропускания в выходную часть ОС только дифрагированного света. Полевые диафрагмы 4, расположенные в задних фокальных плоскостях линз 3, ограничивают поле зрения. Апертурные диафрагмы 5, установленные в передних фокальных плоскостях линз 6, обеспечивают телецентрический ход лучей внутри АОФ. Пучок света во втором канале B_2 проходит через две треугольные призмы 8, 9, которые обеспечивают эффективную брэгговскую дифракцию и параллельное первому пучку B_1 распространение света после АОФ. После поляризатора 11 два обыкновенно «о» - поляризованных пучка, несущих стереоскопическое изображение объекта, фокусируются двумя идентичными объективами 12 на матричных фотоприемниках 13.

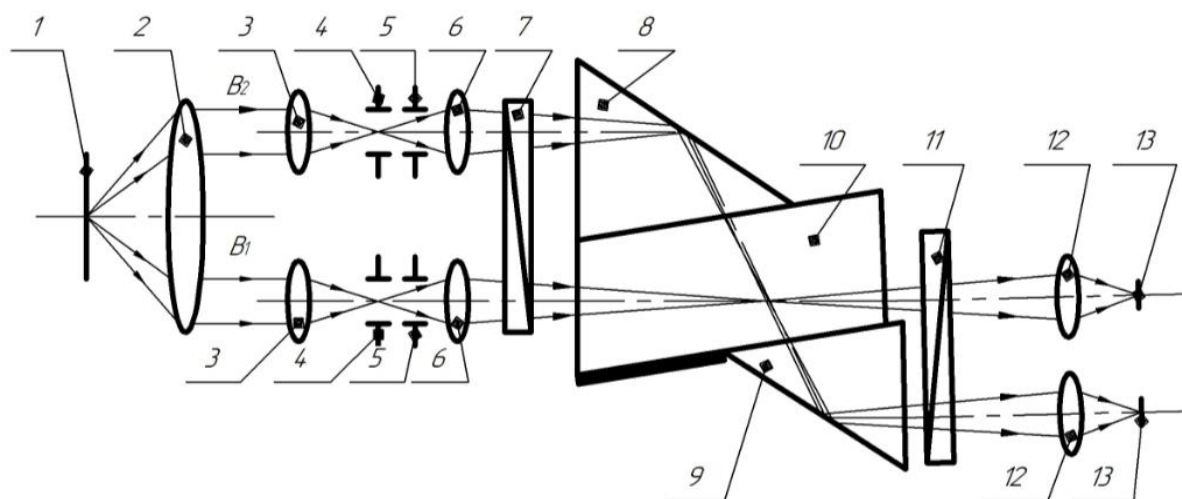


Рисунок 9 – Ход лучей в АО спектрометре

Исходными данными для габаритного расчета являются полное угловое поле каждого канала 2ω , составляющее 3° по обоим направлениям, размер входного зрачка, размеры приёмника и отдельного пикселя. Размеры входной грани АО ячейки $8 \times 11 \text{ мм}^2$, для простоты расчета будем считать зрачок круглым с диаметром $D = 13 \text{ мм}$, что равняется диагонали данного прямоугольника. В качестве приемников излучения используются камеры DMK 33UX287 с КМОП-матрицей SONY IMX287LLR с размером пикселя $6,9 \times 6,9 \text{ мкм}^2$ и числом пикселей 728×544 , что соответствует размеру сенсора $5,0 \times 3,7 \text{ мм}^2$ (диагональ $1 / 2.9''$).

Оптические характеристики элементов обоих каналов АО стереоспектрометра одинаковы. Для определения этих характеристик проводится расчет одного канала, который будет справедлив и для другого.

Ранее были разработаны для другой схемы ахроматические склейки 14, которые позаимствованы в целях уменьшения aberrаций АО фильтра. Схема с внесенными в неё элементами изображена на рисунке 10.

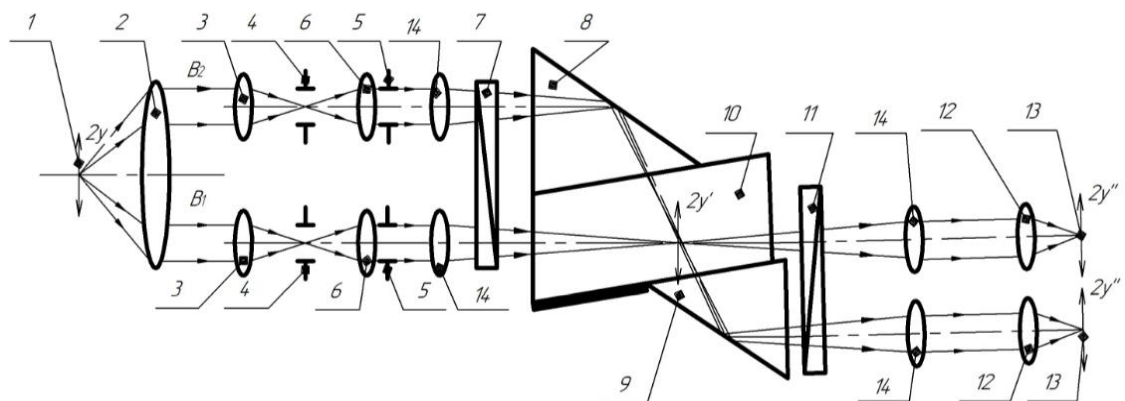


Рисунок 10 – Габаритный расчет оптической системы

Поскольку ахроматические склейки 14 взяты готовыми, их фокусные расстояния известны:

$$f'_{14} = 36 \text{ мм} \quad (2.1)$$

Внутри АО фильтра строится промежуточное изображение $2y' = 8 \text{ мм}$. Апертурная диафрагма 5 установлена в передней фокальной плоскости склейки 14, её диаметр равен:

$$D_{\text{АД}} = 2 \times f'_{14} \times \text{tg} \omega = 2 \times 36 \times \text{tg}(1,5^\circ) = 1,8 \text{ мм} \quad (2.2)$$

Так как известен размер предмета $2y = 5,6 \text{ мм}$, найдём линейное увеличение β_{1-10} , б/р, передающей части канала:

$$\beta_{1-10} = \frac{2y'}{2y} = \frac{8}{5,6} \approx 1,4 \quad (2.3)$$

Передающая часть содержит телескопическую систему (ТС), состоящую из линз 3,6. Угловое увеличение ТС равно $\gamma = 1$ б/р. Зная линейное увеличение, рассчитаем фокусное расстояние входного объектива 2 по формуле:

$$\beta_{1-10} = \gamma \frac{f'_{14}}{f'_2} \quad (2.4)$$

Откуда следует:

$$f'_2 = \gamma \frac{f'_{14}}{\beta_{1-10}} = \frac{36}{1,4} = 25,3 \text{ мм} \quad (2.5)$$

Размер изображения на приёмнике равен $y'' = 3,7$ мм. Предметом объектива 12 является промежуточное изображение в АО фильтре, то есть $y' = 4$ мм. Тогда линейное увеличение β_{10-13} , б/р, приёмной части ОС составит:

$$\beta_{10-13} = \frac{y''}{y'} = \frac{3,7}{4} = 0,9 \quad (2.6)$$

Зная линейное увеличение приёмной системы β_{10-13} , найдём фокусное расстояние линзы 12:

$$f'_{12} = \beta_{10-13} \times f'_{14} = 0,9 \times 36 = 32,4 \text{ мм} \quad (2.7)$$

Линза 3 относится к покупным изделиям, её фокусное расстояние равно $f'_3 = 12$ мм. Так как в плоскости полевой диафрагмы (ПД) формируется

промежуточное изображение, равное диаметру ПД, то линейное увеличение β_{2-3} , б/р, системы из двух первых объективов равно:

$$\beta_{2-3} = \frac{D_{\text{ПД}}}{2y} = \frac{f'_3}{f'_2} = \frac{12}{25,3} \approx 0,5 \quad (2.8)$$

Тогда диаметр полевой диафрагмы равен:

$$D_{\text{ПД}} = \beta_{2-3} \times 2y = 0,5 \times 5,7 = 2,8 \text{ мм} \quad (2.9)$$

Зная размер ПД, найдём фокусное расстояние линзы 6 из формулы:

$$D_{\text{ПД}} = 2y' \frac{f'_6}{f'_{14}} \quad (2.10)$$

Выразим фокусное расстояние линзы 6:

$$f'_6 = \frac{D_{\text{ПД}} \times f'_{14}}{2y'} = \frac{2,8 \times 36}{8} = 12,6 \text{ мм} \quad (2.11)$$

Таким образом, проведен габаритный расчет оптической системы АО спектрометра. Найдены фокусные расстояния всех элементов и диаметры диафрагм.

2.2 Аберрационный расчет ОС

2.2.1 Синтез ахроматического объектива длинного канала

Прежде всего необходимо подобрать входные объективы, они будут одинаковыми для обоих каналов.

Фокусные расстояния общего входного объектива 2 и линзы 3 (рисунок 10) были рассчитаны в предыдущем разделе $f'_2 = 25,3$ мм, $f'_3 = 12$ мм. Данные оптические элементы являются покупными, они были подобраны на сайте Thorlabs. Конструктивные параметры линз представлены в таблице 2.

Таблица 2 – конструктивные параметры входных объективов

Номер объектива	r_1 , мм	r_2 , мм	Диаметр D, мм	Толщина d, мм	Марка стекла
2	24,5	24,5	25,4	9	N-BK7
3	11,7	11,7	9	3,6	N-BK7

Любая оптическая система (ОС) всегда имеет аберрации, поскольку они принципиально неустранимы. Смоделированная в программе «Zemax» ОС спектрометра также имеет различные аберрации. Поскольку наибольший вклад в искажение изображения вносит хроматизм положения, то целесообразно для коррекции аберраций использовать ахромат [11].

Коррекционный объектив, который будет синтезирован, обозначен позицией 12 на рисунке 10. Поскольку длина хода луча в обоих оптических каналах различна, вносимые аберрации также могут отличаться, поэтому коррекционные объективы рассчитываются для каждого канала отдельно. Сначала проведём расчет для длинного канала, обозначенного B_2 на рисунке 10.

Зададим в программе Zemax ахроматическую склейку. Для этого выберем пару стёкол с разными коэффициентами дисперсии ЛФ5/К8, указанными в таблице 3. Такой выбор обусловлен тем, что данные стёкла использовались в ОС ранее для линз 14 (рисунок 10).

Таблица 3 - Значения показателей преломления и коэффициентов дисперсии для выбранных марок оптического стекла

Марка стекла	n	ν
ЛФ5	1,5749	41,2132
К8	1,5163	64,0661

Согласно известным правилам, первая линза (из стекла марки ЛФ5) должна быть положительной, а вторая (из стекла марки К8) отрицательной.

В нашем случае качество ОС будем оценивать по радиусу кружка рассеяния. Поскольку дифракционным пределом размера пятна рассеяния света является диск Эйри, то будем стремиться получить радиус меньше, чем удвоенный размер кружка Эйри. Тогда будем считать удовлетворительным диаметр пятна равный 15-20 мкм.

Также оценим размеры пятен ОС перед добавлением ахромата в систему. Для этого в программе Zemax построим график.

Из графика на рисунке 11 видно, что максимальный радиус пятна в ОС до её коррекции равен 99 мкм.

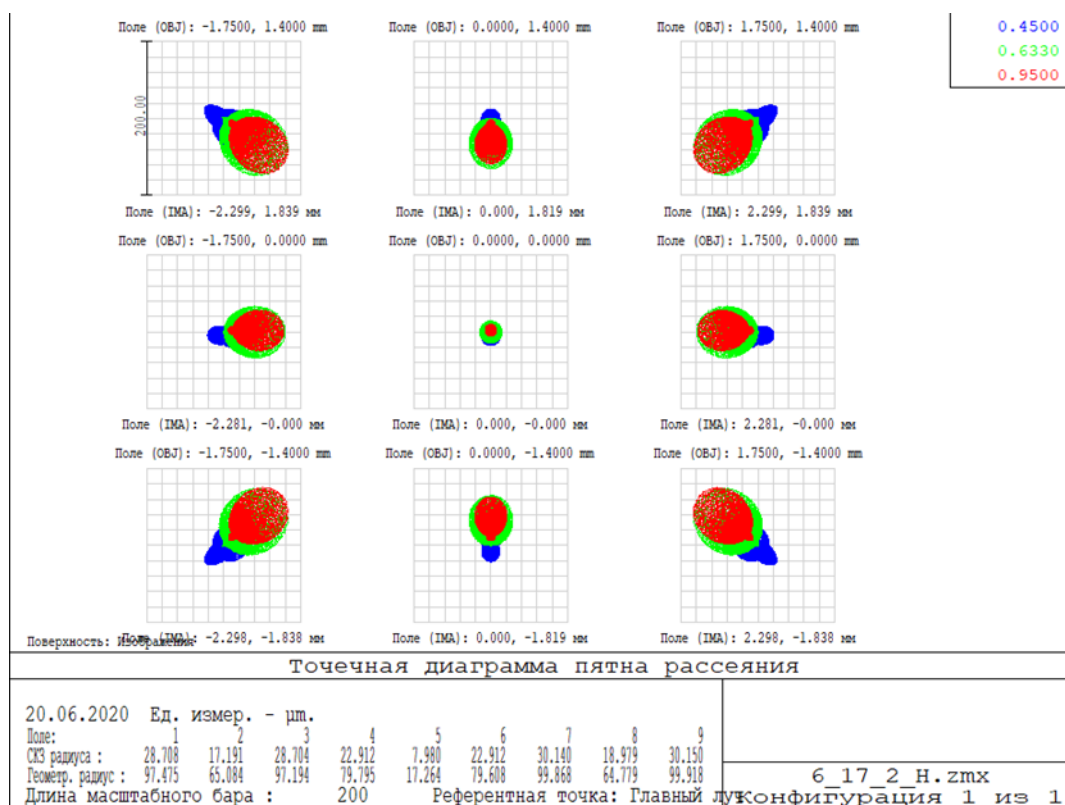


Рисунок 11 – Диаграмма пятна рассеяния в ОС длинного канала до её коррекции

Синтез двухлинзовой конструкции не позволил добиться желаемого результата, в связи с чем было предложено использовать более сложную ахроматическую систему.

За основу была взята двухкомпонентная система, состоящая из пары ахроматических склеек, которые расположены почти вплотную и обращены кронными (положительными) линзами друг к другу. Схема ахроматической пары изображена на рисунке 12.

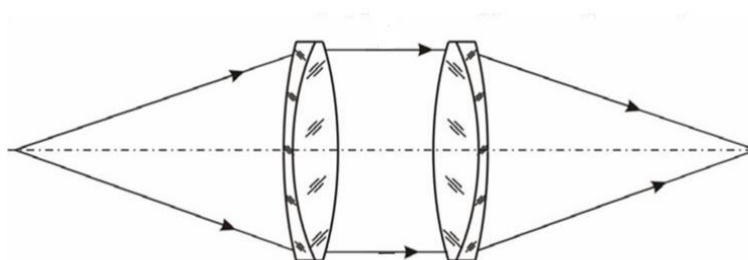


Рисунок 12 - Ахроматическая пара

Для исправления кривизны поля установим вблизи плоскости изображения линзу Пиацци-Смита, которая тоже будет являться частью коррекционного объектива.

Теперь добавим ахроматическую пару и оценим размер пятна. Анализ рисунка 13 показал, что радиусы пятен больше 20 мкм, что говорит о необходимости оптимизации системы.

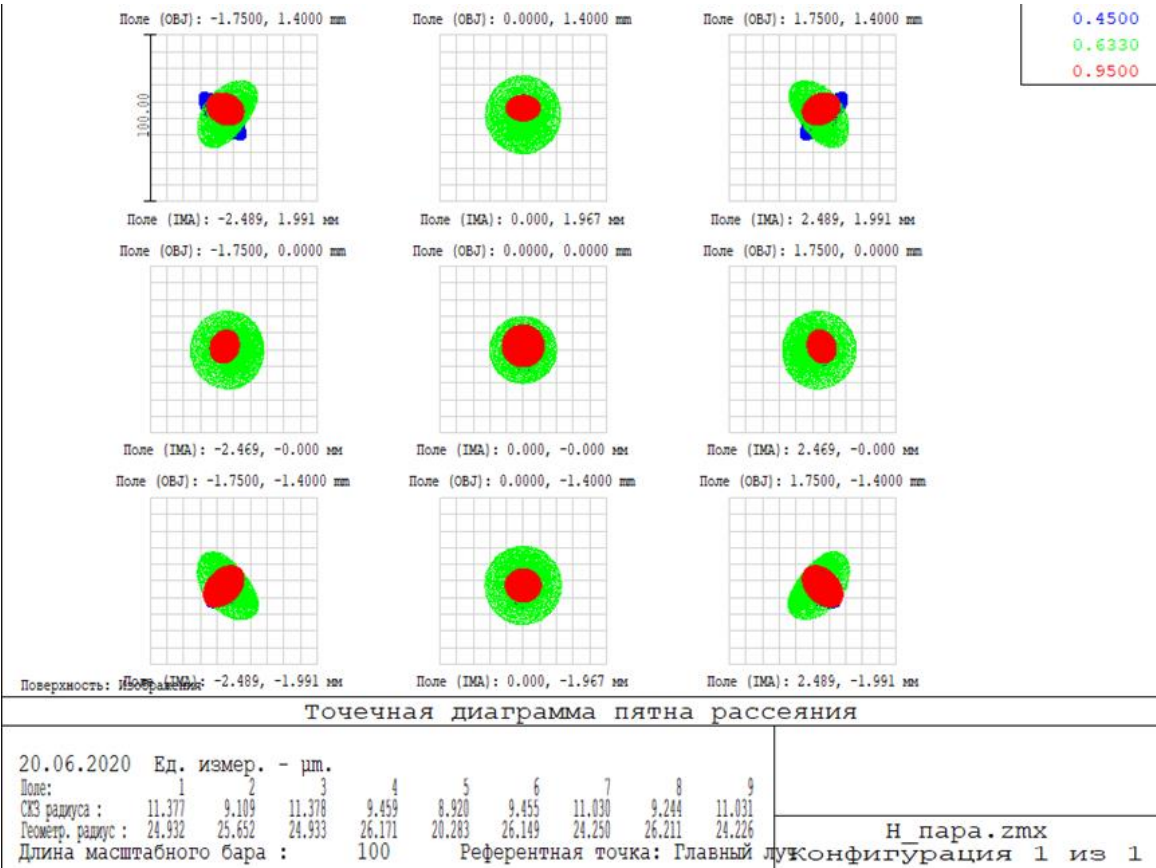


Рисунок 13 - Диаграмма пятна рассеяния в ОС с ахроматической парой

2.2.2 Объектив системы сопряжения

На рисунке 9 часть системы сопряжения обозначена позицией 6. Данный объектив содержит в себе 2 компонента, один из которых является ахроматической склейкой, работающей с бесконечно удаленными предметами. Поскольку в схеме (рисунок 9) предмет находится на конечном расстоянии (в плоскости полевой диафрагмы), необходимо добавить еще один компонент. На рисунке 10 изображена конечная системы сопряжения, которая содержит заимствованную склейку 14 и линзу 6.

Итак, второй компонент системы сопряжения 6 был выбран из готовых ахроматических склеек компании Thorlabs. В таблице 4 приведены его конструктивные параметры.

Таблица 4 - Конструктивные параметры ахроматической склейки системы сопряжения

Номер линзы в склейке	r_1 , мм	r_2 , мм	r_3 , мм	Диаметр D, мм	Толщина d, мм	Марка стекла
1	14, 288	-13, 762	-68, 516	5,5	4	N-LAK10
2		-13, 762	-68, 516	5,5	1	N-SF57

2.2.3 Оптимизация ахроматического объектива длинного канала

В программе Zemax реализуется несколько различных алгоритмов оптимизации: два алгоритма локальной оптимизации и два алгоритма глобальной оптимизации. В данной работе использовался один алгоритм локальной оптимизации – оптимизация методом наименьших квадратов с демпфированием (DLS) и один алгоритм глобальной оптимизации – оптимизация методом “постукивания по системе” (“Hammer” оптимизатор).

Алгоритм DLS эффективен при обнаружении "местного" минимума функции качества. В этом контексте, слово «местный» означает самое малое значение функции качества, которое может быть достигнуто от текущего положения в области решений без какого-либо увеличения функции качества. Проблема этого метода состоит в том, что при достижении местного минимума, нет известного пути (с точки зрения общей проблемы оптимизации), чтобы определить, нет ли лучшего, более низкого минимума где-нибудь еще.

Алгоритм «Hammer» используется для исчерпывающего поиска оптимального решения, как только найдена хорошая отправная точка при помощи предшествующей оптимизации (в данном случае использовался алгоритм DLS).

Для осуществления оптимизации необходимо задать оценочную функцию оптимизационной модели. Она строится на основе ряда функций-ограничений на оптические и габаритные характеристики, а также функций, связанных с показателями качества оптической системы. Основную роль в создании оценочной функции оптимизационной модели выполняют операторы, использующие критерии оценки качества изображения.

Поскольку наибольший вклад в искажение изображения вносят хроматические aberrации, для задания оценочной функции используем операторы LONA для двух крайних длин волн.

Конструктивные параметры системы после многократной оптимизации представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Конструктивные параметры коррекционной системы длинного канала после оптимизации

Радиусы	Толщины	Марка стекла
14,754		
	2,000	БФ21
-8,590		
	5,000	БФ28
5,350		
	2,100	ВОЗДУХ
11,998		
	3,500	ТК16
-5,286		
	1,500	ЛК7
-11,167		
	18,650	ВОЗДУХ
-6,000		
	2,000	БФ12
бесконечность		
	1,000	ВОЗДУХ

В данной таблице представлен лучший вариант оптимизированной системы, качество которой оценивалось по диаграмме пятна рассеяния.

Округлим до ближайших стандартных значений радиусы кривизны в соответствии с ГОСТ 1807-75 [12]. Запишем новые конструктивные параметры коррекционного объектива длинного канала в таблицу 6.

Таблица 6 – Радиусы кривизны поверхностей коррекционной системы длинного канала в соответствии с ГОСТом

Радиусы	Радиусы по ГОСТ	Толщины	Марка стекла
14,754	14,757		
		2,000	БФ21
-8,590	-8,590		
		5,000	БФ28
5,350	5,346		
		2,100	ВОЗДУХ
11,998	11,995		
		3,500	ТК16
-5,286	-5,272		
		1,500	ЛК7
-11,167	-11,169		
		18,650	ВОЗДУХ
-6,000	-5,998		
		2,000	БФ12
бесконечность			
		1,000	ВОЗДУХ

На рисунке 14 приведены диаграммы пятна рассеяния в различных точках поля. Теперь максимальный радиус пятна рассеяния равен 15 мкм, что вполне удовлетворяет заявленным требованиям.

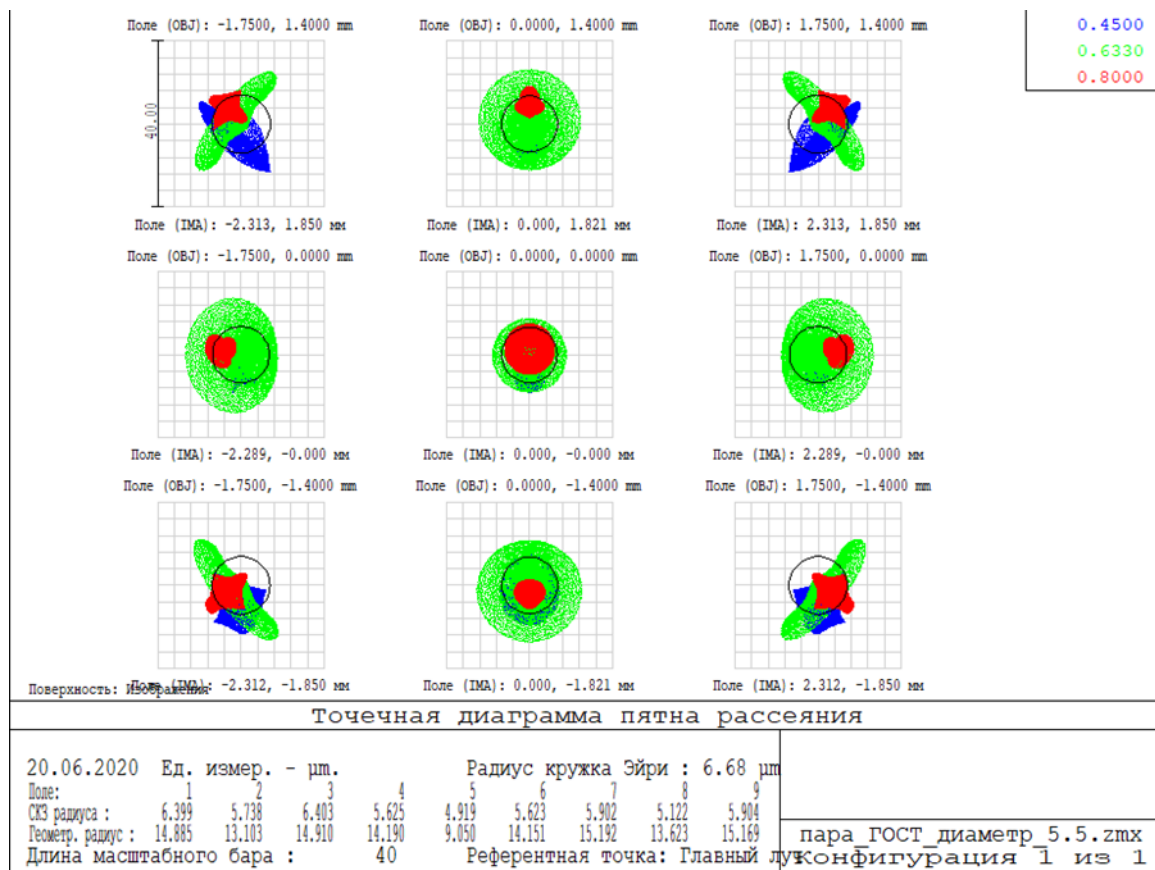


Рисунок 14 - Диаграмма пятна рассеяния в ОС длинного канала после оптимизации

На рисунке 15 представлена МПФ полученной системы.

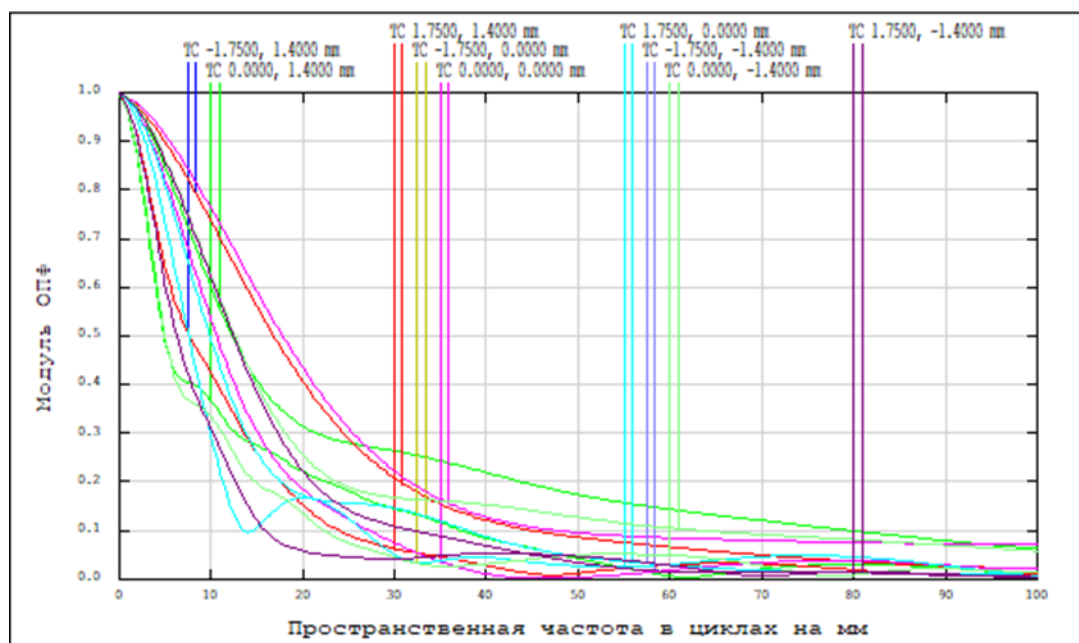


Рисунок 15 – МПФ ОС длинного канала после оптимизации

Хроматизм положения в данной ОС составит 230 мкм, что проиллюстрировано на рисунке 16.

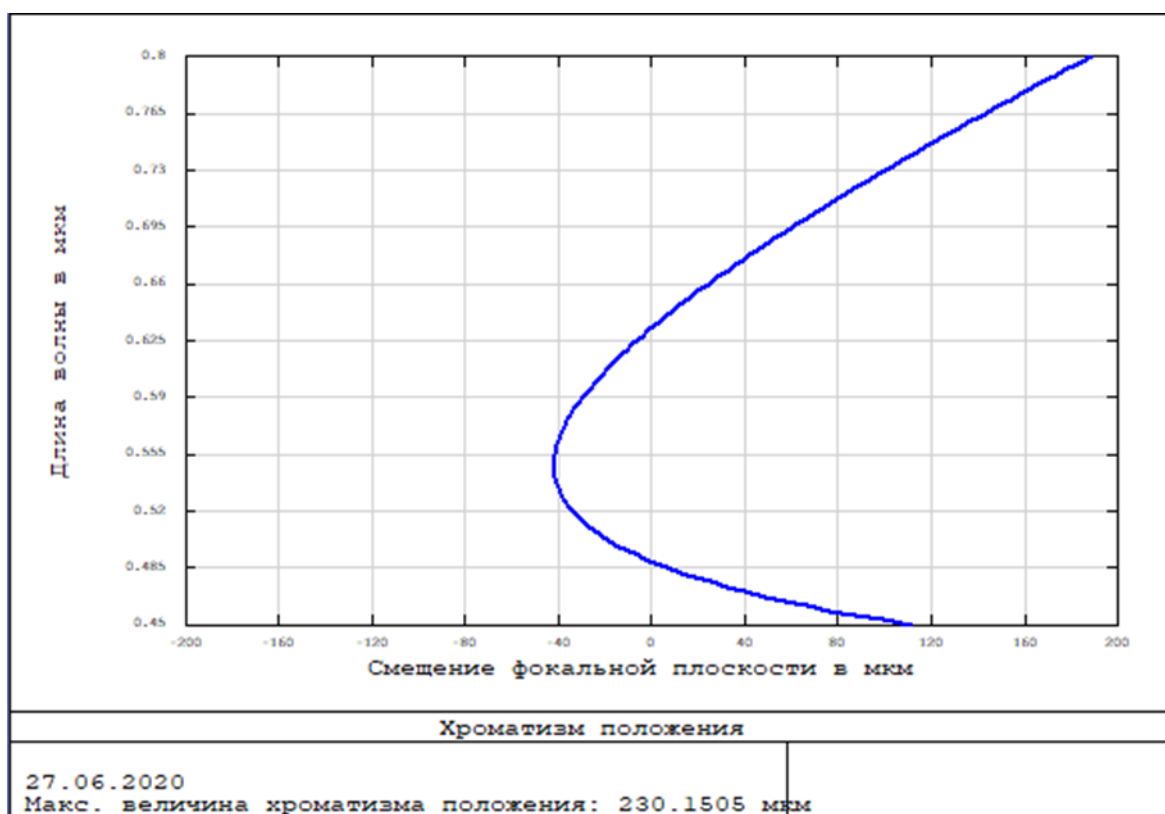


Рисунок 16 - Хроматизм положения ОС длинного канала после оптимизации

2.2.4 Короткий канал

Разработанная система предполагает наличие двух оптических каналов. Параметры одного из них были описаны ранее, рассмотрим второй, обозначенный на рисунке 10 B_1 . Излучение, проходящее через АО ячейку, в данном канале имеет более короткий оптический путь.

Параметры обоих каналов должны быть идентичны. Для получения одинаковых размеров изображений будем оптимизировать систему таким образом, чтобы линейное увеличение второго канала оказалось равным ранее рассчитанному увеличению длинного канала $\beta=1,3$.

Многократная оптимизация системы показала, что использовать громоздкую ахроматическую пару в данном случае нецелесообразно. А для исправления кривизны поля так же установим вблизи плоскости изображения линзу Пиацци-Смита, которая будет являться частью коррекционного объектива.

Конструктивные параметры коррекционной системы после оптимизации представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Конструктивные параметры коррекционной системы короткого канала после оптимизации

Радиусы	Толщины	Марка стекла
13,580		
	3,000	TK13
4,315		
	10,200	TK14
-5,900		
	2,800	TK21
бесконечность		
	7,437	ВОЗДУХ

Продолжение таблицы 7

Радиусы	Толщины	Марка стекла
-4,176		
	2,000	Ф9
бесконечность		
	1,000	ВОЗДУХ

В данной таблице представлен лучший вариант оптимизированной системы, качество которой оценивалось по диаграмме пятна рассеяния.

Округлим до ближайших стандартных значений радиусы кривизны в соответствии с ГОСТ 1807-75 [12]. Запишем новые конструктивные параметры коррекционного объектива длинного канала в таблицу 8.

Таблица 8 - Радиусы кривизны поверхностей коррекционной системы короткого канала в соответствии с ГОСТом

Радиусы	Радиусы по ГОСТ	Толщины	Марка стекла
13,580	13,583		
		3,000	ТК13
4,315	4,325		
		10,200	ТК14
-5,900	-5,943		
		2,800	ТК21
бесконечность	бесконечность		
		7,437	ВОЗДУХ
-4,176	-4,207		
		2,000	Ф9
бесконечность	бесконечность		
		1,000	ВОЗДУХ

В коротком канале также присутствует система сопряжения, но в данном случае подобрать второй компонент из готовых ахроматических склеек не получилось. Поэтому он был рассчитан и оптимизирован. В таблице 9 приведены его конструктивные параметры.

Таблица 9 - Конструктивные параметры ахроматической склейки в коротком канале

Радиусы	Толщины	Марка стекла
37,302		
	4,000	Ф1
4,676		
	5,000	ТК23
-13,675		

Округлим до ближайших стандартных значений радиусы кривизны в соответствии с ГОСТ 1807-75 [12]. Результат представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Радиусы кривизны поверхностей коррекционной системы короткого канала в соответствии с ГОСТом

Радиусы	Радиусы по ГОСТ	Толщины	Марка стекла
37,302	37,330		
		4,000	Ф1
4,676	4,656		
		5,000	ТК23
-13,675	-13,677		

На рисунке 17 представлены диаграммы пятен рассеяния в различных точках поля короткого канала.

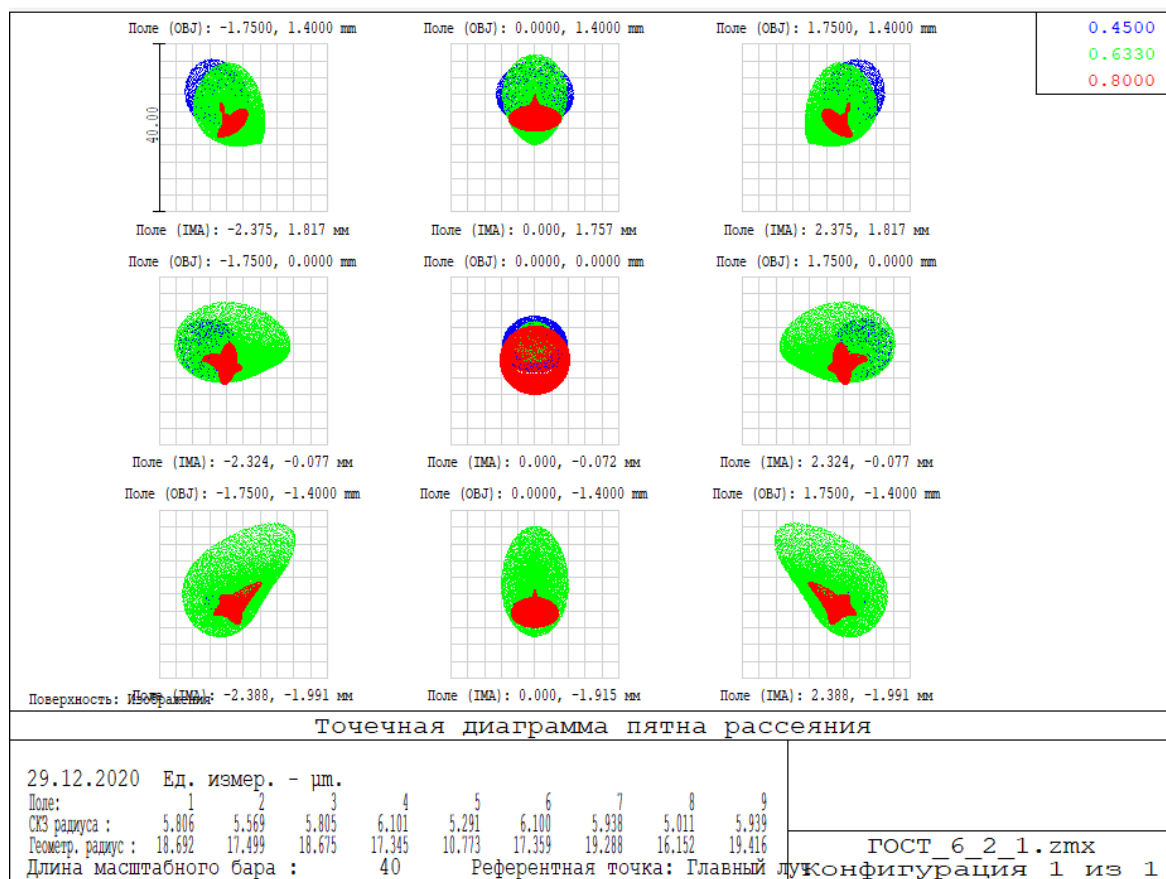


Рисунок 17 - Диаграмма пятен рассеяния в ОС короткого канала

Наибольший интерес представляет aberrация хроматизм положения, изображенная на рисунке 18. В данном случае она составит 293 мкм, что является хорошим результатом.

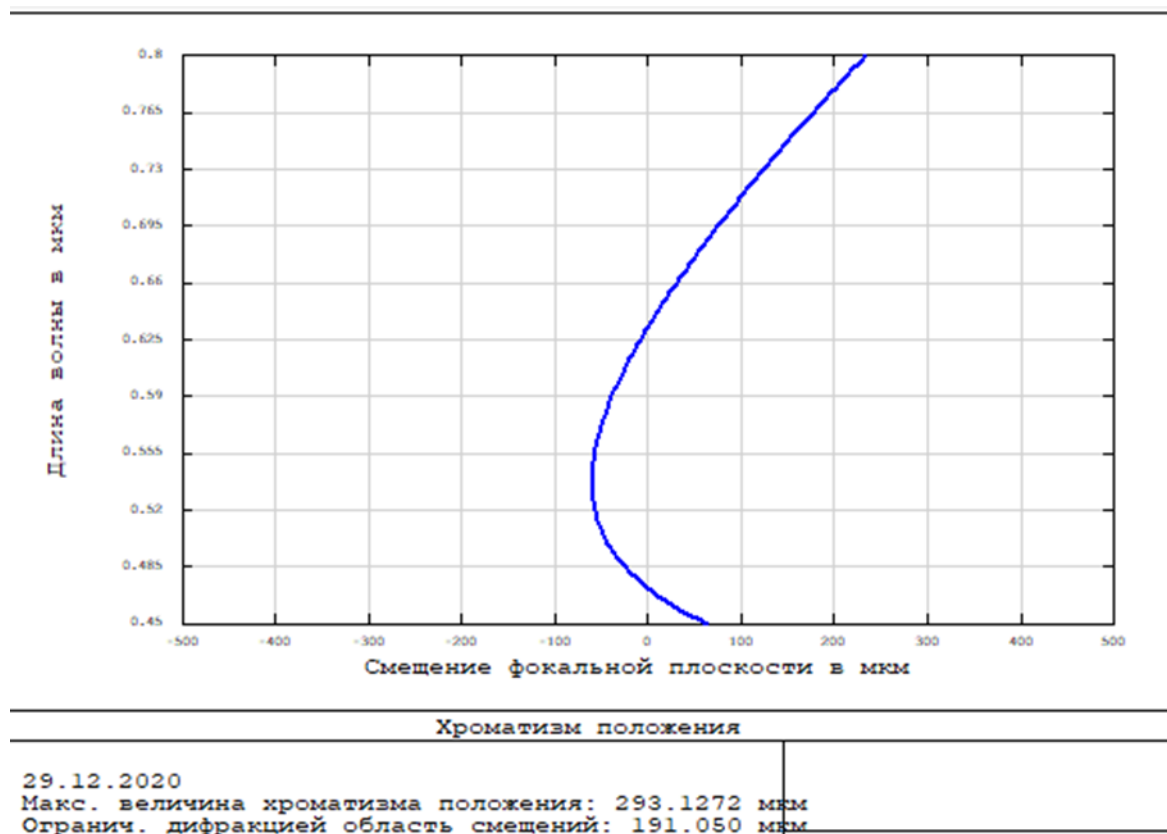


Рисунок 18 - Хроматизм положения в ОС короткого канала

МПФ системы приведен на рисунке 19.

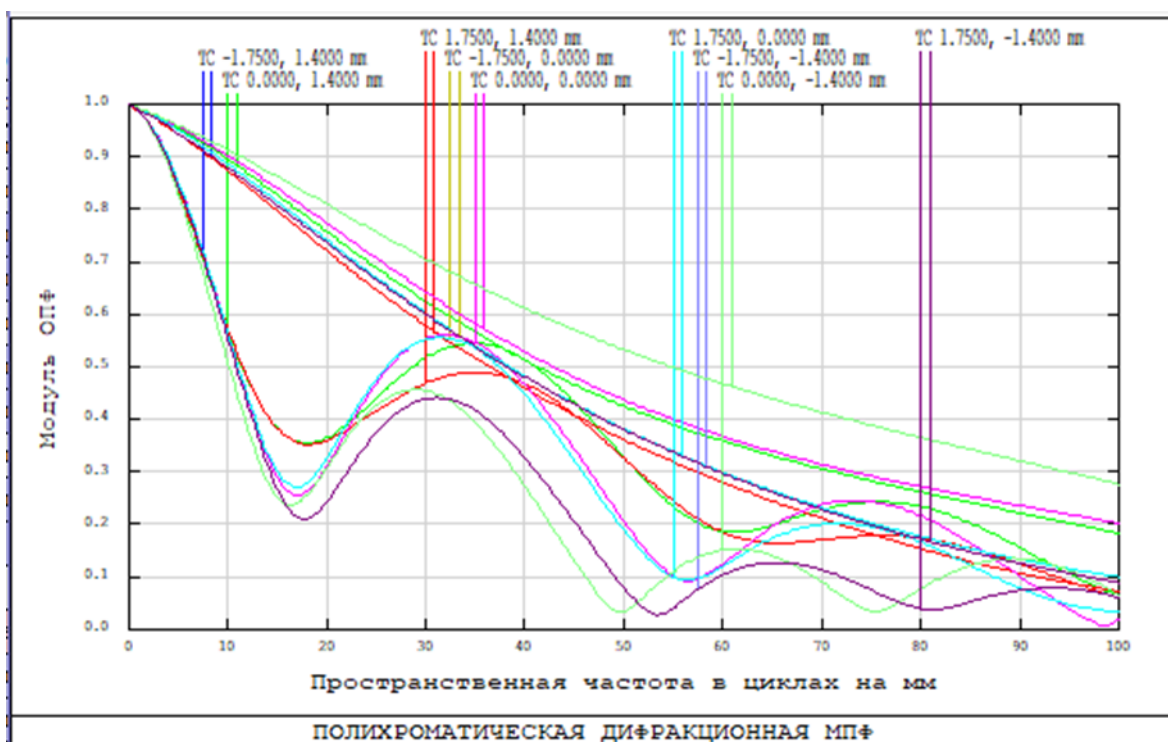


Рисунок 19 - МПФ ОС короткого канала

По результатам абберрационного расчета был разработан выходной объектив, компенсирующий абберрации оптической системы акустооптического спектрометра. Полученный объектив позволяет корректировать хроматическую абберрацию положения и кривизну поля. Наиболее существенный вклад в абберрации системы вносит хроматический сдвиг изображения, поскольку это несимметричная абберрация, её нельзя скомпенсировать в осесимметричной оптической системе.

Среднее квадратичное значение (СКЗ) пятен рассеяния в обоих оптических каналах не превышает 6 мкм, что удовлетворяет поставленным требованиям. Максимальный хроматизм положения для длинного канала составил 230 мкм, для короткого – 293 мкм. Оба этих результата позволяют получить хорошее качество изображения в ОС спектрометра.

2.2.5 Разработка конструкции

На данном этапе разработки прибора был сконструирован экспериментальный макет АО стереоспектрометра. Он собирается на оптическом столе при помощи различных приспособлений для крепления к столу оптических элементов. В отверстие крепежа вставляются специальные стойки, вертикальное положение которых настраивается юстировочными винтами. Далее на стойки устанавливаются держатели оптических элементов, которые также обладают возможностью регулировки. Все элементы, кроме разработанных, покупные, их можно найти на сайтах компаний Thorlabs и Newport.

Для установки АО ячейки с призмами на стойку была разработана конструкция АО фильтра. Это металлический разборный короб небольших размеров, собирается с помощью винтов. Для возможности юстировки оптических элементов внутри предусмотрены прижимные лапки. Стенки корпуса имеют специальные отверстия для беспрепятственного прохождения световых лучей внутрь оптических элементов.

Также были разработаны конструкции объективов для регистрирующих систем обоих каналов, которые устанавливаются на стойки.

Чертежи всех описанных конструкций приведены в приложении А.

3 Технологическая часть

3.1 Анализ чувствительности одного из приёмных каналов оптической системы АО стереоскопического видеоспектрометра

Целью данного раздела ВКР является назначение допусков оптической системы приёмной части длинного канала стереоскопического АО видеоспектрометра.

Анализ чувствительности оптической системы реализуется с помощью программы автоматизированного проектирования Zemax, где ранее данная система была смоделирована. САПР Zemax позволяет провести прямой и обратный расчет допусков, а также их анализ методом Монте-Карло. Для решения задачи необходимо установить зависимости между погрешностями изготовления деталей схемы длинного канала и выбранным критерием качества.

До начала расчетов необходимо выделить интересующие нас компоненты длинного канала, на которые нужно назначить допуски. Для этого задаём оператор допусков, где из списка выбираем те виды допусков, которые хотим проанализировать, устанавливаем их значения и единицы измерения.

Из предложенных программой видов допусков на параметры и положение поверхностей выберем следующие:

- допуск на толщины линз и воздушных промежутков;
- допуск на децентрировку по оси X;
- допуск на децентрировку по оси Y;
- допуск на наклон относительно оси X;
- допуск на наклон относительно оси Y.

Для всех вышеперечисленных допусков установим начальное значение $\pm 0,1$, в качестве единицы измерения выберем миллиметр. В дальнейшем допуски

на отдельные параметры оптической системы можно будет сделать менее или более жесткими. Также необходимо выбрать рабочую длину волны, данный расчет проводился для 0,63 мкм.

После задания всех необходимых значений откроется окно редактора допусков, состоящее из списка операторов для каждой отдельной поверхности с указанием номинальной величины ее параметров и пределов установленного допуска. Рассмотрим описание тех операторов, которые использовались в данном расчете.

Оператор TTHI используется для задания допуска на толщины оптических компонентов и воздушных промежутков. TSDX, TSDY определяют допуск для поверхностей: децентрировка по оси X и Y соответственно. Допуски на наклоны относительно осей X, Y задаются операторами TIRX, TIRY. Также есть оператор, задающий рабочую длину волны, - TWAV.

Установив нужные допуски, можно переходить к одному из видов расчетов: прямому или обратному. Для любого из них необходимо выбрать критерий качества системы: в данной работе использовалось среднеквадратичное значение (СКЗ) радиуса пятна рассеяния.

Прямой расчет представляет собой исследование чувствительности критерия качества на величину каждого допуска. Компоненты по очереди смещаются на максимальное значение в пределах допуска, после чего анализируется СКЗ радиуса пятна рассеяния для текущего состояния системы. Недостаток такого расчета состоит в том, что невозможно одновременно двигать все компоненты, то есть, вся система будет находится в номинальном положении, кроме одного смещенного элемента. В результате программа автоматически выдает значения допусков с соответствующими им значениями критерия качества системы, таким образом, можно выявить наиболее сильно влияющие допуски и изменить их на более жесткие.

Отправной точкой для обратного расчета служит максимально допустимое значение критерия качества системы, определяемое техническим заданием. Компоненты поочередно смещаются в пределах заданного допуска, расчет останавливается в двух случаях: СКЗ радиуса пятна рассеяния достигло максимума или система дошла до предела назначенного допуска. Недостатком расчета так же является то, что все компоненты, кроме текущего, находятся в номинальном положении. В результате программа автоматически выдаёт величины допусков, которые в отдельности обеспечивают заданное СКЗ радиуса пятна рассеяния. Таким образом, можно проследить влияние каждого отдельного допуска на критерий качества системы, в соответствии с этим сделать их менее жесткими.

Прямой и обратный расчет могут проводиться независимо друг от друга или последовательно для уточнения полученных значений допусков. В данной работе проводился только обратный расчет, критическое значение выбранного критерия качества устанавливалось в соответствии с требованиями к изображению оптической системы. Максимальное СКЗ радиуса пятна рассеяния составило 8 мкм.

После назначения и расчета допусков переходим к анализу оптической системы методом Монте-Карло. Данный режим позволяет смещать все компоненты одновременно на случайные значения в пределах установленных ранее допусков. Для реализации метода необходимо указать количество анализируемых систем: чем больше выборка, тем точнее результат. В этой работе было рассчитано 2000 случайно генерируемых схем. В итоге программа выдаёт список систем, для каждой из которых указано СКЗ радиуса пятна рассеяния и величина отклонения критерия качества от значения в исходной системе. Также Zemax определяет процентное соотношение сгенерированных схем по полученной величине критерия качества. Будем считать удовлетворительным количество систем – 90%, для которых СКЗ радиуса пятна рассеяния не должно превышать 8 мкм. Программа предлагает записать каждую

из схем в отдельный файл, что позволяет тщательно изучить процесс влияния допусков на критерий качества системы. Кроме того, можно произвести запись только лучшей и худшей из сгенерированных случайным образом схем.

В результате анализа оптической системы методом Монте-Карло количество систем с допустимым значением критерия качества может оказаться неудовлетворительным, например, их будет меньше 90%. Тогда весь процесс становится итерационным, необходимо вернуться на предыдущий этап прямого или обратного расчета, чтобы сузить или расширить диапазоны значений допусков, а затем повторить анализ методом Монте-Карло.

Первичный анализ методом Монте-Карло показал недостаточное количество систем, удовлетворяющих заданному критерию качества, поэтому обратный расчет допусков был проведен несколько раз и ниже будет представлен конечный результат.

Для понимания нумерации поверхностей на рисунке 20 представлена заданная в программе Zemax часть системы, для которой проводился расчет допусков и их дальнейший анализ.

Тип поверхности	Комментарий	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
11	Разрыв ко..		22.500	-	0.000
12	Стандартная	40.550	6.000	K8	4.796
13	Стандартная	-10.000	4.000	LF5	4.663
14	Стандартная	-26.550	27.400		4.618
15*	Стандартная	14.757	2.000	BF21 S	4.000
16*	Стандартная	-8.590	5.000	BF28 S	4.000
17*	Стандартная	5.346	2.100		4.000
18*	Стандартная	11.995	3.500	TK16 S	4.000
19*	Стандартная	-5.272	1.500	LK7 S	4.000
20*	Стандартная	-11.169	18.650 V		4.000
21	Стандартная	-5.998	2.000	BF12 S	2.366
22	Стандартная	бесконечность	1.000		2.733
IMA	Стандартная	бесконечность	-		2.976

Рисунок 20 - Конструктивные параметры оптической системы длинного канала

Итоговый результат расчета допусков приведен на рисунках 21, 22. Первый столбец – номер оператора, второй состоит из названий описанных ранее

операторов, третий и четвертый – номера исследуемых поверхностей (рисунок 20). Шестой столбец содержит номинальные размеры, при этом для децентрировок и наклонов это значение будет равно нулю, поскольку считается, что в исходном положении все поверхности идеальны. Если в этом столбце указаны цифры, отличные от нуля, то они определяют толщину оптического компонента или воздушного промежутка. Седьмой и восьмой - содержат минимальную и максимальную величину рассчитанного допуска соответственно.

Опер. #	Тип	Поверхн	-	-	Номинал	Мин	Макс
13: TTHI	TTHI	11	14	-	22.500	-0.200	0.200
14: TTHI	TTHI	12	14	-	6.000	-0.200	0.200
15: TTHI	TTHI	13	14	-	4.000	-0.200	0.200
16: TTHI	TTHI	14	17	-	27.400	-0.100	0.100
17: TTHI	TTHI	15	17	-	2.000	-0.050	0.050
18: TTHI	TTHI	16	17	-	5.000	-0.050	0.050
19: TTHI	TTHI	17	20	-	2.100	-0.050	0.050
20: TTHI	TTHI	18	20	-	3.500	-0.100	0.100
21: TTHI	TTHI	19	20	-	1.500	-0.100	0.100
22: TTHI	TTHI	20	22	-	18.650	-0.100	0.100
23: TTHI	TTHI	21	22	-	2.000	-0.100	0.100
24: TTHI	TTHI	22	23	-	1.000	-0.100	0.100
25: TSDX	TSDX	12	-	-	0.000	-0.050	0.050
26: TSDY	TSDY	12	-	-	0.000	-0.050	0.050
27: TIRX	TIRX	12	-	-	0.000	-0.050	0.050
28: TIRY	TIRY	12	-	-	0.000	-0.050	0.050
29: TSDX	TSDX	13	-	-	0.000	-0.100	0.100
30: TSDY	TSDY	13	-	-	0.000	-0.100	0.100
31: TIRX	TIRX	13	-	-	0.000	-0.100	0.100
32: TIRY	TIRY	13	-	-	0.000	-0.100	0.100
33: TSDX	TSDX	14	-	-	0.000	-0.050	0.050
34: TSDY	TSDY	14	-	-	0.000	-0.050	0.050
35: TIRX	TIRX	14	-	-	0.000	-0.050	0.050
36: TIRY	TIRY	14	-	-	0.000	-0.050	0.050
37: TSDX	TSDX	15	-	-	0.000	-0.025	0.025
38: TSDY	TSDY	15	-	-	0.000	-0.025	0.025
39: TIRX	TIRX	15	-	-	0.000	-0.025	0.025
40: TIRY	TIRY	15	-	-	0.000	-0.025	0.025

Рисунок 21 - Допуски на положение поверхностей оптических элементов и толщины

Опер. #	Тип	Поверхн	-	-	Номинал	Мин	Макс
41: TSDX	TSDX	16	-	-	0.000	-0.050	0.050
42: TSDY	TS DY	16	-	-	0.000	-0.050	0.050
43: TIRX	TIRX	16	-	-	0.000	-0.050	0.050
44: TIRY	TIRY	16	-	-	0.000	-0.050	0.050
45: TSDX	TSDX	17	-	-	0.000	-0.020	0.020
46: TSDY	TS DY	17	-	-	0.000	-0.020	0.020
47: TIRX	TIRX	17	-	-	0.000	-0.020	0.020
48: TIRY	TIRY	17	-	-	0.000	-0.020	0.020
49: TSDX	TSDX	18	-	-	0.000	-0.030	0.030
50: TSDY	TS DY	18	-	-	0.000	-0.030	0.030
51: TIRX	TIRX	18	-	-	0.000	-0.030	0.030
52: TIRY	TIRY	18	-	-	0.000	-0.030	0.030
53: TSDX	TSDX	19	-	-	0.000	-0.030	0.030
54: TSDY	TS DY	19	-	-	0.000	-0.030	0.030
55: TIRX	TIRX	19	-	-	0.000	-0.030	0.030
56: TIRY	TIRY	19	-	-	0.000	-0.030	0.030
57: TSDX	TSDX	20	-	-	0.000	-0.025	0.025
58: TSDY	TS DY	20	-	-	0.000	-0.025	0.025
59: TIRX	TIRX	20	-	-	0.000	-0.025	0.025
60: TIRY	TIRY	20	-	-	0.000	-0.025	0.025
61: TSDX	TSDX	21	-	-	0.000	-0.150	0.150
62: TSDY	TS DY	21	-	-	0.000	-0.150	0.150
63: TIRX	TIRX	21	-	-	0.000	-0.150	0.150
64: TIRY	TIRY	21	-	-	0.000	-0.150	0.150
65: TSDX	TSDX	22	-	-	0.000	-0.150	0.150
66: TSDY	TS DY	22	-	-	0.000	-0.150	0.150
67: TIRX	TIRX	22	-	-	0.000	-0.150	0.150
68: TIRY	TIRY	22	-	-	0.000	-0.150	0.150

Рисунок 22 – Продолжение рисунка 21

В процессе анализа рассчитанных допусков методом Монте-Карло было сгенерировано 2000 случайных систем, результаты выглядят следующим образом:

- в 98% систем СКЗ радиуса пятна рассеяния не превышает 10 мкм;
- в 90% систем СКЗ радиуса пятна рассеяния не превышает 8 мкм;
- в 80% систем СКЗ радиуса пятна рассеяния не превышает 7 мкм;
- в 50% систем СКЗ радиуса пятна рассеяния не превышает 6 мкм;
- в 20% систем СКЗ радиуса пятна рассеяния не превышает 5,5 мкм;
- в 10% систем СКЗ радиуса пятна рассеяния не превышает 5 мкм;
- в 2% систем СКЗ радиуса пятна рассеяния не превышает 4,7 мкм.

Поскольку критическим СКЗ радиуса пятна рассеяния было 8 мкм, а количество систем с таким критерием качества должно было быть не меньше 90%, что соответствует проведенному анализу, установленные допуски удовлетворяют заявленным требованиям.

Из результатов анализа видно, что всего два процента сгенерированных схем имеют критерий качества хуже 10 мкм, среди этих систем находится худшая, которую необходимо вывести в отдельный файл. Диаграмма пятна рассеяния для трёх полей этой системы представлена на рисунке 23.

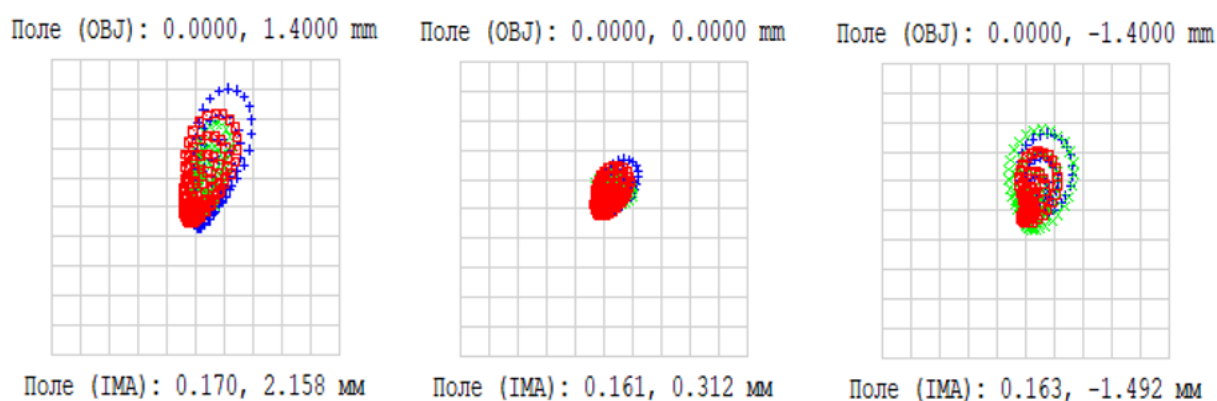


Рисунок 23 - Диаграмма пятна рассеяния худшей системы, полученной методом Монте-Карло

СКЗ пятен рассеяния для представленных полей равны 26,4 мкм, 14,3 мкм, 19, 3 мкм в соответствии с их порядком на рисунке 23.

Так как для оптической системы АО стереоскопического видеоспектрометра одним из важнейших показателей качества является величина хроматизма положения, проанализируем его для худшей системы из выборки. На рисунке 24 представлен график хроматизма положения, из которого видно, что его максимальная величина составляет 266 мкм.

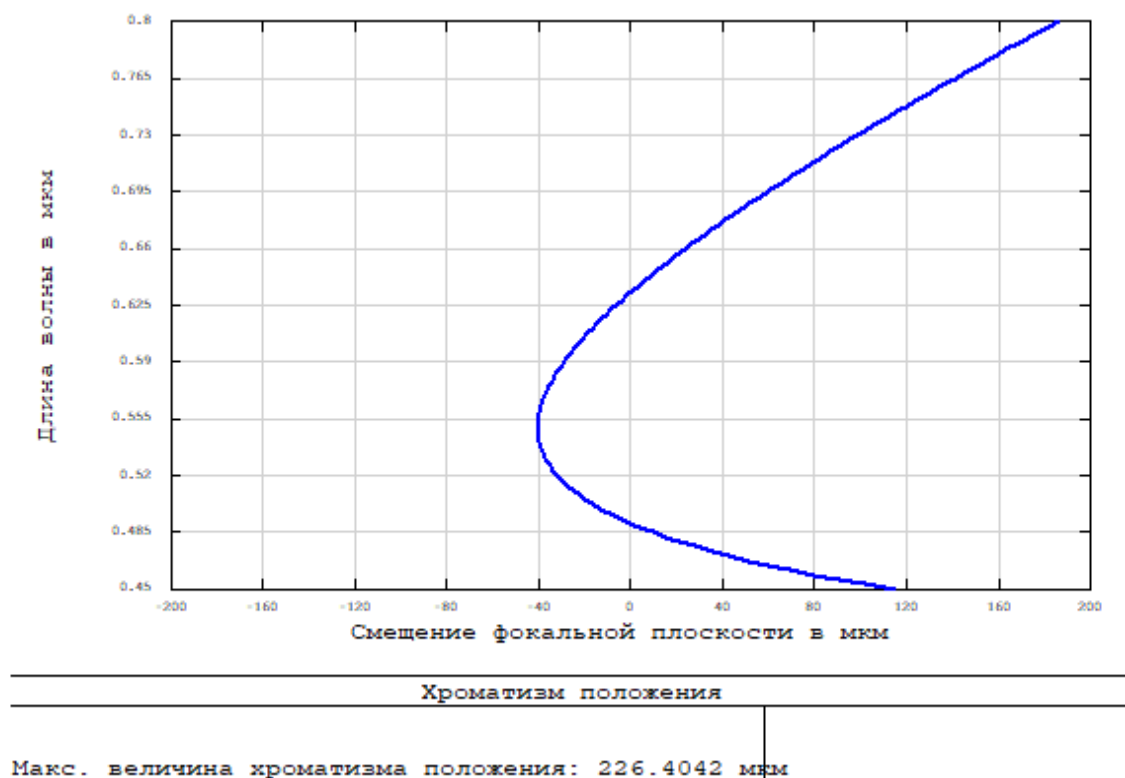


Рисунок 24 - Хроматизм положения худшей системы, полученной методом Монте-Карло

Выводы: при помощи САПР Zemax был проведен обратный расчет допусков для оптической системы приёмного канала стереоскопического АО видеоспектрометра, результаты приведены на рисунках 21, 22. Также для рассчитанных значений программно был реализован анализ системы методом Монте-Карло, который показал, что 90% случайно сгенерированных оптических схем удовлетворяют требуемому критерию качества. Для оценки влияния критического положения компонентов на параметры системы была проанализирована худшая система. СКЗ пятен рассеяния превышают допустимые значения, но поскольку таких систем всего 2%, этим можно пренебречь. Величина хроматизма положения составляет 266 мкм, что является очень хорошим результатом. Следовательно, установленные допуски удовлетворяют требуемому качеству оптической системы.

3.2 Сборка АО фильтра

Целью данного раздела является разработка методики сборки АО фильтра, который включает в себя три оптических компонента: АО ячейку и две призмы.

Разработанная конструкция рисунке 25 представляет собой металлический короб, состоящий из нескольких элементов: корпус, две стенки, крышка. В обеих стенках имеются отверстия для беспрепятственного прохождения световых лучей. Внутри конструкции поочередно помещают все оптические компоненты АО фильтра. Для соблюдения правильного порядка установки этих элементов была разработана методика сборки.

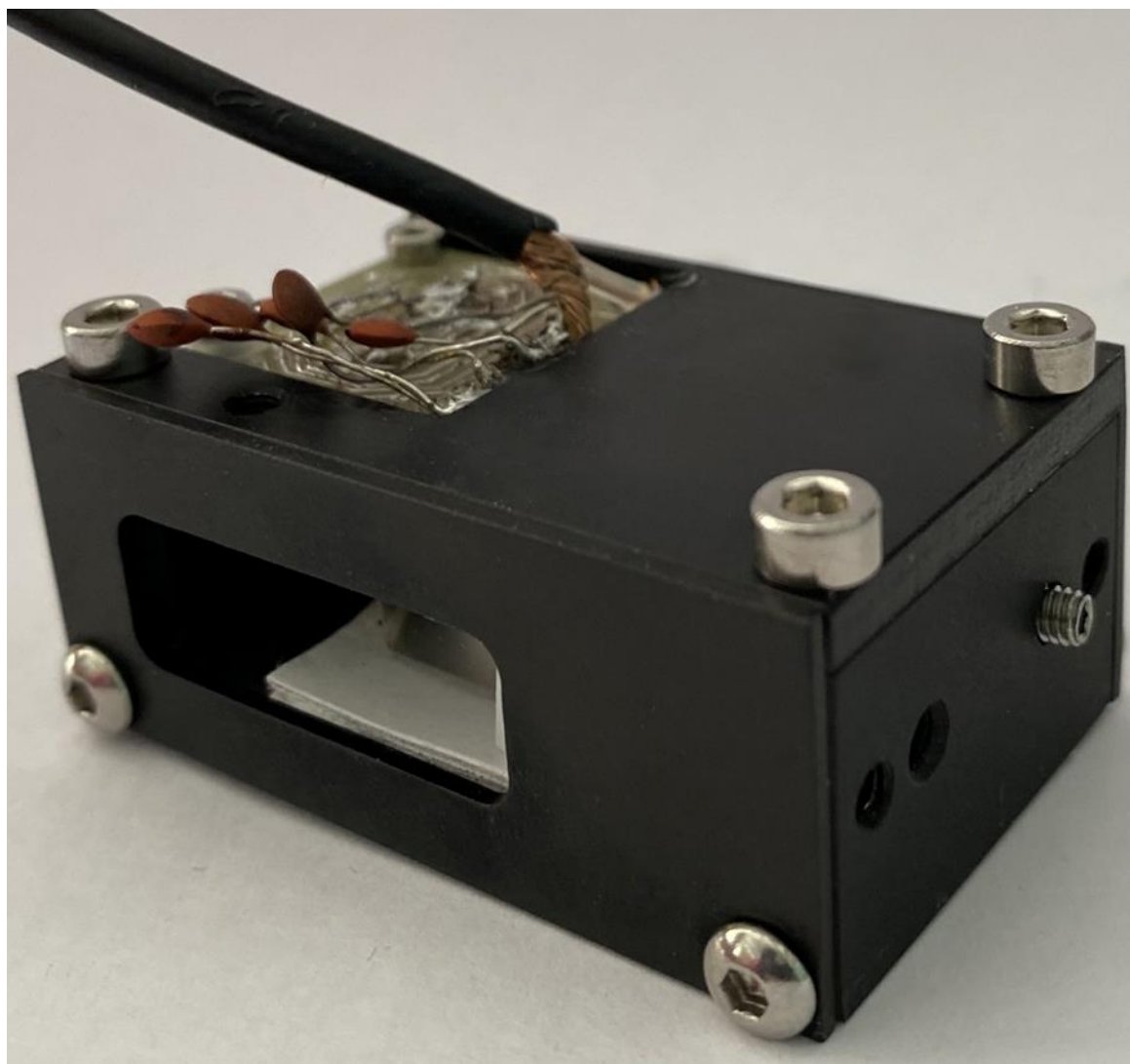


Рисунок 25 – Металлический короб

Конструкция имеет небольшие размеры 50х30 мм, что наглядно проиллюстрировано на рисунках 26, 27. Устройство оснащено подвижными элементами – прижимными лапками, с помощью которых производится юстировка АО фильтра. В крышке корпуса есть отверстие под плату управления пьезоэлементом, она закрепляется винтами.

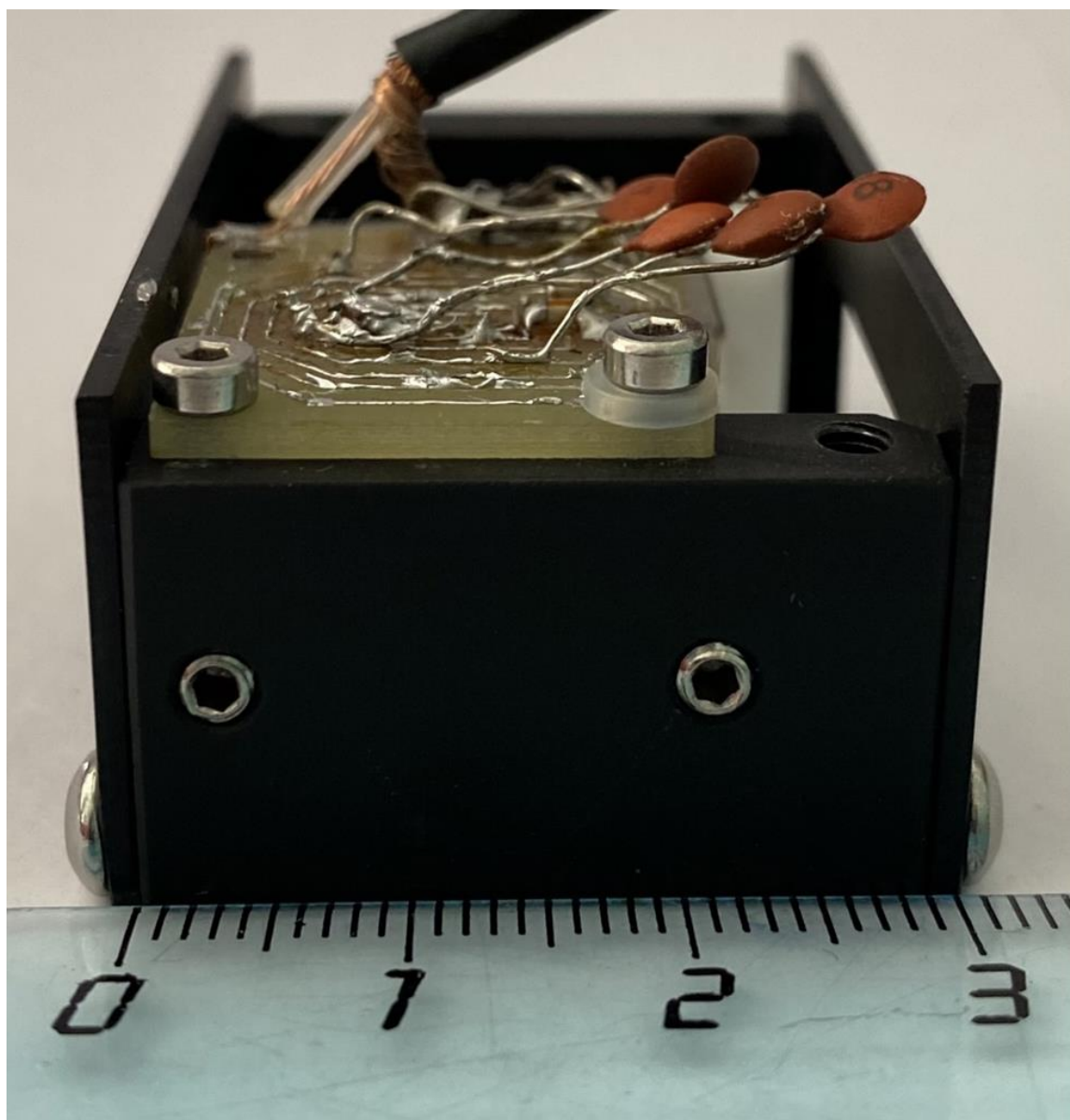


Рисунок 26 - Вид сбоку АО фильтра

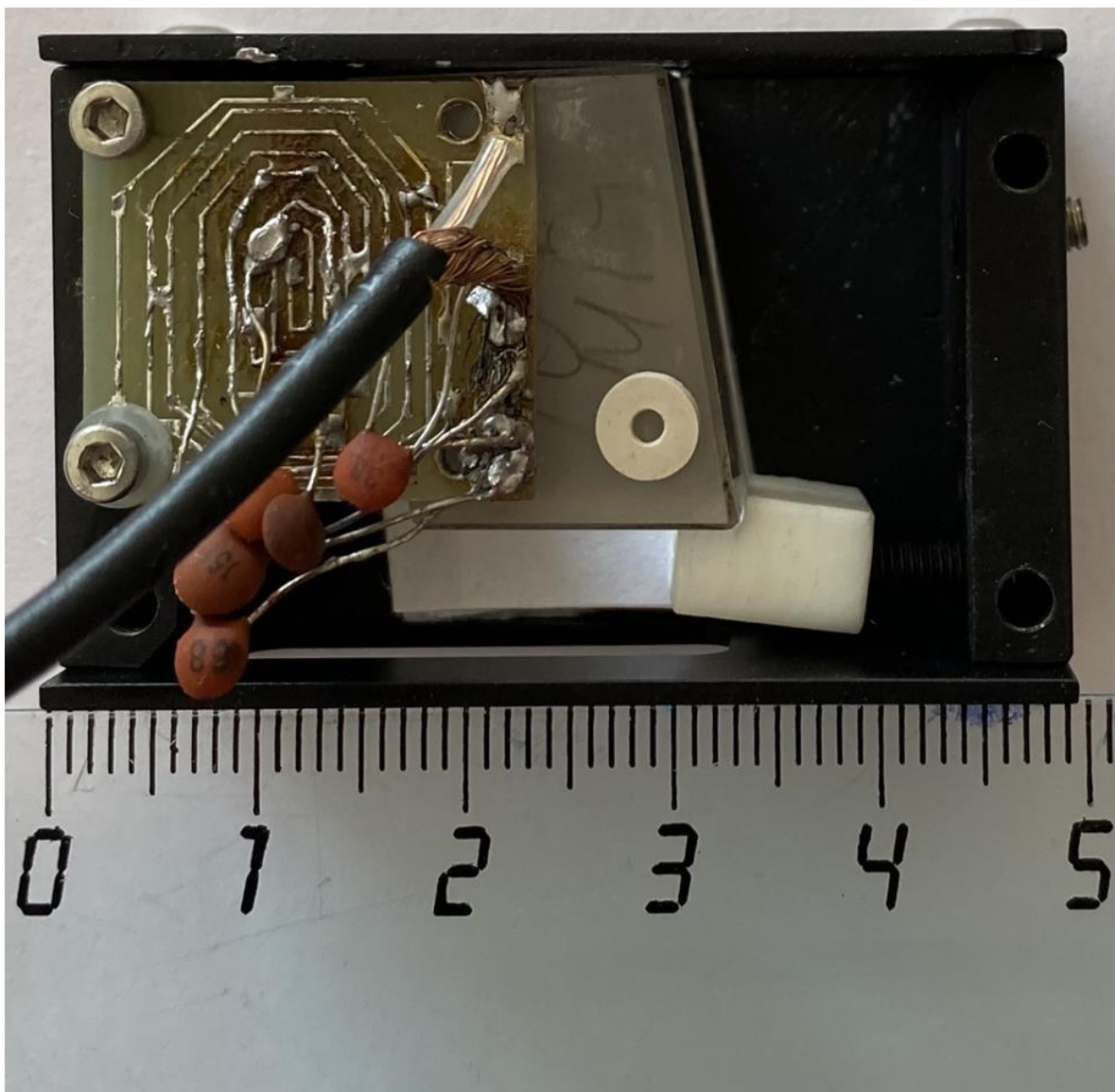


Рисунок 27 - Вид сверху АО фильтра

Сборка АО фильтра состоит из трёх этапов, каждый из них подробно опишем и проиллюстрируем ниже.

1) На рисунке 28 представлен эскиз АО фильтра с указанными позициями.

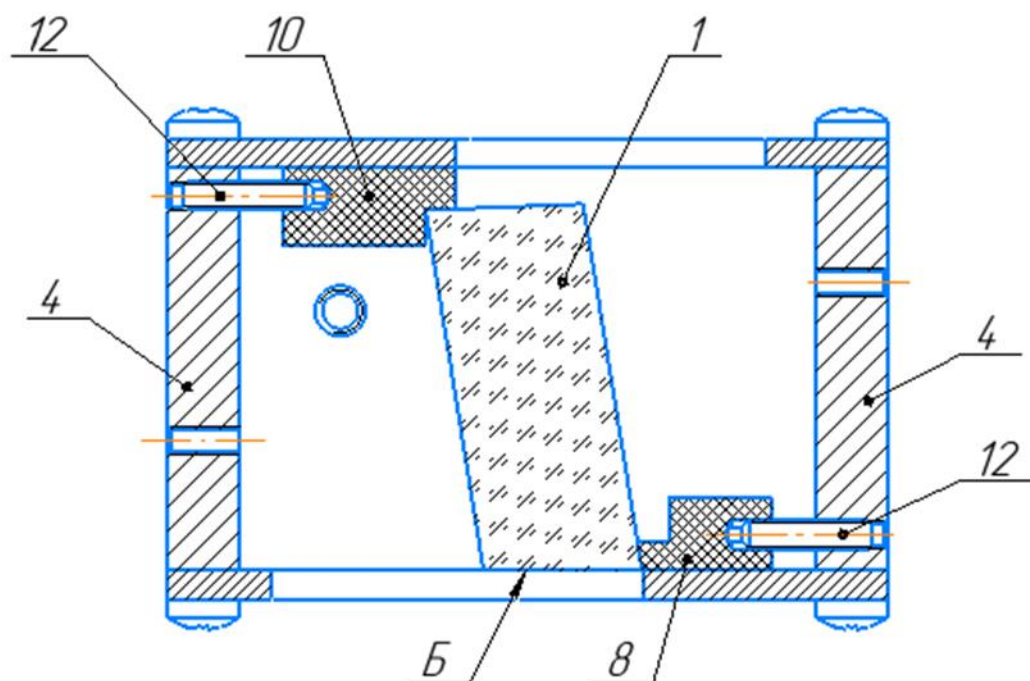


Рисунок 28 - Эскиз первого этапа сборки АО фильтра

1. Установить АО ячейку поз. 1 внутрь корпуса поз. 4.
2. Вкрутить установочные винты поз. 12 в корпус поз. 4 и установить прижимные лапки поз. 8,10.
3. С помощью винтов поз. 12 прижать АО ячейку поз. 1 прижимными лапками поз. 8,10 до её контакта с плоскостью Б. Зазор между плоскостью Б и входной гранью АО ячейки поз. 1 недопустим.

Рисунок 29 представляет собой реализацию первого этапа сборки.



Рисунок 29 - Реализация первого этапа сборки АО фильтра

2) На рисунке 30 представлен эскиз АО фильтра с указанными позициями.

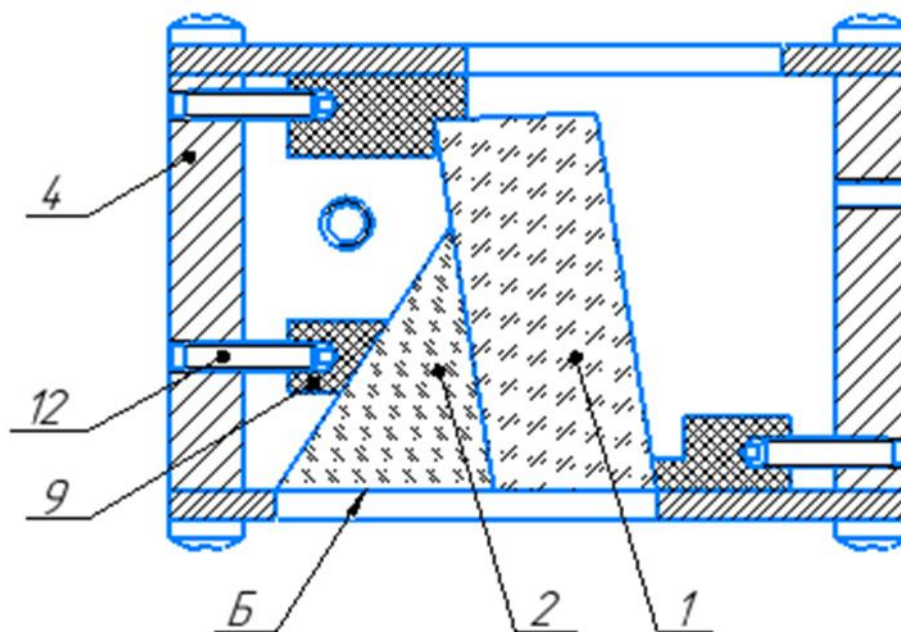


Рисунок 30 - Эскиз второго этапа сборки АО фильтра

1. Установить призму поз. 2 внутрь корпуса поз. 4.
2. Вкрутить установочный винт поз. 12 в корпус поз. 4 и установить прижимную лапку поз. 9.
3. С помощью винта поз. 12 прижать призму поз. 2 прижимной лапкой поз. 9 к АО ячейке поз. 1, зазор между призмой поз. 2 и АО ячейкой поз. 1 недопустим. Призма поз. 2 должна контактировать с плоскостью Б, зазор недопустим.
4. Пережатие призмы поз. 2 и АО ячейки поз. 1 недопустимо. Зазор между плоскостью Б и входной гранью АО ячейки поз. 1 недопустим.

Рисунок 31 представляет собой реализацию второго этапа сборки.

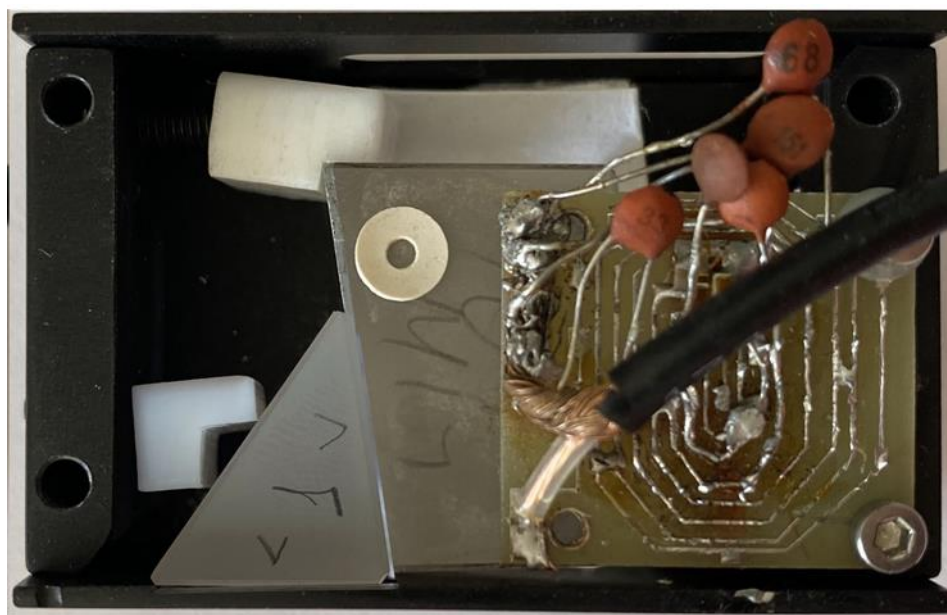


Рисунок 31 - Реализация второго этапа сборки АО фильтра

3) На рисунке 32 представлен эскиз АО фильтра с указанными позициями.

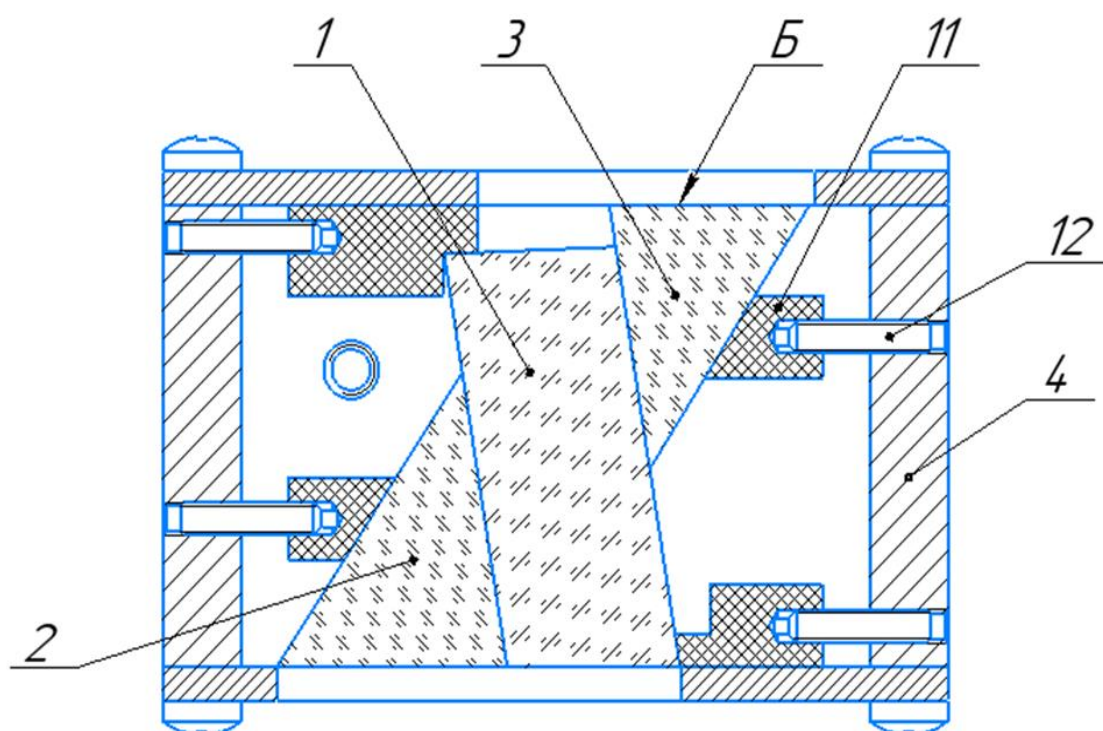


Рисунок 32 - Эскиз третьего этапа сборки АО фильтра

1. Установить призму поз. 3 внутрь корпуса поз. 4.
2. Вкрутить установочный винт поз. 12 в корпус поз. 4 и установить прижимную лапку поз. 11.
3. С помощью винта поз. 12 прижать призму поз. 3 прижимной лапкой поз. 11 к АО ячейке поз. 1, зазор между призмой поз. 3 и АО ячейкой поз. 1 недопустим. Призма поз. 3 должна контактировать с плоскостью Б, зазор недопустим.
4. Пережатие призмы поз. 3 и АО ячейки поз. 1 недопустимо. Зазор между плоскостью Б и входной гранью АО ячейки поз. 1 недопустим.
5. Смещение и наклон АО ячейки поз. 1 и призмы поз. 2 недопустимы.

Рисунок 33 представляет собой реализацию третьего этапа сборки.

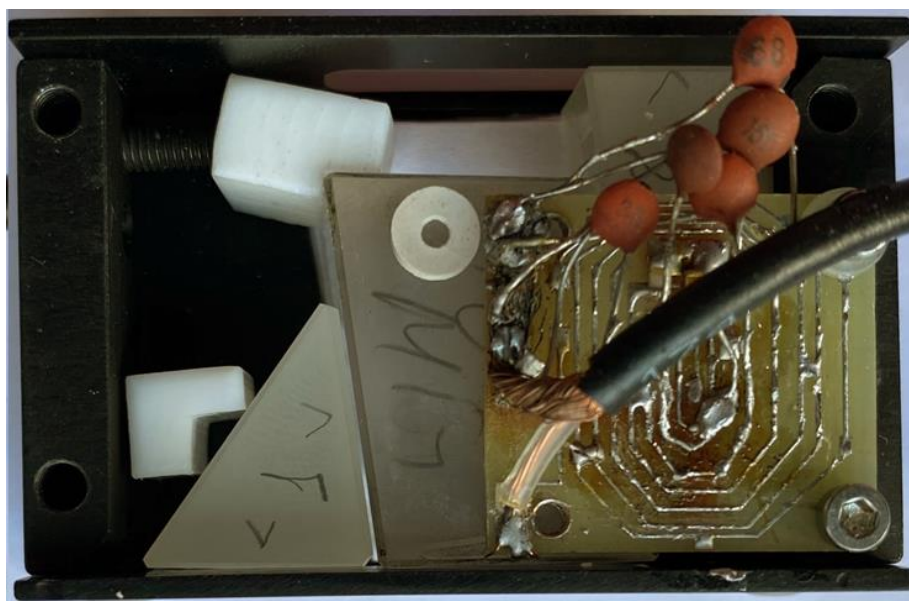


Рисунок 33 - Реализация третьего этапа сборки АО фильтра

Выводы: в данном разделе была рассмотрена конструкция АО фильтра с описанием её основных технических решений. Также была разработана методика сборки устройства, состоящая из трёх этапов. Подобный металлический корпус несложно сконструировать и изготовить, что является достоинством конструкции, а наличие подвижных элементов позволяет обойтись без дополнительной юстировочной аппаратуры.

4 Организационно – экономическая часть

Объектом изучения экономической части является научно-исследовательская работа (НИР) по разработке акустооптического (АО) стереоскопического видеоспектрометра, включающая в себя изготовление и испытание опытного образца.

Предметом выступает разработка новой конструкции прибора, сформированная на основных физических идеях устройства-предшественника.

Цель данного раздела ВКР – обоснование экономической эффективности и целесообразности проведения НИРа, определение необходимого на его реализацию времени и расчет общей суммы затрат на производство.

4.1 Обоснование экономической эффективности

Проектируемый АО стереоскопический видеоспектрометр характеризуется определенными функциональными, эксплуатационными и конструкторскими параметрами, которые будут использованы для оценки экономической эффективности.

Исследуемые параметры:

1. Спектральное разрешение
2. Пространственное разрешение
3. Глубина резко изображаемого пространства
4. Спектральный диапазон
5. Светосила
6. Линейное поле зрения
7. Линейное увеличение
8. Виброустойчивость

9. Масса

10. Габариты

У проектируемого прибора существует всего один аналог, обладающий значительными недостатками в сравнении с данной разработкой. Устройство-предшественник основан на тех же физических принципах, что и новый прибор, но имеет другую оптическую схему. Главная отличительная особенность разрабатываемого устройства – наличие одной АО ячейки, когда в прототипе их две. Различие в оптических схемах приборов, связанное с неодинаковым количеством АО ячеек, привело к изменению основных параметров, сравнение которых будет описано ниже.

Следующие параметры у обоих приборов одинаковые: спектральное разрешение, пространственное разрешение, глубина резко изображаемого пространства, светосила, линейное увеличение, виброустойчивость.

Более детально рассмотрим параметры, характерные значения для которых не совпадают. Спектральный диапазон устройства-предшественника более узкий, что является недостатком в сравнении с широким диапазоном новой разработки. Линейное поле зрения у аналога меньше на 30%, что так же носит негативный характер для его использования. Из плюсов прототипа можно отметить меньшие на 10% габариты и массу.

Помимо вышеперечисленных параметров, приборы характеризуются еще двумя важнейшими факторами производства: объём выпуска продукции и её цена. Оба устройства на данном этапе их разработки предназначены для единичного производства, однако его стоимость существенно различается. Самой дорогой частью обоих приборов является АО ячейка; она изготавливается из достаточно мягкого и ядовитого материала – парателлуриата. Высокая стоимость производства таких ячеек обусловлена сложным технологическим процессом обработки кристалла из оксида теллура. Поскольку оптическая схема новой разработки включает в себя только одну АО ячейку, вместо двух в аналоге,

цена проектируемого прибора будет значительно ниже, что служит обоснованием экономической эффективности проведения НИРа.

4.2 Расчет цены

Итоговая цена продукта складывается из себестоимости и прибыли, при этом будем считать, что желаемая прибыль должна составлять 10% от всей сметы затрат [13].

Поскольку результатом проделанной работы является конструкторская документация (КД), разработанная на основе данных НИРа, а также изготовление и испытание опытного образца, то всё это представляет собой конструкторскую подготовку производства (КПП). Согласно ГОСТ 2.103-2013 [14], КПП делится на стадии разработки КД и этапы выполнения работ, которые в свою очередь имеют определенное содержание по ГОСТ 2.118-2013 [15], ГОСТ 2.119-2013 [16], ГОСТ 2.120-2013 [17]. Примерный состав работ и все стадии разработки КД, а также их доля во всем проекте, указаны в таблице 11.

Таблица 11 – Стадии разработки КД и этапы выполнения работ

Стадия разработки		Содержание работ	Доля, %
Разработка проектной КД	Разработка технического предложения	Изучение и анализ ТЗ	10%
		Выявление возможных решений	
		Проверка вариантов на патентную чистоту и безопасность	
		Сравнение всех вариантов и выбор оптимального	
		Уточнение общего объема работ, сроков выполнения и затрат.	

Продолжение таблицы 11

Стадия разработки		Содержание работ	Доля, %
Разработка проектной КД	Разработка эскизного проекта	Выполнение возможных вариантов решений	20%
		Составление перечня работ, которые следует провести на последующей стадии разработки	
		Эскизная КД	
	Разработка технического проекта	Разработка конструктивных решений	35%
		Выполнение расчетов, принципиальных схем	
		Анализ конструкции с учетом ТЗ	
		Изготовление, испытание материального макета	
		Оценка изделия по различным параметрам	
		Отработка пояснительной записки	
Разработка рабочей КД	Разработка рабочего проекта и формирование рабочей КД	Разработка рабочих чертежей на детали и узлы	35%
		Документация на проведение различных испытаний будущей конструкции: стендовые, приемосдаточные, заводские испытания	

Согласно таблице 11, разработка рабочего проекта занимает 35% времени всей КПП, при этом окончательная рабочая КД состоит из 12 чертежей формата А1. Для определения трудоёмкости данного этапа воспользуемся документом «Типовые нормы времени на разработку конструкторской документации» [18]. Для расчета необходимо найти весовые коэффициенты в таблицах указанного документа, которые будут зависеть от типа КД, группы сложности и новизны проекта. Данная разработка относится к третьей группе сложности и группе Г новизны. Трудоёмкость Т, нормо-часы (н-ч), найдём по формуле:

$$T = N_i \cdot K_{н-ч} \cdot K_{\phi}, \quad (4.1)$$

где N_i – количество чертежей определенного типа ($N_{сб}$ – сборочный, N_{ϕ} – функциональная схема, $N_{общ}$ – общие схемы),

$K_{н-ч}$ – весовой коэффициент для данного типа КД,

K_{ϕ} – коэффициент, учитывающий формат КД.

Поскольку фактический формат чертежа не всегда совпадает с табличным, будем использовать дополнительный коэффициент для сопоставления форматов. Для сборочных чертежей весовой коэффициент нормы времени в часах равен 41,7, поскольку их всего четыре, два из которых в формате А2, то возьмём коэффициент для учета формата 0,4. Принципиальная схема одна в формате А1, для которого коэффициент равен 1,6, а норма времени в часах 43,1. Все остальные чертежи в формате А1 будут также иметь форматный коэффициент 1,6, а норма времени в часах для них составит 21,5. Тогда трудоёмкость четвертого этапа равна:

$$T_{35\%} = N_{сб} \cdot K_{н-ч} \cdot K_{\phi} + N_{\phi} \cdot K_{н-ч} \cdot K_{\phi} + N_{общ} \cdot K_{н-ч} \cdot K_{\phi}, \quad (4.2)$$

$$T_{35\%} = (2 \cdot 41,7 + 2 \cdot 41,7 \cdot 0,4) + 1 \cdot 43,1 \cdot 1,6 + 8 \cdot 21,5 \cdot 1,6 = 461 \text{ н - ч}$$

Поскольку 461 нормо-часов приходятся на 35% времени КПП, то трудоёмкость всей работы:

$$T_{100\%} = \frac{461 \cdot 100\%}{35\%} = 1316 \text{ нормо - часов} \quad (4.3)$$

Найдём количество рабочих дней, необходимых для реализации проекта, при условии восьмичасового рабочего дня:

$$\frac{1316}{8} = 164 \text{ дня} \quad (4.4)$$

Рассчитаем, сколько рабочих дней необходимо на каждый этап КПП, учитывая долю приходящегося на них времени:

- Техническое предложение – 10%:

$$\frac{164 \cdot 10\%}{100\%} = 16 \text{ дней}, \quad (4.5)$$

- Эскизный проект – 20%:

$$\frac{164 \cdot 20\%}{100\%} = 34 \text{ дня}, \quad (4.6)$$

- Технический проект, рабочий проект – 35%:

$$\frac{164 \cdot 35\%}{100\%} = 57 \text{ дней} \quad (4.7)$$

Так как задание было выдано 16 февраля, а срок окончания 15 июня, то согласно производственному календарю 2021 года, на выполнение работы выделено 77 рабочих дней. Чтобы уложиться в намеченный срок (77 дней – 100%), необходимо увеличить число исполнителей на каждом этапе работ, для которых определим максимально доступное количество дней:

- Техническое предложение – 10%:

$$\frac{77 \cdot 10\%}{100\%} = 8 \text{ дней}, \quad (4.8)$$

- Эскизный проект – 20%:

$$\frac{77 \cdot 20\%}{100\%} = 15 \text{ дней}, \quad (4.9)$$

- Технический проект, рабочий проект – 35%:

$$\frac{77 \cdot 35\%}{100\%} = 27 \text{ дней} \quad (4.10)$$

Найдём численность рабочих для каждого этапа:

$$\frac{164}{77} = 2 \text{ человека} \quad (4.11)$$

Исходя из списка работ, представленного в таблице 11, перечислим в таблице 12, какие специалисты необходимы для реализации данного проекта. Также назначим заработную плату каждого исполнителя согласно данным интернет-ресурсов по поиску работы HeadHunter и Superjob.

Таблица 12 – заработная плата исполнителей

Исполнитель	Месячный оклад, руб
Старший научный сотрудник (СНС)	95000
Научный сотрудник (НС)	65000
Младший научный сотрудник (МНС)	25000
Патентовед	60000
Инженер-конструктор	72000

Для нахождения затрат на оплату труда распределим исполнителей на все виды работ из таблицы 11 и укажем количество рабочих дней, необходимых для каждой работы. Также рассчитаем трудоёмкость в нормо-часах, учитывая, что исполнители работают полный рабочий день (8 часов). Результаты представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Перечень работ и исполнителей

№ Этапа	Исполнитель	Количество исполнителей	Содержание работ	Количество рабочих дней	Трудоёмкость, н-ч
1	СНС	2	Изучение и анализ ТЗ	1	8
	НС				8
	СНС	2	Выявление возможных решений	2	16
	НС				16
	Патентовед	2	Проверка вариантов на патентную чистоту и безопасность	3	24
	НС				24
	СНС	2	Сравнение всех вариантов и выбор оптимального	1	8
	НС				8
	НС	2	Уточнение общего объема работ, сроков выполнения и затрат.	1	8
	МНС				8

Продолжение таблицы 13

№ Этапа	Исполнитель	Количество исполнителей	Содержание работ	Количество рабочих дней	Трудо-ёмкость, н-ч
2	НС	2	Выполнение возможных вариантов решений	10	80
	МНС				80
	НС	2	Составление перечня работ, которые следует провести на последующей стадии разработки	1	8
	МНС				8
	Инженер-конструктор	2	Эскизная КД	4	32
	Инженер-конструктор				32
3	Инженер-конструктор	2	Разработка конструктивных решений	5	40
	Инженер-конструктор				40
	НС	2	Выполнение расчетов, принципиальных схем	5	40
	МНС				40
	СНС	2	Анализ конструкции с учетом ТЗ	1	8
	НС				8
	НС	2	Изготовление, испытание материального макета	13	104
	инженер-конструктор				104
	СНС	2	Оценка изделия по различным параметрам	1	8
	МНС				8
	НС	2	Отработка пояснительной записки	2	16
	МНС				16

Окончание таблицы 13

№ Этапа	Исполнитель	Количество исполнителей	Содержание работ	Количество рабочих дней	Трудоёмкость, н-ч
4	Инженер-конструктор	2	Разработка рабочих чертежей на детали и узлы	20	160
	Инженер-конструктор				160
	НС	2	Документация на проведение различных испытаний будущей конструкции: стендовые, приемосдаточные, заводские испытания	7	56
	МНС				56

Зная необходимое количество исполнителей, найдём затраты на оплату труда, которые составляют 30% от всей сметы затрат, представленной в таблице 14.

Таблица 14 - Смета и структура затрат на проектирование

№	Наименование статьи	Доля, %
1	Затраты на материалы	20
2	Затраты на оплату труда	30
3	Отчисления на социальные нужды	5
4	Амортизация оборудования	15
5	Прочие	30

Представим план последовательного выполнения всех работ в виде ленточного графика, изображенного на рисунке 34.

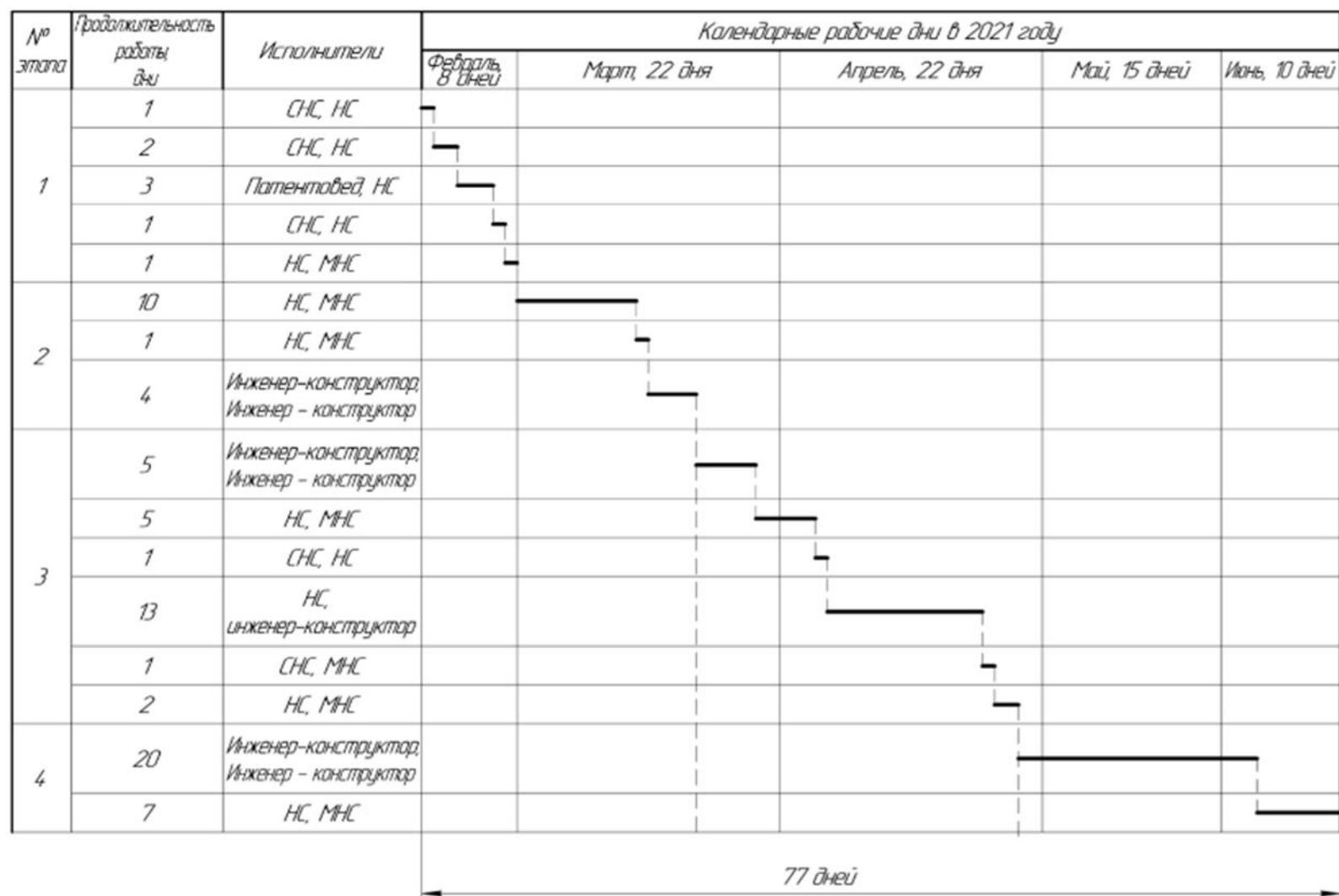


Рисунок 34 – Ленточный график

Для определения затрат на оплату труда исполнителей $S_{\text{зп.осн.}}$, руб, воспользуемся штатно-окладной системой оплаты труда, которая описывается формулой:

$$S_{\text{зп.осн.}} = \sum_i^n \frac{t_{\text{раб.}}}{N_{\text{рб.}}} L_{\text{мест}i} R_i, \quad (4.12)$$

где $t_{\text{раб.}}$ — фактически отработанное время в рабочих днях по табелю за месяц, дни;

$N_{\text{рб.}}$ — количество рабочих дней в месяце;

$L_{\text{мест}i}$ — месячный оклад исполнителей, руб;

R_i — количество исполнителей;

n — количество видов работ.

Рассчитанные значения представлены в таблице 15.

Таблица 15 - Затраты на оплату труда

Исполнитель	Оклад, руб	Отработанное время, дни	Рабочие дни в месяце, дни	Количество видов работ	Зарплата $S_{\text{зп.осн.}}$, руб
СНС	95000	Февраль – 4 Апрель - 2	Февраль – 19 Апрель - 22	5	28 636
НС	65000	Февраль – 8 Март - 13 Апрель – 19 Июнь - 7	Февраль – 19 Март - 22 Апрель – 22 Июнь - 21	12	143 579
МНС	25000	Февраль – 1 Март - 13 Апрель – 6 Июнь - 7	Февраль – 19 Март - 22 Апрель – 22 Июнь - 21	7	31 238
Патентовед	60000	Февраль – 3	Февраль – 19	1	9473
Инженер-конструктор	72000	Март - 9 Апрель – 15 Май - 15 Июнь - 3	Март - 22 Апрель – 22 Май - 15 Июнь - 21	4	279 115

Итоговые затраты на выплату зарплат исполнителям составляют $S_{\text{зп.исп.}} = 492\,041$ руб. Помимо зарплат исполнителей, в расходы на оплату труда входит заработная плата управляющего и обслуживающего персонала (бухгалтеры, менеджеры и т.д.) $S_{\text{обсл.п.}}$, руб, которая составляет 40% затрат:

$$S_{\text{обсл.п.}} = \frac{S_{\text{зп.исп.}} \cdot 100\% \cdot 40\%}{60\%} = \frac{492\,041 \cdot 100\% \cdot 40\%}{60\%} = 328\,027 \text{ руб} \quad (4.13)$$

Тогда общие затраты на оплату труда $S_{\text{опл.тр.}}$, руб, равны:

$$S_{\text{опл.тр.}} = S_{\text{зп.исп.}} + S_{\text{обсл.п.}} = 492\,041 + 328\,027 = 820\,068 \text{ руб} \quad (4.14)$$

Пользуясь таблицей 14, найдём всю смету затрат на проектирование, исходя из процентных соотношений. Результаты представлены в таблице 16.

Таблица 16 - Смета затрат на проектирование

Наименование статьи	Доля, %	Затраты, руб
Затраты на материалы	20	546 712
Затраты на оплату труда	30	820 068
Отчисления на социальные нужды	5	136 678
Амортизация оборудования	15	410 034
Прочие	30	820 068
Итого	100	2 733 560

Стоимость проектирования (конструкторской части) составила

$S_{\text{констр.}} = 2\,733\,560$ руб. В реализацию проекта также входят технологическая и организационная проработки, их стоимость найдем косвенно из процентного

соотношения. Будем считать, что технологическая часть составляет 40% от проектной, а организационная 20%. Результаты представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Стоимость всех этапов НИР

Этап	Доля, %	Стоимость, руб
Проектирование		2 733 560
Технологическая проработка	40% от стоимости проектирования	1 093 424
Организационная проработка	20% от стоимости проектирования	546 712
Итого		$S_{\text{ст.}} = 4\,373\,696$

Поскольку прибыль должна составить 10% от стоимости, то расчетная цена проекта $C_{\text{НИР}}$, руб, равна:

$$C_{\text{НИР}} = 1,1 \cdot S_{\text{ст.}} = 1,1 \cdot 4\,373\,696 = 4\,811\,065 \text{ руб} \quad (4.15)$$

Необходимо учесть стоимость подготовки производства $S_{\text{подг.пр.}}$, руб, нового изделия, которая включает проектную, технологическую и организационно-плановую подготовку:

$$S_{\text{подг.пр.}} = 2 \cdot S_{\text{ст.}} = 2 \cdot 4\,373\,696 = 8\,747\,392 \text{ руб} \quad (4.16)$$

Тогда цена подготовки производства $C_{\text{подг.пр.}}$, руб, равна:

$$C_{\text{подг.пр.}} = 1,1 \cdot S_{\text{подг.пр.}} = 1,1 \cdot 8\,747\,392 = 9\,622\,131 \text{ руб} \quad (4.17)$$

Стоимость $S_{общая}$, руб, и цена НИР $C_{общая}$, руб, с учетом подготовки производства соответственно равны:

$$S_{общая} = S_{ст.} + S_{подг.пр.} = 4\,373\,696 + 8\,747\,392 = 13\,121\,088 \text{ руб,} \quad (4.18)$$

$$C_{общая} = C_{НИР} + C_{подг.пр.} = 4\,811\,065 + 9\,622\,131 = 14\,433\,196 \text{ руб} \quad (4.19)$$

Выводы: в данном разделе был проведен сравнительный анализ разрабатываемого прибора с его предшественником, который показал, что проектируемое изделие превосходит аналог по многим параметрам. Следовательно, проведение НИРа целесообразно, поскольку было усовершенствовано предыдущее устройство. Также одно из главных преимуществ – более низкая стоимость, обусловленная использованием одной АО ячейки, что служит обоснованием экономической эффективности реализации НИРа.

На выполнение всех проектных работ было выделено 77 рабочих дней. Для реализации НИРа в срок было рассчитано необходимое количество исполнителей, работающих совместно. Поскольку все этапы требуют привлечения специалистов различного профиля и квалификации, работы выполняются последовательно двумя исполнителями из списка: старший научный сотрудник, научный сотрудник, младший научный сотрудник, патентовед, инженер – конструктор. Планирование проектных работ было представлено в виде ленточного графика.

Расчетная стоимость и цена проекта без учета подготовки производства составили соответственно $S_{ст.} = 4\,373\,696$, $C_{НИР} = 4\,811\,065$ руб. С учетом подготовки производства: $S_{общая} = 13\,121\,088$ руб, $C_{общая} = 14\,433\,196$ руб.

5 Охрана труда и экология

5.1 Вводная часть

В данном разделе будет проведен анализ потенциальных опасностей и вредности для здоровья человека при изготовлении акустооптической (АО) ячейки из парателлурита. Вторым этапом рассчитаем систему вентиляции для производственного предприятия, где будет изготавливаться АО ячейка.

Парателлурит – диоксид теллура с химической формулой TeO_2 . Двухокись теллура получают окислением теллура азотной или серной кислотой с последующим прокаливанием основных солей. Исключительное сочетание оптических, акустических, фотоупругих и других свойств делает данный кристалл наиболее перспективным для создания акустооптических приборов.

В связи с уникальными свойствами данного материала, его производство и применение постепенно расширяется, следовательно, возрастает количество людей, работающих с ним. Все соединения теллура токсичны, а значит требуют особой техники безопасности.

Соединения теллура попадают в организм через дыхательные пути, желудок и кожу. Симптомами отравления могут быть: тошнота, сонливость, исхудание; выдыхаемый человеком воздух приобретает запах чеснока, что свидетельствует о наличии теллуторганических соединений - алкилтеллуридов. Также попадание в организм может впоследствии вызвать бронхит и пневмонию.

Лучшая профилактика – автоматизация и механизация процессов получения теллура и его соединений, а также надежная герметизация аппаратов. В помещении должна быть установлена хорошая вентиляция. При работе с соединениями теллура руки должны быть защищены резиновыми перчатками. В таких помещениях категорически запрещается курить и принимать пищу.

5.2 Анализ потенциальных опасностей и вредности при производстве АО ячейки

Основными операциями изготовления АО ячейки, связанными с воздействием на человека и окружающую среду (производственную и экологическую) негативных факторов, являются:

- распиловка кристалла;
- грубое шлифование кристалла;
- тонкое шлифование кристалла;
- полирование кристалла.

Помимо норм на предельно допустимую концентрацию пыли парателлурита в воздухе, существует ряд ограничений для физических факторов на рабочих местах, которые регламентируются СанПиН 1.2.3685-21 [19]. Такие факторы могут оказать негативное воздействие на человека и окружающую среду при несоблюдении действующих предельно допустимых уровней.

Для определения нормативов на различные физические факторы будем рассматривать производственное помещение, рассчитанное на 5 рабочих мест. Согласно СП 2.2.3670-20 [20], площадь помещения на одного работника должна составлять не менее 4,5 м², а объём 15 м³, поскольку выполняется легкая физическая работа с категорией энерготрат Ia - Ib. Тогда общая площадь рабочих мест:

$$4,5 \cdot 5 = 22,5 \text{ м}^2 \quad (5.1)$$

При этом расстояние между рабочими местами должно составлять не менее 2 метров, следовательно, общая площадь производственного помещения:

$$22,5 + 4,5 \cdot 2 \cdot 4 = 58,5 \text{ м}^2 \quad (5.2)$$

5.2.1 Нормализация воздушной среды в производственном помещении

Во время всех перечисленных операций изготовления АО ячейки в воздух попадает тонкодисперсная пыль от обрабатываемых кристаллов, которая представляет собой опасность для человека и окружающей среды. В нашей стране предельно допустимой концентрацией парателлурита в воздухе рабочей зоны на рабочих местах в производственных помещениях, обеспечивающей допустимые уровни риска при воздействии не менее 24 часов, согласно ГОСТ 12.1.005-88 [21], считается $0,0005 \text{ мг/м}^3$. Оксид относится к первому классу опасности – вещества чрезвычайно опасные.

Для нормализации воздушной среды и обеспечения гигиенических норм в помещении, где изготавливаются АО ячейки, предлагается комбинированная система вентиляции, которая включает в себя общеобменную приточно-вытяжную систему и местную вытяжную вентиляцию. В качестве последней целесообразно установить боковой отсос в стене, который относится к местным отсосам открытого типа, он будет рассчитан во втором разделе. Такая система позволит удалить из помещения загрязненный воздух и организует подачу в него свежего.

Микроклимат на рабочем месте

Обеспечение допустимого микроклимата необходимо для поддержания нормальной производительности труда. Гигиенические нормативы на данный физический фактор описаны в СанПиН 1.2.3685-21 [19].

Для рассчитанного производственного помещения определим допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах, которые оцениваются в

зависимости от категории работ. Перечисленные выше операции по обработке кристалла относятся к категории Ia – Ib, поскольку данные работы осуществляются сидя, стоя или связаны с редкой ходьбой и сопровождаются некоторым физическим напряжением. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 [19], энерготраты таких работ составляют от 139 до 174 Вт.

Основными источниками тепла в процессе производства АО ячейки являются: электродвигатели обрабатывающих станков, осветительные установки, поверхности оборудования. Главные источники влаговыведения: смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), используемые в процессе обработки, и люди, работающие в помещении. Регулирование параметров микроклимата в пределах допустимой нормы осуществляется, согласно СП 60.13330.2016 [22], с помощью общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха, а также системами отопления в холодный период года.

По СанПиН 1.2.3685-21 [19] при обеспечении допустимых величин микроклимата на рабочих местах перепад температуры воздуха по высоте от уровня пола (0,1; 1,0; 1,5) м должен быть не более 3°C. Перепад температуры воздуха по горизонтали, а также ее изменения в течение смены не должны превышать 4°C для категорий работ Ia и Ib.

Если по какой-то причине температура воздуха на рабочих местах выше или ниже допустимых величин, то в целях защиты работников от возможного перегрева или охлаждения время пребывания на рабочем месте должно быть ограничено по ГОСТ 12.1.005-88 [21]. Местная вытяжная вентиляция, предложенная ранее для удаления вредных веществ из воздуха, так же используется в целях нормализации микроклимата, в первую очередь температуры, на рабочем месте. Данная система позволяет эффективно удалять избытки тепла непосредственно из рабочей зоны, предотвращая распространение тепловых потоков внутри производственного помещения.

Исходя из вышеперечисленного, составим таблицу 18.

Таблица 18 - Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах в производственных помещениях

Период года	Категория работ по уровню энерготрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	Ia (до 139)	20,0 – 21,9	24,1 – 25,0	19,0 – 26,0	15 – 75	0,1	0,1
	Iб (140-174)	19,0 – 20,9	23,1 – 24,0	18,0 – 25,0	15 – 75	0,1	0,2
Теплый	Ia (до 139)	21,0 – 22,9	25,1 – 28,0	20,0 – 29,0	15 – 75	0,1	0,2
	Iб (140-174)	20,0 – 21,9	24,1 – 28,0	19,0 – 29,0	15 – 75	0,1	0,3

5.2.2 Освещение на рабочем месте

Одним из негативных физических факторов при несоблюдении правил и норм может быть освещение рабочего места. Если не придерживаться установленных требований, то можно существенно снизить производительность труда и нанести серьезный вред здоровью работников. Правильное освещение рабочих мест регламентируется СанПиН 1.2.3685-21 [19] и СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [22].

Поскольку линейные размеры АО ячейки составляют более 5 мм, то работа по её изготовлению характеризуется грубой (очень малой) зрительной точностью и имеет VI разряд. В производственном помещении постоянно находятся люди, поэтому необходимо наличие естественного освещения, в данном случае оно может быть боковым. Тогда коэффициент естественной освещенности (КЕО) равен 1%.

Обработка кристалла производится в цехах с полностью автоматизированным технологическим процессом, где следует предусматривать искусственное освещение для наблюдения за работой оборудования, а также дополнительно включаемые светильники общего и местного освещения для обеспечения необходимой освещенности при ремонтно-наладочных работах. Освещенность при системе общего искусственного освещения должна составлять не менее 200 лк.

Для искусственного освещения производственных помещений могут использоваться следующие источники света: люминесцентные лампы (ЛБ), металлогалогенные лампы (МГЛ), натриевые лампы высокого давления (НЛВД), ртутные лампы высокого давления (РЛВД). Предлагается использовать ЛБ, поскольку у них достаточная световая отдача 55 лм/Вт для эксплуатации на рабочем месте и невысокая стоимость.

5.2.3 Шум и вибрация на рабочем месте

Ещё один негативный физический фактор – шум и вибрация. Необходимые нормы и правила устанавливаются так же в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 [19] и СП 51.13330.2011 [23]. Несоблюдение мер производственной безопасности может привести к серьезным проблемам со здоровьем сотрудников, которые подвержены влиянию шума и вибрации оборудования. Для назначения максимально допустимого времени воздействия вредного фактора на сотрудников и определения нужных средств защиты от него необходимо измерять уровень шума и вибрации в производственных помещениях.

Производственный процесс изготовления АО ячейки относится к категории напряженности легкой и средней степени и характеризуется средней физической нагрузкой. Нормативный эквивалентный уровень звука, воздействующий на работающего за рабочую смену равен 80 дБА. Вибрация имеет локальный характер, для которого нормативный эквивалентный скорректированный уровень виброускорения 2 М/с^2 или 126 дБ.

Основными источниками шума и вибрации в производственных помещениях являются обрабатывающие станки (шлифовально-полировальные машины, установки для резки кристаллов), а также шум и вибрация, создаваемые вне помещения (в других цехах или на улице). Для ограничения воздействия данных вредных факторов на работников необходимо использовать средства и методы защиты от шума и вибрации, описанные в ГОСТ 12.1.029-80 [24] и ГОСТ 26568-85 [25] соответственно. В целях подавления шума рекомендуется применять методы коллективной защиты: акустическая звукопоглощающая облицовка всего производственного помещения.

5.2.4 Пожарная и электрическая безопасность

Общие требования пожарной безопасности описаны в ГОСТ 12.1.004-91 [26], требования по обеспечению огнестойкости в СП 2.13130.2020 [27]. Пожарная безопасность производственного помещения должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Согласно СП 12.13130.2009 [28] помещение относится к категории Г по взрывопожарной и пожарной опасности: умеренная пожароопасность. Огнестойкость конструкции - I степени. Источники пожарной опасности в производственном помещении: силовые электрические сети, обрабатывающие станки и светотехническое оборудование.

Для обеспечения пожарной безопасности на производственном предприятии должно быть организовано обучение работающих правилам пожарной безопасности, а также разработаны и реализованы нормы и правила пожарной безопасности, инструкции о порядке обращения с пожароопасными веществами и материалами. На рабочих местах необходимо использовать защитное заземление обрабатывающих станков. В помещении необходимо установить системы автоматической пожарной сигнализации, устройства дымоудаления. Должны быть оборудованы системы внешнего пожаротушения (пожарные краны, гидранты) и внутреннего автоматического пожаротушения (установка сплинкерного типа).

В качестве средства первичного пожаротушения в цехе целесообразно использовать порошковые огнетушители, которые эффективно борются с открытым огнем. Также необходимо составить план эвакуации в случае возгорания и обозначить все эвакуационные выходы из здания, которых, согласно СП 1.13130.2020 [27], должно быть не менее двух. В помещении должны быть соблюдены архитектурные требования: ширина проходов, угол наклона лестниц.

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [29], производственное помещение по электробезопасности относится ко 2 категории: помещение с повышенной опасностью. Электроустановки (в данном случае обрабатывающие станки) в производственном цехе имеют рабочее напряжение 380 В, следовательно, в помещении проходит трехфазная электрическая сеть напряжением 380 В. В соответствии с ПУЭ [29], в таких электрических сетях рекомендуется применять систему заземления TN-C-S, сопротивление которой 4-10 Ом.

Для защиты от поражения электрическим током при прямом прикосновении также необходимо использовать устройства защитного отключения (УЗО).

5.3 Расчет местной вытяжной вентиляционной системы для производственного помещения

Во избежание попадания вредных частиц парателлурида в дыхательные пути работников, будет целесообразно использовать боковые отсосы [30]. Расчет проведем для производственного помещения с 5 рабочими местами, площадь которого 58,5 м².

Источником вредных веществ в данном случае является шлифовально-обдирочный станок. Исходные данные:

$a = 1,5$ м — длина станка;

$b = 1$ м — ширина станка.

$x_0 = 0,5$ м — расстояние от геометрического центра источника до стены.

Боковой отсос будет иметь прямоугольную форму, его длина A , м, и ширина B , м, соответственно равны:

$$A = a = 1,5 \text{ м}, \quad (5.3)$$

$$B = 0,75 \left(x_0 + \frac{b}{2} \right) = 0,75 \left(0,5 + \frac{1}{2} \right) = 0,75 \text{ м} \quad (5.4)$$

Расстояние от источника вредных выбросов до геометрического центра бокового настенного отсоса:

$$y_0 = 0,4 \text{ м}$$

Скорость движения воздуха в помещении:

$$w_{\text{в}} = 0,3 \text{ м/с}$$

Количество выделяемой источником конвективной теплоты:

$$Q = 800 \text{ Вт}$$

Определим эквивалентные диаметры источника и отсоса соответственно:

$$d_{\text{э}} = 1,13 \sqrt{a \cdot b} = 1,13 \sqrt{1,5 \cdot 1} = 1,38 \text{ м}, \quad (5.5)$$

$$D_э = 1,13\sqrt{A \cdot B} = 1,13\sqrt{1,5 \cdot 0,75} = 1,19 \text{ м} \quad (5.6)$$

Также для расчета необходим параметр s :

$$s = 0,5 \left(x_0 + y_0 + \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \right) = 0,5 \left(0,5 + 0,4 + \sqrt{0,5^2 + 0,4^2} \right) = 0,77 \text{ м} \quad (5.7)$$

Ещё один характерный параметр \bar{D} :

$$\bar{D} = 4,17 \frac{D_э}{s + d_э} = 4,17 \frac{1,19}{0,77 + 1,38} = 2,31 \quad (5.8)$$

Расход удаляемого воздуха вычисляется по формуле:

$$L_{отс} = L_0 k_{\pi} k_{\text{в}} k_{\text{т}}, \quad (5.9)$$

где L_0 — характерный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$;

k_{π} — коэффициент, учитывающий геометрию и режим работы системы, б/р;

$k_{\text{в}}$ — коэффициент скорости движения воздуха в цеху, б/р;

$k_{\text{т}}$ — коэффициент токсичности, б/р.

Найдём каждую из перечисленных величин для отсоса в стене по формулам:

$$L_0 = 310 \cdot Q^{1/3} \cdot (s + d_э)^{5/3} = 310 \cdot 800^{1/3} \cdot (0,77 + 1,38)^{5/3} = 10\,310 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5.10)$$

$$k_{\Pi} = 0,22 \cdot (1 - 0,0625 \cdot \bar{D}^2) = 0,22 \cdot (1 - 0,0625 \cdot 2,31^2) = 0,15, \quad (5.11)$$

$$k_{\text{в}} = 1 + \frac{20,8 \cdot w_{\text{в}} \cdot d_{\text{э}}^{2/3}}{(y_0 \cdot Q)^{1/3}} = 1 + \frac{20,8 \cdot 0,3 \cdot 1,38^{2/3}}{(0,4 \cdot 800)^{1/3}} = 2,13 \quad (5.12)$$

Для определения коэффициента токсичности $k_{\text{т}}$ используется график, где введен параметр \bar{C} , б/р:

$$\bar{C} = \frac{3600M}{L_{\text{отс1}}(q_{\text{рз}} - q_{\text{пр}})}, \quad (5.13)$$

где M — интенсивность выделений вредных веществ, мг/с ;

$L_{\text{отс1}}$ — расход воздуха при $k_{\text{т}} = 1$, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$q_{\text{рз}}, q_{\text{пр}}$ — концентрации вредного вещества соответственно в рабочей зоне и в приточном воздухе, $\text{мг}/\text{м}^3$.

Найдём расход воздуха без учета коэффициента токсичности:

$$L_{\text{отс1}} = L_0 k_{\Pi} k_{\text{в}} k_{\text{т}} = 10\,310 \cdot 0,15 \cdot 2,13 \cdot 1 = 3294 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.14)$$

Оставшиеся величины:

$$M = 30 \text{ мг/с},$$

$$q_{\text{pz}} = 0,5 \text{ мг/м}^3 ,$$

$$q_{\text{пр}} = 0 .$$

Тогда \bar{C} будет равно:

$$\bar{C} = \frac{3600 \cdot 30}{3294 \cdot (0,5 - 0)} = 65$$

По графику на рисунке 35 находим коэффициент токсичности $k_T = 1,5$.

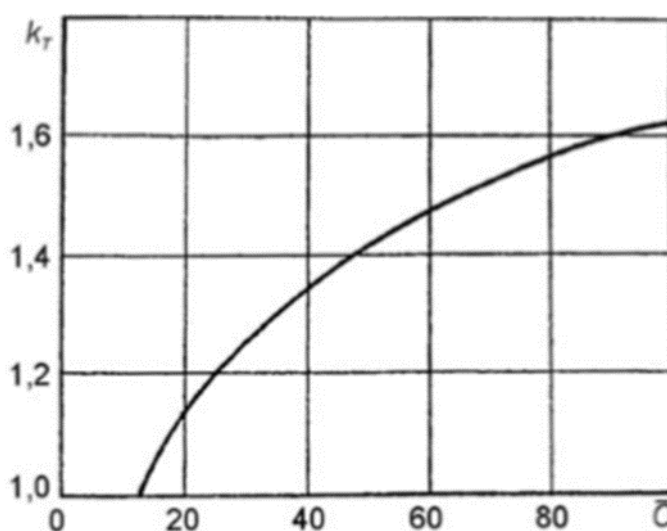


Рисунок 35 - Определение коэффициента токсичности

Находим искомый расход воздуха через боковой отсос в стене:

$$L_{\text{отс}} = L_0 k_{\text{п}} k_{\text{в}} k_T = 10\,310 \cdot 0,15 \cdot 2,13 \cdot 1,5 = 4941 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Схема рассчитанного бокового отсоса в стене представлена на рисунке 36.

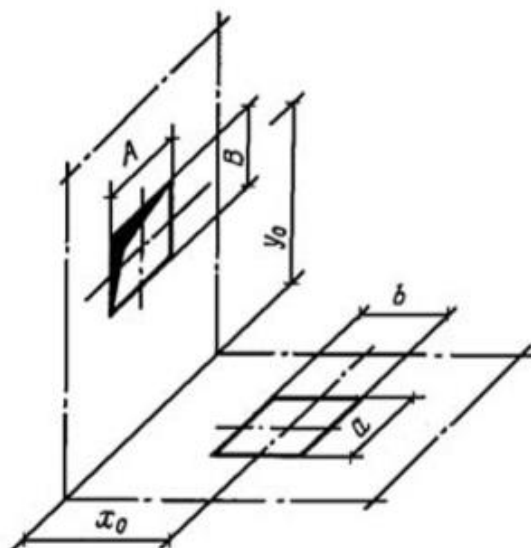


Рисунок 36 - Схема бокового отсоса в стене

Для спроектированной конструкции можно использовать вытяжное устройство Флекс-Макс фирмы «СовПлим», которое будет эксплуатироваться в составе местной вытяжной вентиляции. Исходя из рассчитанного диаметра отсоса $D_3 = 1,19$ м, выберем модель установки FM-1520. Для данной системы потеря давления составит $\Delta P = 52$ Па. Рекомендуемый вентилятор FUK-1800, мощность его двигателя равна 0,55 кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана оптическая система АО стереоскопического видеоспектрометра. Расчет включал в себя габаритную и абберационную части.

По результатам абберационного расчета был разработан выходной объектив, компенсирующий абберации оптической системы акустооптического спектрометра. Полученный объектив позволяет корректировать хроматическую абберацию положения и кривизну поля. Наиболее существенный вклад в абберации системы вносит хроматический сдвиг изображения, поскольку это несимметричная абберация, её нельзя скомпенсировать в осесимметричной оптической системе.

Для рассчитанных линз регистрирующих частей оптических каналов прибора были сконструированы объективы. Конструкция всего устройства разработана в виде экспериментального макета.

Полученная система формирует стереоскопические изображения в отдельных спектральных каналах с высоким спектральным разрешением – порядка 2 нм. Диапазон перестройки длин волн 440 – 760 нм, диапазон управляющих частот ультразвука 65 – 130 МГц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yoon S, Thai C. Stereo spectral imaging system for plant health characterization. Proc. ASABE Annual Int. Meeting, 2009; 096583. P. 1-12.
2. Pozhar V, Machihin A. AOTF-based 3D spectral imaging system. AIP Conf. Proc, 2012; 1433. P. 65-67.
3. А.С. Мачихин, В.И. Батшев, В.Э. Пожар, М.М. Мазур. Акустооптический стереоскопический спектрометр полного поля для восстановления объемной структуры объектов в произвольных спектральных интервалах. Компьютерная оптика. – 2016.
4. Г.Н. Виноградова, В.В. Захаров. Основы микроскопии. Часть 1. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2018. — 133 с
5. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 279 с
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982.
7. Леманов В.В., Шакин О.В. Рассеяние света на упругих волнах в одноосных кристаллах. – ФТТ, 1972, т. 14, №1, с. 229-236.
8. Alexander Machikhin, Vladislav Batshev, Vitold Pozhar. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems. J. Opt. Soc. Am. A 34, 1109-1113 (2017)
9. Vladislav Batshev, Alexander Machikhin, Vitold Pozhar. Quality assessment of stereoscopic spectral images obtained with use acousto-optic diffraction in a single TeO₂ crystal. Proceedings of Meetings on Acoustics 38, 030021 (2019)
10. Alexander Machikhin, Vladislav Batshev, Vitold Pozhar, Alexander Naumov. Single-volume dual-channel acousto-optical tunable filter. Opt. Express 28, 1150-1157 (2020)

11. Заказнов Н.П. Теория оптических систем/ Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. - 4-е изд., стер.- СПб.: Издательство «Лань», - 2008.
12. ГОСТ 1807-75 Радиусы сферических поверхностей оптических деталей. Ряды числовых значений (с Изменениями N 1, 2). М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
13. Скворцов Ю. В. Практикум по организации и планированию машиностроительного производства. Производственный менеджмент. – М.: Высшая школа, 2004.
14. ГОСТ 2.103-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Стадии разработки (с Поправками). М.: Стандартинформ, 2019.
15. ГОСТ 2.118-2013 Единая система конструкторской документации. Техническое предложение. М.: Стандартинформ, 2018.
16. ГОСТ 2.119-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эскизный проект. М.: Стандартинформ, 2018.
17. ГОСТ 2.120-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Технический проект (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2018.
18. Типовые нормы времени на разработку конструкторской документации. – Москва: [б.и.], 1991. – 69 с.
19. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
20. Об утверждении санитарных правил СП 2.2.3670-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда" СП 2.2.3670-20 Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда.

21. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1). М.: Стандартиформ, 2008.
22. СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 (с Изменением N 1). М.: Стандартиформ, 2017.
23. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1). М.: ОАО "ЦПП", 2010.
24. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
25. ГОСТ 26568-85 Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация (с Изменением N 1). М.: Издательство стандартов, 1987.
26. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1). М.: Стандартиформ, 2006.
27. СП 2.13130.2020 Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. М.: Стандартиформ, 2020.
28. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1). М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
29. Правила устройства электроустановок. – Москва: Моркнига, 2020 – 584 с.
30. Комкин А.И., Спиридонов В.С. Расчет систем механической вентиляции: Учеб. Пособие по курсу «Безопасность жизнедеятельности». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 182 с.: ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Графическая часть дипломного проекта

В графическую часть дипломного проекта входят:

- 1) Стереоскопический спектрометр. Ход лучей в оптической системе (рис. А1).
- 2) Стереоскопический спектрометр. Схема оптическая принципиальная (рис. А2).
- 3) Длинный канал. Оптический выпуск (рис. А3).
- 4) Короткий канал. Оптический выпуск (рис. А4).
- 5) Макет АО видеоспектрометра. Сборочный чертеж (рис. А5).
- 6) Длинный канал. Сборочный чертеж (рис. А6).
- 7) Короткий канал. Сборочный чертеж (рис. А7).
- 8) Анализ качества изображения (рис. А8).
- 9) Функциональная схема (рис. А9).
- 10) Схемы стереоскопической АО фильтрации (рис. А10).
- 11) Анализ допусков (рис. А11).
- 12) АО фильтр (рис. А12).
- 13) Организация и планирования НИР (рис. А13).

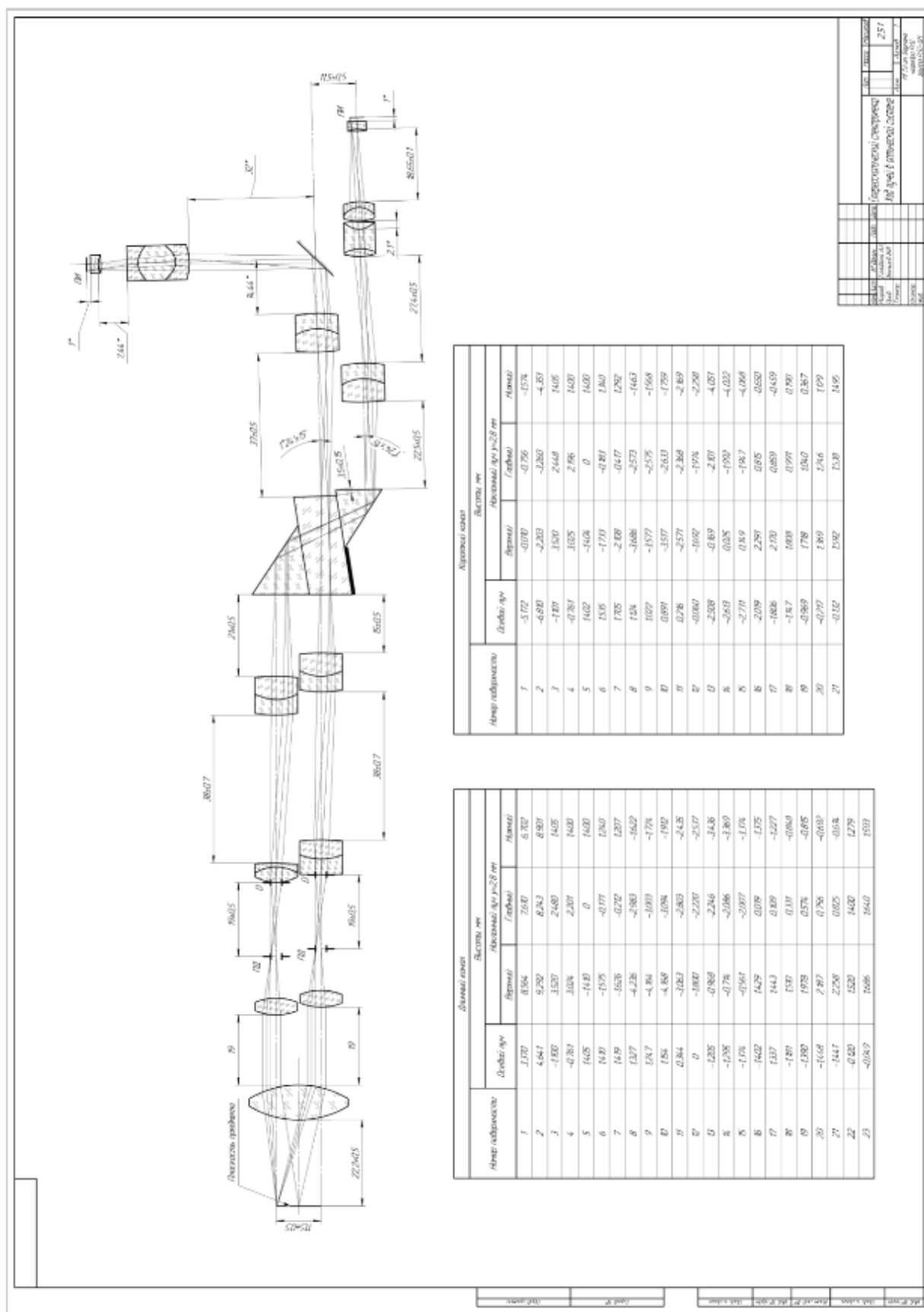


Рисунок А1 — Стереоскопический спектрометр. Ход лучей в оптической системе

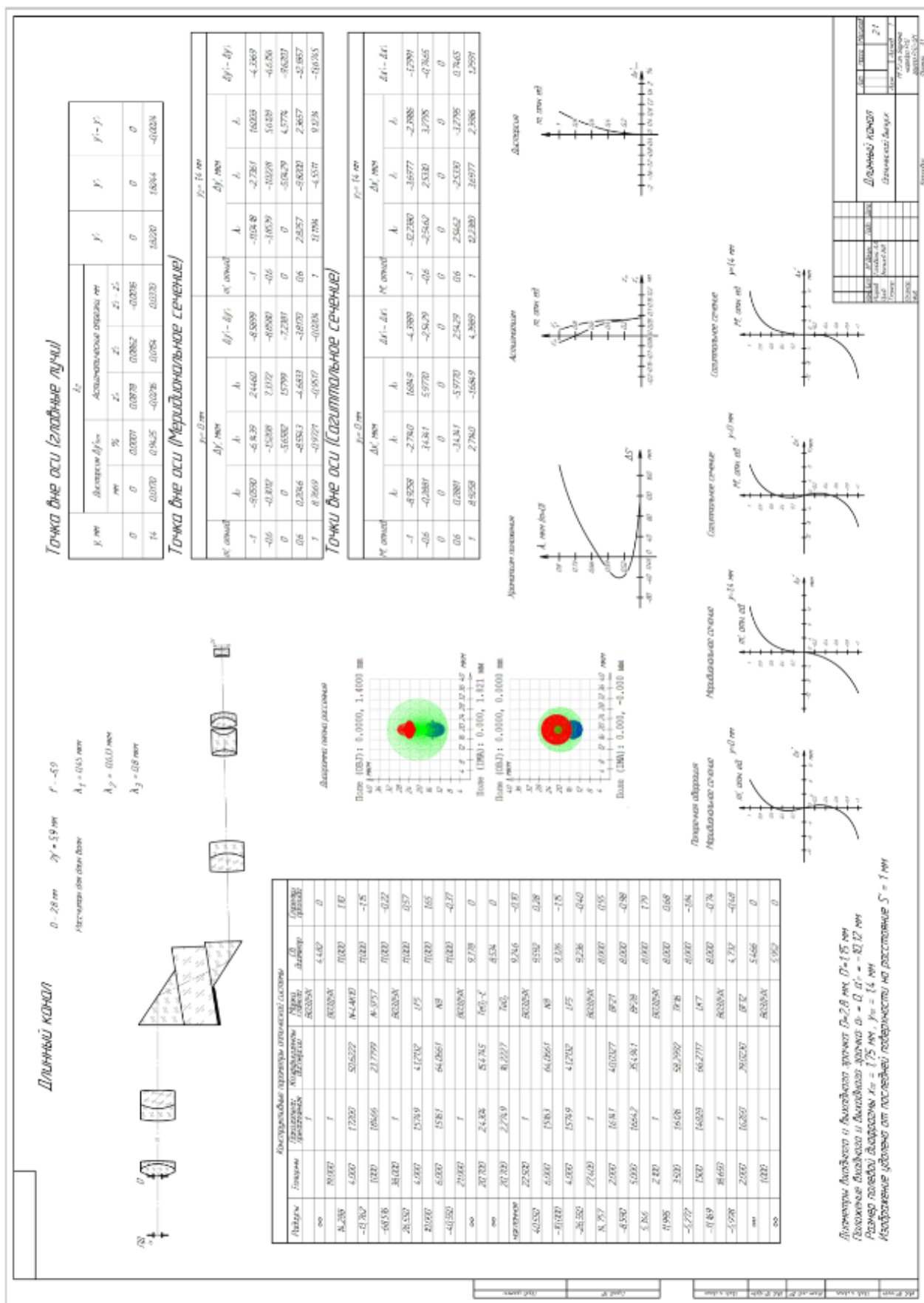


Рисунок АЗ — Длинный канал. Оптический выпуск

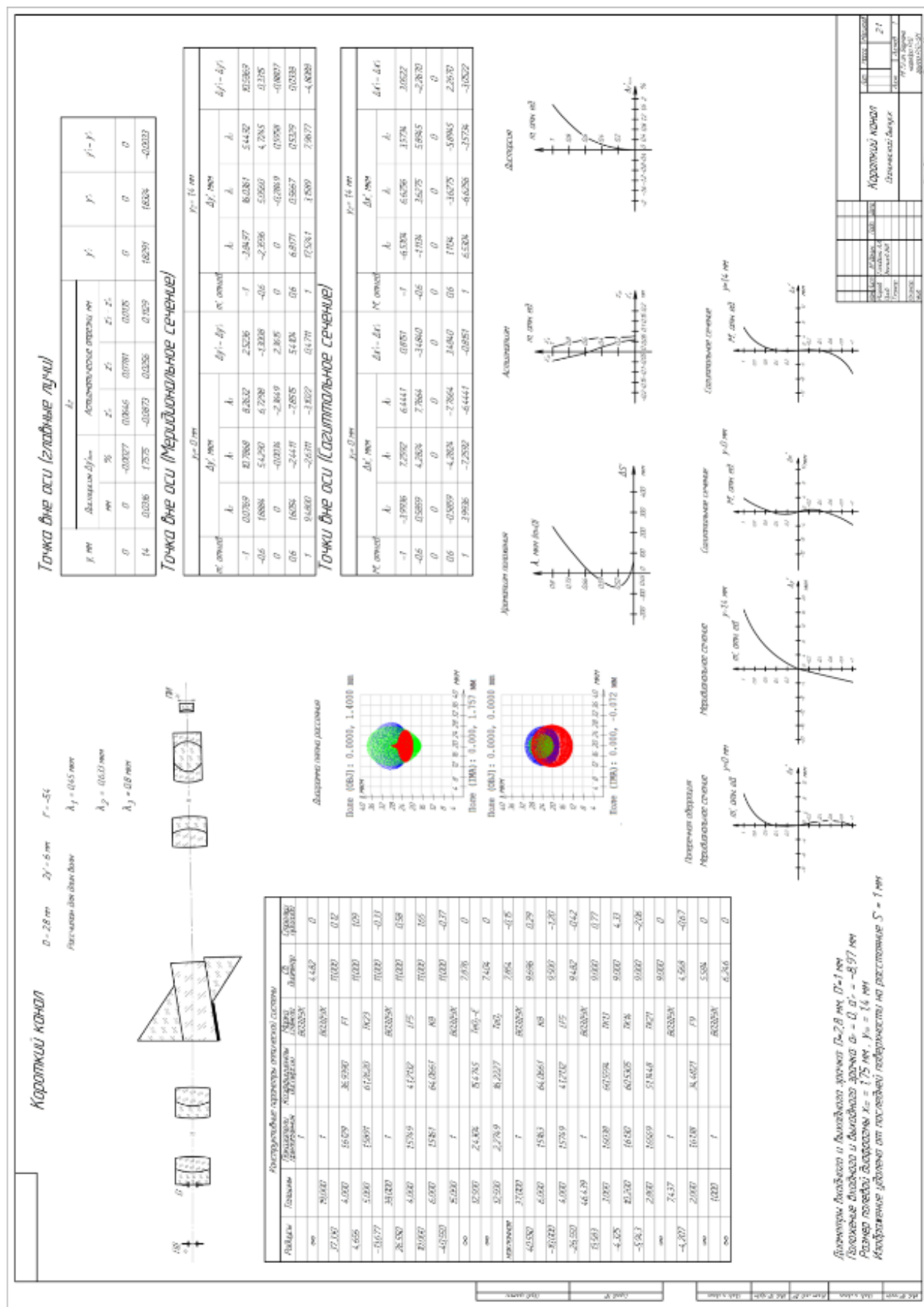


Рисунок А4 — Короткий канал. Оптический выпуск

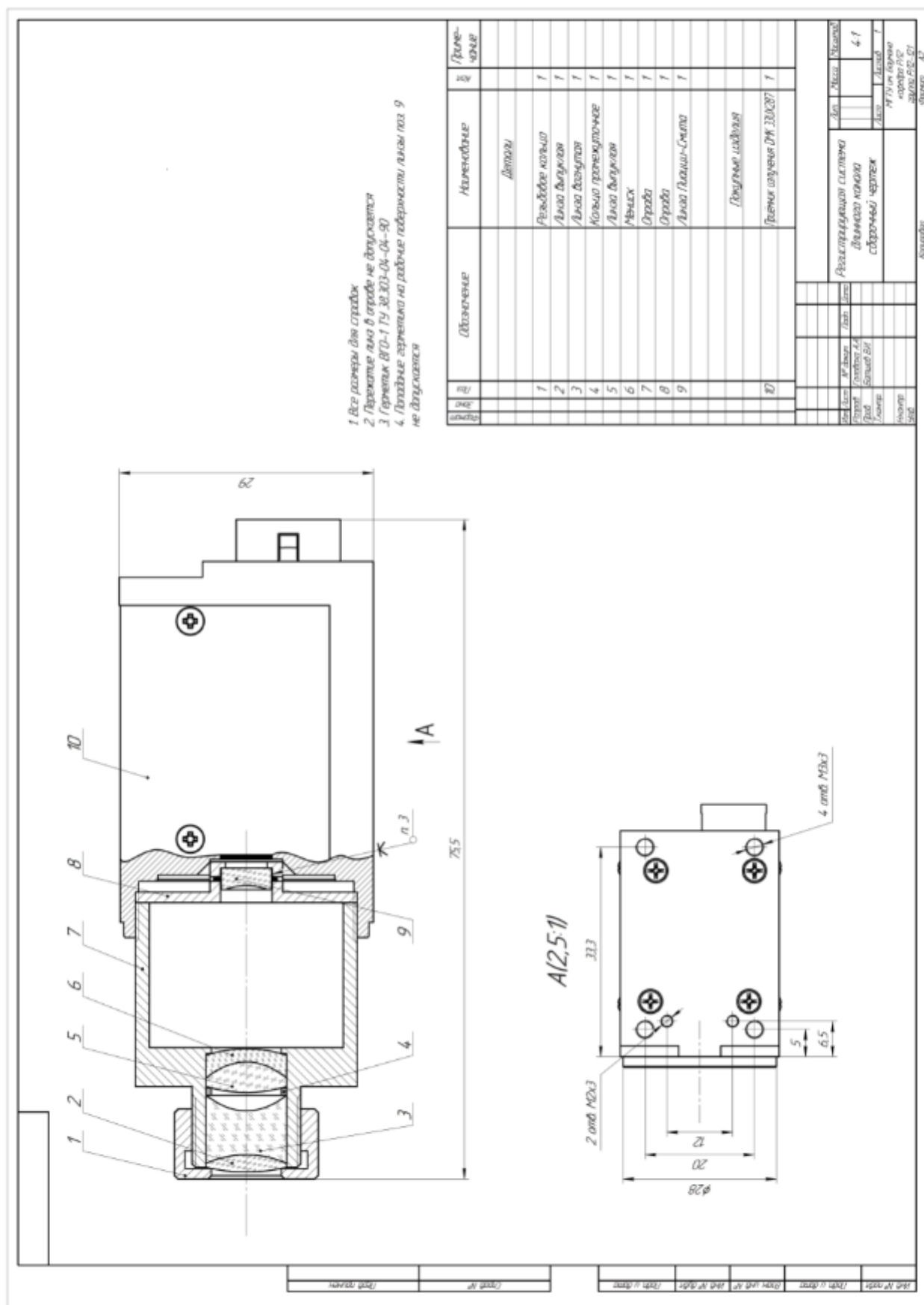


Рисунок А6 — Длинный канал. Сборочный чертеж

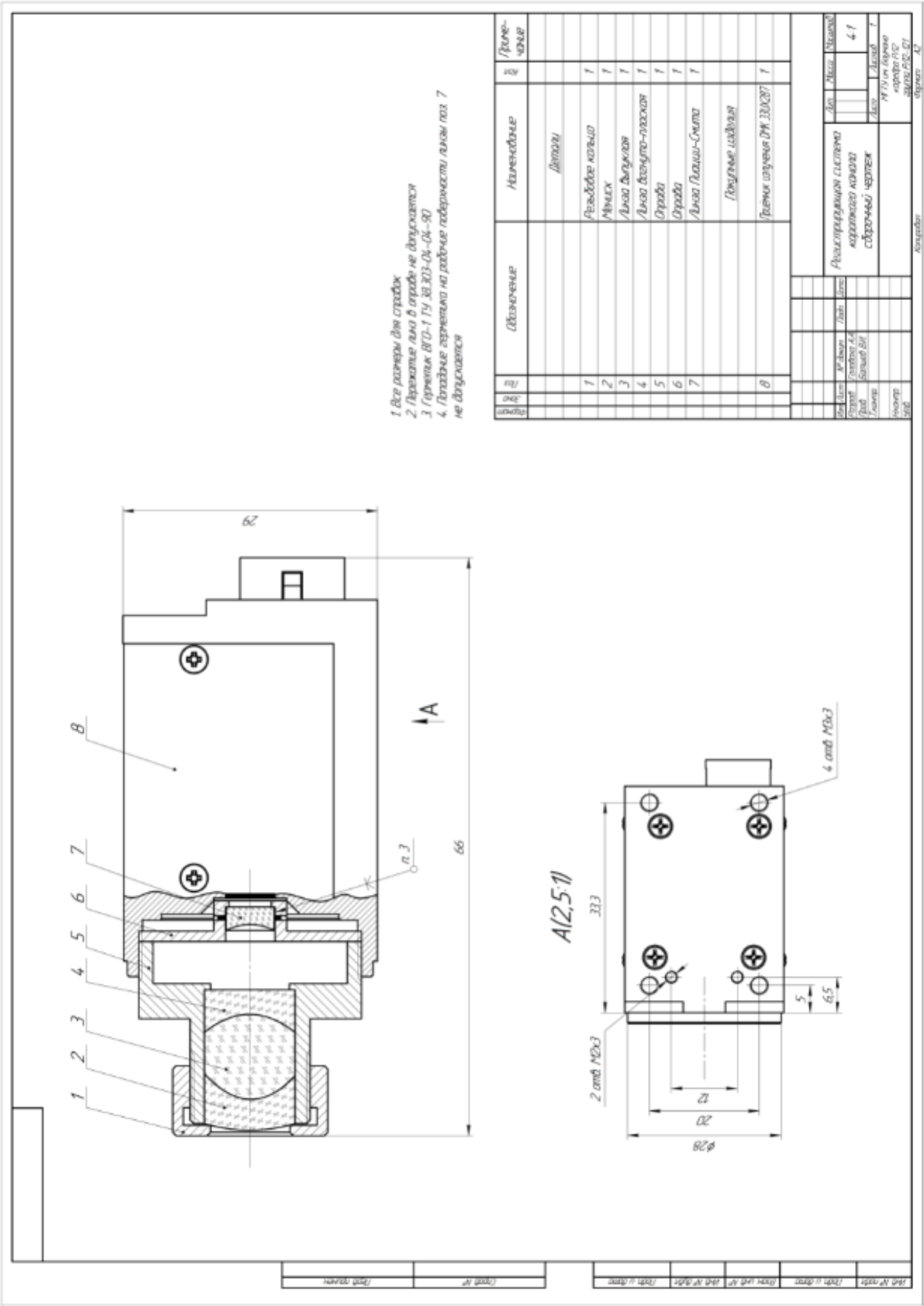


Рисунок А7 — Короткий канал. Сборочный чертеж

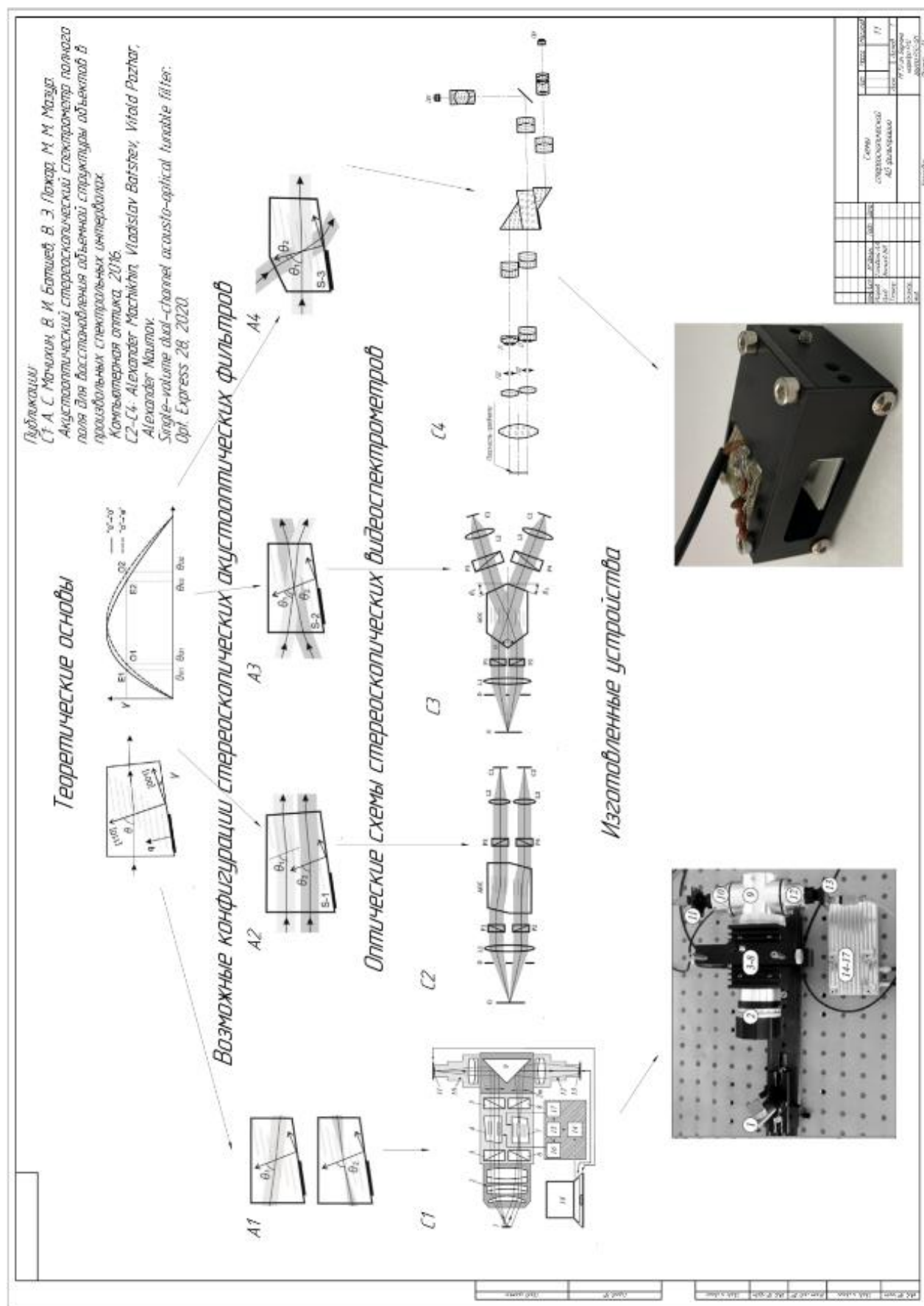


Рисунок А10 — Схемы стереоскопической АО фильтрации

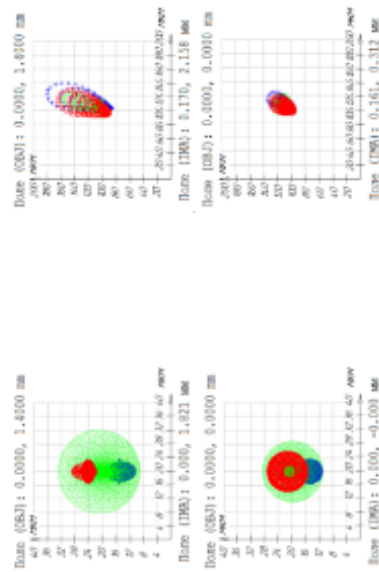
Листок шланговый

85.65

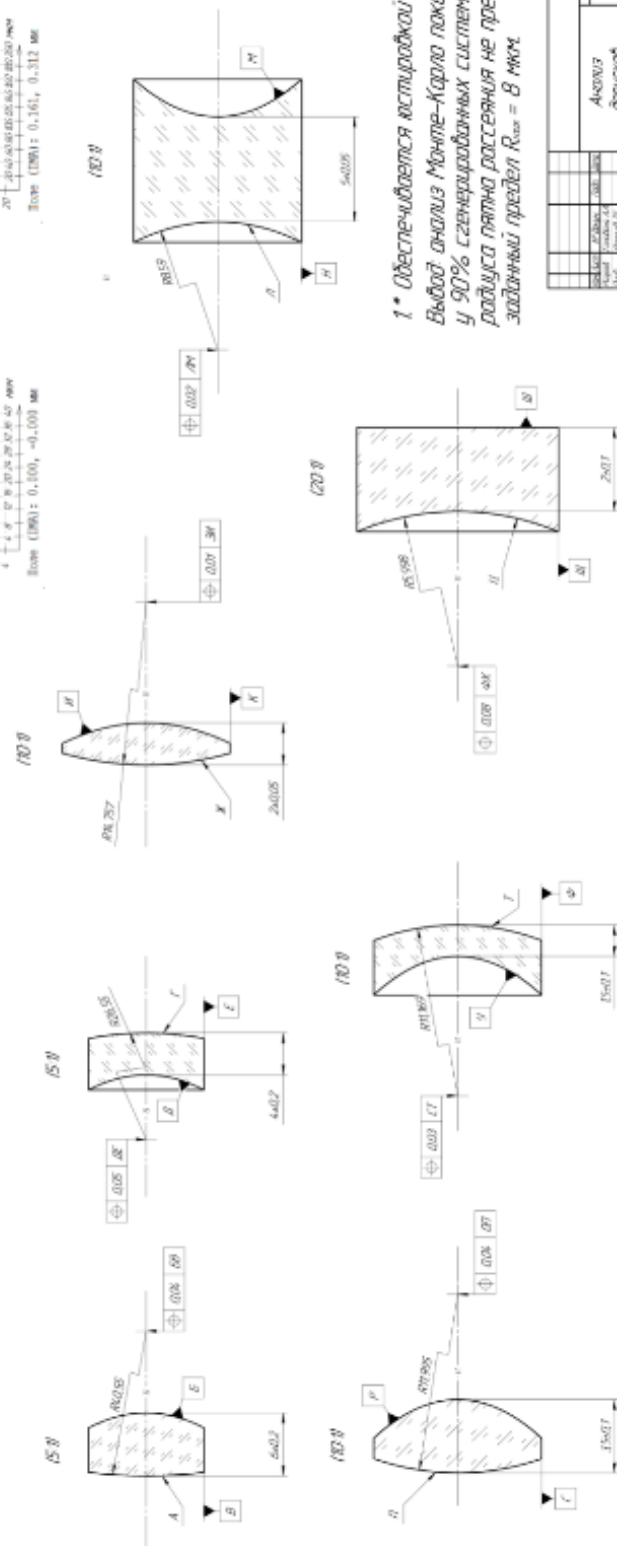
274.43

275.63

обращаю внимание
на то, что в начале
каждого дня вы
получаете задание
на день.



ЭСКУЗЫ №43

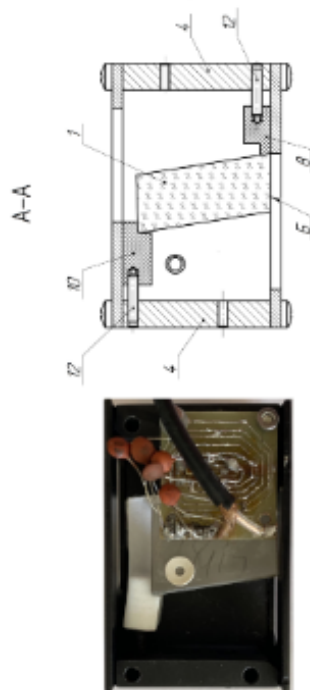


1* Изследователят установява, че
Въздух анализ Монте-Карло показва, че
у 99% генерираните системи СКЗ
радиуса петна разсеяния не надвишават
заданный предел $R_{\text{max}} = 8 \text{ мм}$.

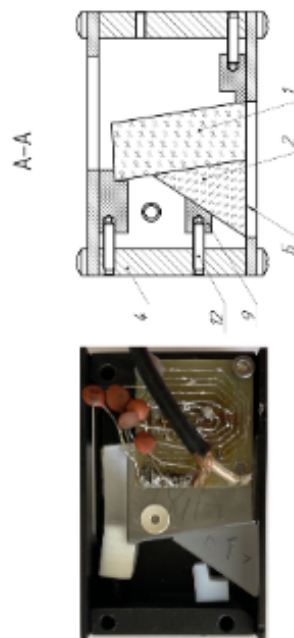
[illegible]

Последовательность сборки АО-фильтра

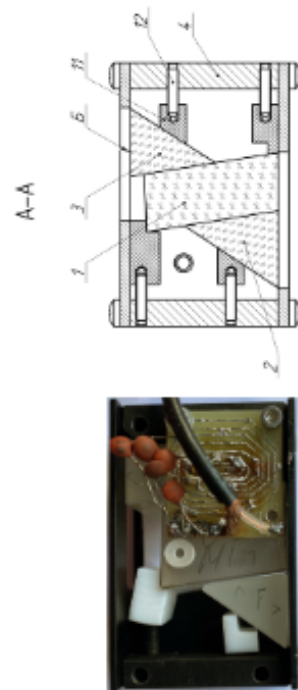
Общий вид АО-фильтра



- 1 Установить АО между паз. 1 и 2.
- 2 Вставить установочный болт паз. 12 в корпус паз. 4 и установить.
- 3 С помощью болта паз. 12 установить прижимные латки паз. 8 и 10.
- 4 Проверить АО между паз. 1 и 2.
- 5 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 6 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 7 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 8 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 9 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 10 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 11 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 12 Проверить латки паз. 8 и 10.



- 1 Установить прижимную латку паз. 12.
- 2 Вставить установочный болт паз. 12 в корпус паз. 4 и установить.
- 3 С помощью болта паз. 12 установить прижимные латки паз. 8 и 10.
- 4 Проверить АО между паз. 1 и 2.
- 5 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 6 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 7 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 8 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 9 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 10 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 11 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 12 Проверить латки паз. 8 и 10.



- 1 Установить прижимную латку паз. 12.
- 2 Вставить установочный болт паз. 12 в корпус паз. 4 и установить.
- 3 С помощью болта паз. 12 установить прижимные латки паз. 8 и 10.
- 4 Проверить АО между паз. 1 и 2.
- 5 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 6 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 7 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 8 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 9 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 10 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 11 Проверить латки паз. 8 и 10.
- 12 Проверить латки паз. 8 и 10.

№	Измерение	Назначение	Единица измерения
1	1	АО между	мм
2	2	Паз	мм
3	3	Паз	мм
4	4	Паз	мм
5	5	Паз	мм
6	6	Паз	мм
7	7	Паз	мм
8	8	Паз	мм
9	9	Паз	мм
10	10	Паз	мм
11	11	Паз	мм
12	12	Паз	мм
13	13	Паз	мм
14	14	Паз	мм
15	15	Паз	мм
16	16	Паз	мм
17	17	Паз	мм
18	18	Паз	мм
19	19	Паз	мм
20	20	Паз	мм
21	21	Паз	мм
22	22	Паз	мм
23	23	Паз	мм
24	24	Паз	мм
25	25	Паз	мм
26	26	Паз	мм
27	27	Паз	мм
28	28	Паз	мм
29	29	Паз	мм
30	30	Паз	мм
31	31	Паз	мм
32	32	Паз	мм
33	33	Паз	мм
34	34	Паз	мм
35	35	Паз	мм
36	36	Паз	мм
37	37	Паз	мм
38	38	Паз	мм
39	39	Паз	мм
40	40	Паз	мм
41	41	Паз	мм
42	42	Паз	мм
43	43	Паз	мм
44	44	Паз	мм
45	45	Паз	мм
46	46	Паз	мм
47	47	Паз	мм
48	48	Паз	мм
49	49	Паз	мм
50	50	Паз	мм
51	51	Паз	мм
52	52	Паз	мм
53	53	Паз	мм
54	54	Паз	мм
55	55	Паз	мм
56	56	Паз	мм
57	57	Паз	мм
58	58	Паз	мм
59	59	Паз	мм
60	60	Паз	мм
61	61	Паз	мм
62	62	Паз	мм
63	63	Паз	мм
64	64	Паз	мм
65	65	Паз	мм
66	66	Паз	мм
67	67	Паз	мм
68	68	Паз	мм
69	69	Паз	мм
70	70	Паз	мм
71	71	Паз	мм
72	72	Паз	мм
73	73	Паз	мм
74	74	Паз	мм
75	75	Паз	мм
76	76	Паз	мм
77	77	Паз	мм
78	78	Паз	мм
79	79	Паз	мм
80	80	Паз	мм
81	81	Паз	мм
82	82	Паз	мм
83	83	Паз	мм
84	84	Паз	мм
85	85	Паз	мм
86	86	Паз	мм
87	87	Паз	мм
88	88	Паз	мм
89	89	Паз	мм
90	90	Паз	мм
91	91	Паз	мм
92	92	Паз	мм
93	93	Паз	мм
94	94	Паз	мм
95	95	Паз	мм
96	96	Паз	мм
97	97	Паз	мм
98	98	Паз	мм
99	99	Паз	мм
100	100	Паз	мм

АО-фильтр

Рисунок А12 — АО-фильтр

