

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Лазерная техника и технология»

## ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-38 01 02  
«Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»  
специализации 1-38 01 02 01 «Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы»  
и 1-38 01 02 02 «Лазерные системы и технологии»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
в сфере высшего образования Республики Беларусь  
в области приборостроения*

Минск  
БНТУ  
2014

УДК [681.7+621.373.826]:378.147.091.313 (075.8)

ББК 34.9я7

Д46

Авторы:

*Р. В. Фёдорцев, В. О. Кузнецик, А. Ю. Луговик,  
Н. К. Артюхина, К. Н. Горбаченя*

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор *Н. В. Кулешов*;  
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор физико-математических наук,  
профессор, директор научно-технического центра «ЛЭМТ» БелОМО  
*А. П. Шкадаревич*; кандидат технических наук, начальник отдела ОАО  
«Пеленг» *А. М. Тареев*

**Дипломное** проектирование : учебно-методическое пособие для  
Д46 студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазер-  
ные приборы и системы» специализации 1-38 01 02 01 «Оптические и  
оптико-электронные приборы и комплексы» и 1-38 01 02 02 «Лазер-  
ные системы и технологии» / Р. В. Федорцев [и др.]. – Минск :  
БНТУ, 2014. – 293 с.

ISBN 978-985-550-049-1.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для студентов пятого кур-  
са и магистрантов, обучающихся на кафедре «Лазерная техника и технология» при-  
боростроительного факультета БНТУ.

Приведена последовательность действий и перечислены основные этапы работ,  
необходимые для успешного выполнения и защиты дипломных проектов, даются ме-  
тодики расчёта различных параметров оптических систем и механических компонен-  
тов приборов, указаны общие рекомендации по оформлению пояснительных записок  
к дипломному проекту и сопутствующего графического материала. Рассмотрены три  
различных подхода при разработке конструкторского и технологического проектов, а  
также научно-исследовательских работ по лазерной тематике и оптическим покры-  
тиям. Материал представлен в доступной для понимания и лаконичной форме, что  
позволяет студентам работать самостоятельно, а также в значительной степени об-  
легчает работу консультантам от предприятия и научным руководителям от вуза и  
грамотно формулировать для себя исходные цели проектирования и последовательно  
достигать конечного результата.

Издание может быть полезно для студентов четвёртого курса указанной кафе-  
дры при выполнении ими курсовых проектов, а также для студентов других приборо-  
строительных специальностей вузов.

УДК [681.7+621.373.826]:378.147.091.313 (075.8)

ББК 34.9я7

ISBN 978-985-550-049-1

© Белорусский национальный  
технический университет, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ПРОХОЖДЕНИЕ ПРЕДДИПЛОМНОЙ ПРАКТИКИ И ОФОРМЛЕНИЕ СОПУТСТВУЮЩИХ ДОКУМЕНТОВ.....	10
2. ПОДГОТОВКА К ГОСУДАРСТВЕННОМУ ЭКЗАМЕНУ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ.....	12
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЗАЩИТА ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ).....	13
3.1. Структура и содержание дипломного проекта (работы).....	13
3.2. Организационная последовательность действий студента-дипломника.....	17
4. КОНСТРУКТОРСКИЕ ПРОЕКТЫ.....	20
4.1. Литературный обзор.....	20
4.2. Техническое задание.....	25
4.2.1. Наименование и область применения.....	28
4.2.2. Основание для разработки.....	28
4.2.3. Требования назначения прибора.....	29
4.2.4. Состав образца прибора.....	30
4.2.5. Работа прибора (пункт вводится дополнительно при необходимости).....	30
4.2.6. Конструктивные требования.....	31
4.2.7. Требования экономного использования сырья, материалов, топлива и энергии.....	32
4.2.8. Требования стойкости к внешним воздействиям.....	32
4.2.9. Требования к надежности.....	33
4.2.10. Требования к технологичности.....	33
4.2.11. Требования безопасности и охраны окружающей среды.....	33
4.2.12. Требования к взаимозаменяемости и унификации.....	34
4.2.13. Требования эргономики и эстетики.....	35
4.2.14. Требования к патентной чистоте.....	35
4.2.15. Требования к составным частям продукции, исходным и эксплуатационным материалам.....	36
4.2.16. Условия эксплуатации (использования), требования к техническому обслуживанию и ремонту.....	36

4.2.17. Требования к маркировке и упаковке.....	37
4.2.18. Требования к транспортировке и хранению.....	37
4.2.19. Требования по метрологическому обеспечению.....	38
4.2.20. Экономические показатели.....	38
4.2.21. Стадии и этапы разработки.....	39
4.2.22. Порядок контроля и приемки результатов ОКР.....	40
4.3. Общие принципы расчета оптических систем.....	40
4.3.1. Габаритный расчет.....	42
4.3.2. Энергетический расчёт.....	46
4.3.3. Светотехнический расчёт.....	53
4.3.4. Расчёты на точность.....	59
4.3.5. Аберрационный расчёт.....	72
4.4. Этапы и последовательность выполнения компоновки прибора.....	74
4.5. Описание конструкции, устройство и принцип работы прибора.....	77
5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ.....	79
5.1. Литературный обзор.....	79
5.1.1. Обзор вариантов и сравнительный анализ существующих конструкций изделий с аналогичными оптическими изделиями.....	79
5.1.2. Назначение оптической детали в приборе и область ее применения.....	79
5.2. Технологические процессы изготовления призм, линз, зеркал и других оптических деталей.....	81
5.2.1. Выбор материала для изготовления оптической детали...	83
5.2.2. Обоснование выбора метода получения заготовки и расчёт её геометрических параметров.....	84
5.2.3. Выбор клеечного приспособления и расчёт количества заготовок в блоке.....	87
5.2.4. Расчёт и выбор основного технологического инструмента.....	93
5.2.5. Выбор марки и зернистости шлифующих и полирующих абразивных материалов.....	96
5.2.6. Применение вспомогательных материалов.....	101
5.2.7. Характеристика технологического оборудования.....	106
5.2.8. Описание маршрута обработки по основным и вспомогательным технологическим операциям.....	109

5.2.9. Выбор метода обработки оптических поверхностей....	109
5.2.10. Разновидности и правила оформления технологической документации.....	113
5.2.11. Контроль оптических и геометрических параметров оптической детали.....	138
5.3. Технологические процессы сборки и юстировки оптических приборов в целом и отдельных составных узлов....	152
5.3.1. Соединение оптических деталей посредством клея или оптического контакта.....	156
5.3.2. Составление схемы общей или узловой сборки.....	162
6. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ.....	168
6.1. Разработка технического задания.....	168
6.2. Литературный обзор.....	171
6.3. Методика, аппаратура и объекты исследования.....	171
6.4. Расчетная часть.....	177
6.4.1. Расчёт четырёхзеркального резонатора лазера.....	177
6.4.2. Расчёт термической линзы в активном элементе.....	181
6.5. Результаты исследований и вычислений.....	185
6.5.1. Результаты вычислений спектров сечений поглощения и стимулированного испускания.....	186
6.5.2. Результаты расчёта четырёхзеркального резонатора лазера.....	188
6.5.3. Результаты расчёта термической линзы кристалла.....	195
6.6. Проектирование многослойного интерференционного покрытия.....	197
6.6.1. Объекты и аппаратура для испытаний покрытий.....	198
6.6.2. Проведение измерений лазерной прочности и стойкости покрытий.....	200
6.6.3. Обработка результатов измерений.....	201
6.6.4. Создание покрытий с высокой лучевой прочностью....	201
6.6.5. Технологический процесс получения зеркала.....	204
6.6.6. Оценка качества поверхности подложек.....	205
6.6.7. Измерение параметров рассеяния и лазерной прочности зеркал.....	206
7. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА (РАБОТЫ).....	209
7.1. Оформление пояснительной записки.....	209
7.2. Оформление графического материала.....	213

7.2.1. Оформление технической документации.....	219
7.2.2. Требования к оформлению схемы оптической принципиальной .....	219
7.2.3. Требования к оформлению оптического выпуска на оптическую систему.....	220
7.2.4. Требования к выполнению чертежей оптических деталей.....	222
8. ПОДГОТОВКА К ОБУЧЕНИЮ В МАГИСТРАТУРЕ.....	224
8.1. Документы, представляемые в приёмную комиссию гражданами, поступающими в магистратуру.....	225
8.2. Сроки приёма документов.....	226
8.3. Вступительные испытания.....	226
8.4. Порядок зачисления в магистратуру.....	227
8.5. Правила составления индивидуального плана работы магистранта.....	229
8.6. Правила оформления и защита магистерских диссертаций в ГЭЖ.....	230
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	233
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	238
<i>Приложение А. Образец титульного листа отчёта о преддипломной практике.....</i>	<i>238</i>
<i>Приложение Б. Образец титульного листа пояснительной записки.....</i>	<i>239</i>
<i>Приложение В. Образец заполнения задания по дипломному проектированию.....</i>	<i>240</i>
<i>Приложение Г. Пример составления реферата дипломного проекта.....</i>	<i>243</i>
<i>Приложение Д. Последовательность подшивки и примерное содержание пояснительной записки конструкторского дипломного проекта.....</i>	<i>244</i>
<i>Приложение Е. Последовательность подшивки и примерное содержание пояснительной записки технологического дипломного проекта.....</i>	<i>247</i>
<i>Приложение Ж. Последовательность подшивки и примерное содержание пояснительной записки научно-исследовательской дипломной работы.....</i>	<i>250</i>

Приложение И. Пример оформления перечня условных сокращений и обозначений.....	252
Приложение К. Образец заполнения основной надписи на графической части дипломного проекта.....	254
Приложение Л. Перечень приборов и устройств с их цифровым обозначением. Классификатор ЕСКД. Классы 20, 40, 69.....	255
Приложение М. Пример оформления результатов абберационного расчёта.....	262
Приложение Н. Пример оформления габаритного чертежа «Прибор спектрального фотометрического контроля толщины».....	267
Приложение П. Пример оформления сборочного чертежа «Прицел тепловизионный "Quantum 38"».....	268
Приложение Р. Пример оформления оптической схемы ЛЗ «Стенд для контроля распределения плотности мощности лазерного излучения».....	269
Приложение С. Пример оформления чертежа «Объектив "Quantum 38". Абберационный выпуск» (ЛЗ – лист 2).....	270
Приложение Т. Пример оформления чертежа оптической детали «Призма».....	271
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ У.....</b>	<b>272</b>
У1. Пример оформления титульного листа технологического процесса.....	272
У2. Пример оформления маршрутной карты технологического процесса.....	273
У3. Пример оформления операционной карты технологического процесса.....	275
У4. Пример оформления карты эскизов технологического процесса.....	276
У5. Пример оформления карты технологического процесса (завод «Сфера»).....	277
У6. Пример оформления карты технологического процесса (СП «Цейсс-БелОМО»).....	278
Приложение Ф. Пример оформления плаката в научно-исследовательской дипломной работе.....	279

<i>Приложение Ц. Пример составления доклада по конструкторскому дипломному проекту.....</i>	280
<i>Приложение Ш. Пример составления доклада по технологическому дипломному проекту.....</i>	283
<i>Приложение Щ. Пример составления доклада по научно-исследовательской дипломной работе.....</i>	287
<i>Приложение Э. Образец выписки с заседания Совета ПСФ по утверждению темы магистерской диссертации и научного руководителя.....</i>	291
<i>Приложение Ю. Образец титульного листа магистерской диссертации.....</i>	292



## ВВЕДЕНИЕ

После успешного завершения зимней экзаменационной сессии студентам 5-го курса в течение 10-го семестра (все даты уточняются на кафедре или у секретаря ГЭК) *необходимо*:

- пройти и защитить преддипломную практику (02 февраля–07 марта);

- подготовиться и сдать государственный экзамен по специальности (09 марта–22 марта);

- выполнить дипломное проектирование (22 марта–05 июня);

- пройти предварительную защиту дипломного проекта (работы) (11 июня–14 июня);

- защитить дипломный проект (работу) (25–27 июня);

- получить у секретаря кафедры (Алейниковой Н.М.) обходные листы, подписать их в графах таблицы соответствующих подразделений БНТУ и сдать в деканат;

- получить диплом о высшем образовании с присвоением квалификации «инженер по приборостроению» в деканате (01–06 июля).

Даты приведены ориентировочно на текущий период и могут меняться в последующие годы.

Авторы выражают особую благодарность бывшему преподавателю кафедры кандидату физико-математических наук, доценту Ляшко Ольге Михайловне за электронную версию рукописи «Памятка секретарю ГЭК» (1998 г.), которая была положена в основу написания данного учебно-методического пособия, а также выпускникам кафедры «Лазерная техника и технология»: Толстику Н.А. Змитровичу И.И., Дидковскому Я.И., Белоусовой О.Д., Каролик Е.П., Черенко Д.В. и многим другим бывшим студентам за предоставленные материалы лучших дипломных проектов и работ.

## 1. ПРОХОЖДЕНИЕ ПРЕДДИПЛОМНОЙ ПРАКТИКИ И ОФОРМЛЕНИЕ СОПУТСТВУЮЩИХ ДОКУМЕНТОВ

Преддипломная практика выполняется в соответствии с утвержденной рабочей программой практики, на основании заключённых договоров (УМУ) и приказа на практику по БНТУ.

До начала преддипломной практики (в период с 1 декабря по 10 января) студент должен определиться с выбором:

– **предприятия**, на котором будет проходить преддипломную практику;

– **темы** дипломного проекта или работы;

– **руководителя** от кафедры «Лазерная техника и технология» (далее – руководитель);

– **консультанта** от предприятия (далее – консультант).

Указанную выше информацию студент сообщает заведующему кафедрой Кулешову Н.В.

Во время зимней экзаменационной сессии студентам, направленным на предприятия, требуется оформить пропуск. Для этого необходимо сделать и передать в отдел кадров две цветные фотографии размером 4 × 6 см (без уголка).

До 31 января по БНТУ выходит приказ об утверждении тем дипломов, в котором назначаются руководитель и консультант дипломного проекта (работы).

Дипломнику необходимо лично убедиться в том, что договор (два экземпляра) на прохождение преддипломной практики составлен и передан на предприятие. В случае его отсутствия выпускник должен информировать об этом секретаря ГЭК (Луговика А.Ю.).

Один подписанный экземпляр договора возвращается на кафедру.

В период прохождения преддипломной практики, которая длится, как правило, пять недель (с 09.02 по 07.03), студент:

– собирает материалы, соответствующие тематике выполняемых работ на предприятии (как правило, этот материал становится основой для I раздела ПЗ – литературный обзор);

– участвует в оформлении задания на дипломное проектирование (уточняет основные технические характеристики изделия, укрупненно формирует содержание разделов будущей пояснительной записки (ПЗ) дипломного проекта (ДП) или дипломной работы (ДР));

– совместно с руководителем от БНТУ и консультантом от предприятия подбирает прибор-аналог по основным параметрам и назначению или существующий типовой технологический процесс на изготовление (сборку) подобного изделия;

– определяет специфику и объём разработки.

Студентам, проходящим *практику вне города Минска*, необходимо получить гарантийное письмо с соответствующего предприятия, а также письменное одобрение заведующего кафедрой и декана факультета, на основании которого оформляется приказ по БНТУ, далее в бухгалтерии (корп. 1) выдается *командировочное удостоверение*.

Перед началом практики (1 или 2 февраля) всем выпускникам необходимо пройти *инструктаж по технике безопасности* с регистрацией в кафедральном журнале по ТБ и ОТ.

Преддипломная практика завершается представлением руководителю основных материалов, необходимых для выполнения дипломного проекта (работы), например:

- литературного обзора существующих методов измерения;
- сравнения приборов аналогичного типа и с подобными техническими характеристиками разрабатываемого изделия;
- оптической схемы прибора или его узлов;
- технических условий или руководства по эксплуатации прототипа;
- программы и методики испытаний аналогичных изделий;
- сборочных чертежей и чертежей общего вида на отдельные узлы и компоненты и др.

**Защита** преддипломной практики осуществляется в **трёхдневный срок** со дня её окончания и предусматривает сдачу отчёта, оформленного по требованиям, установленным в разделе 7, аналогичным при оформлении ПЗ проекта или работы и титульного листа по образцу (прил. А).

## 2. ПОДГОТОВКА К ГОСУДАРСТВЕННОМУ ЭКЗАМЕНУ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Программа государственного экзамена включает перечень вопросов по четырем базовым дисциплинам кафедры:

– «*Конструирование оптических приборов*»;

– «*Теория и расчёт оптических систем*»;

– «*Лазеры и управление характеристиками лазерного излучения*»;

для студентов специализации 1-38 01 02 01 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

– «*Проектирование оптико-электронных приборов*»;

для студентов специализации 1-38 01 02 02 «Лазерные системы и технологии»

– «*Лазерные технологии в обработке материалов и медицине*».

Перечень вопросов, выносимых на экзамен, получает лично староста группы в период 1–10 марта у секретаря ГЭК (А.Ю. Луговика), или перечень может быть выслан на электронный ящик группы (при его наличии).

Консультации к госэкзамену по вышеуказанным дисциплинам проводятся в период с 10 по 18 марта (за неделю до начала экзамена). С уточнённым графиком их проведения можно ознакомиться на стенде кафедры или у секретаря ГЭК.

В день начала госэкзамена на дверях аудитории 602, корп. 17, вывешивается список студентов группы в последовательности их захода в аудиторию. Первые шесть человек по списку приступают к подготовке с 8.00. Госэкзамен начинается в 9.00 при появлении 2/3 состава ГЭК:

председатель – Шкадаревич Алексей Петрович (доктор физико-математических наук, профессор; директор научно-производственного ЧУП «ЛЭМТ»);

секретарь – Луговик Алексей Юрьевич (старший преподаватель);  
члены ГЭК:

– Кулешов Николай Васильевич (доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой ЛТТ);

– Артюхина Нина Константиновна (доктор технических наук, профессор);

– Фёдорцев Ростислав Валерьевич (кандидат технических наук, доцент);

– Тареев Анатолий Михайлович (кандидат технических наук, начальник отдела ОАО «Пеленг»).

Билет включает четыре вопроса (по одному из каждой дисциплины).

Во время экзамена допускается пользоваться нормативной и справочной литературой, которая размещается на первом столе.

Среднее время ответа одного студента по билету на дополнительные вопросы составляет примерно 20 мин.

### **3. ВЫПОЛНЕНИЕ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЗАЩИТА ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ)**

#### **3.1. Структура и содержание дипломного проекта (работы)**

К дипломному проектированию допускаются студенты, успешно выполнившие учебный план и сдавшие государственный экзамен по специальности. Дипломный проект (работа) выполняется студентом в течение времени, отведенного на дипломное проектирование рабочим учебным планом специальности.

Согласно [1]: *дипломный проект* – выпускная квалификационная работа, предназначенная для объективного контроля степени сформированности знаний, умений и навыков решать задачи по видам профессиональной деятельности, установленным образовательным стандартом специальности, и предусматривающая *синтез физического или идеального объекта проектирования (системы в широком значении, устройства, технологического процесса, компьютерной программы и т. п.)*, который оптимально отвечает требованиям задания на выпускную квалификационную работу.

*Дипломная работа* – выпускная квалификационная работа студента, предназначенная для объективного контроля степени сформированности, знаний, умений и навыков решать задачи по видам профессиональной деятельности, установленным образовательным стандартом специальности, и предусматривающая *проведение анализа и разработки актуальных вопросов, проблем в соответствующей области знаний* согласно требованиям задания на выпускную квалификационную работу.

Форма выполнения – дипломный проект или работа – определяется руководителем совместно с консультантом, а также с учётом мнения студента-дипломника и включает в себя **графический материал** (не менее **шести листов формата А1**) и **пояснительную записку** к дипломному проекту (работе) (не менее 80 с).

Дипломный проект (работа) является инженерной разработкой, тематика которой относится к разработке комплекта конструкторской документации на изделие, технологических процессов изготовления, сборки изделия (узлов) либо содержит элементы научного исследования. В графической части РАБОТЫ могут отсутствовать конструкторские чертежи, в ПРОЕКТЕ основной графический материал это – чертежи (допускается один плакат). По содержанию пояснительной записки дипломный проект и работа также отличаются (табл. 3.1).

Титульный лист оформляется по установленному образцу (прил. Б).

**Задание на дипломное проектирование** (прил. В) заполняется в **трех экземплярах**, которые подписываются студентом, руководителем и заведующим кафедрой (*печать второй страницы выполнять на одном листе с оборотом!*).

**Номер приказа «Об утверждении тем**, закреплении руководителей и консультантов дипломных проектов работ» **и дату** его утверждения необходимо уточнить **у секретаря кафедры** или секретаря ГЭК. Срок сдачи студентом законченного проекта (работы) совпадает с первым заседанием рабочей комиссии по рассмотрению дипломных проектов (работ) на кафедре. Далее задания распределяются следующим образом:

– 1-й экземпляр – подшивается в пояснительную записку после титульного листа;

– 2-й экземпляр – отдаётся секретарю ГЭК на кафедру;

– 3-й экземпляр (контрольный) – остается у дипломника или отдаётся руководителю проекта (работы) от кафедры.

В дипломной работе **Литературный обзор** может быть весьма значительным как по объему, так и по глубине проработки материала, особенно это касается работ физического плана. В литературном обзоре должен приводиться очерк основных этапов развития научных представлений по рассматриваемой проблеме. На основе анализа работ, ранее выполненных другими исследователями, проводится обоснование цели и задач дипломной работы и определяется их место в разработке данной проблематики.

Таблица 3.1

Примерная структура дипломных проектов (работ) в зависимости от тематики и направления предприятия или организации

Конструкторский		Технологический		Исследовательский	
Перечень основных разделов	Число страниц	Перечень основных разделов	Число страниц	Перечень основных разделов	Число страниц
Титульный лист	1	Титульный лист	1	Титульный лист	1
Задание на ДП	1	Задание на ДП	1	Задание на ДР	1
Реферат	1	Реферат	1	Реферат	1
Содержание	2	Содержание	2	Содержание	2
Введение	1-2	Введение	1-2	Введение	2-3
Литературный обзор	До 25	Литературный обзор	До 25	Литературный обзор	До 25
Развернутое техническое задание на прибор	До 8	Расчетная часть	До 15	Методика, аппаратура и объекты исследований	До 15
Расчетная часть	До 20	Разработка технологического процесса		Методика эксперимента	До 15
Этапы и последовательность компоновки прибора	До 10	на изготовление отдельных оптических деталей	До 20	Расчетная часть	До 10
Устройство и принцип работы прибора	До 10	на сборку изделия	До 15	Результаты исследований и их анализ	До 25
Охрана труда	До 10	Охрана труда	До 10	Охрана труда	До 10
Экономика	До 10	Экономика	До 10	Экономика	До 10
Заключение (выводы)	1-2	Заключение (выводы)	1-2	Заключение (выводы)	1-2
Список использованных источников	До 5	Список использованных источников	До 3	Список использованных источников	До 5
Перечень принятых условных сокращений	1	Перечень принятых условных сокращений	1	Перечень принятых условных сокращений	1
Приложения	До 10	Приложения	До 20	Приложения	До 5

В разделе **«Методика исследований»** либо **«Методика эксперимента»** следует подробно описать особенности методов расчета или экспериментальных исследований, применяемую аппаратуру, обосновать целесообразность их использования. Рекомендуется проводить оценку погрешности измерений, описание свойств исследуемых материалов.

На плакатах, отражающих *методическую часть и результаты исследовательской работы*, могут быть представлены блок-схемы экспериментальных установок, оптические схемы, основные расчетные формулы, графики, абберационный выпуск, могут быть приведены конструкторские чертежи.

В раздел **«Результаты исследования и их анализ»** приводят подробное описание полученных результатов и анализ их особенностей. Результаты исследований необходимо излагать сжато, логично и аргументированно. Студент должен выделить то новое, что он вносит в разработку проблемы (задачи) или развитие конкретных направлений в соответствующей отрасли науки, и сравнить свои результаты с аналогичными результатами отечественных и иностранных исследователей.

В разделе дипломного проекта **«Этапы и последовательность компоновки прибора»** приводится структурная схема прибора с обоснованием оптимального расположения его узлов и механизмов. Данная компоновка должна учитывать исходные требования, установленные в ТЗ, и существующие варианты конструкции приборов, проанализированные в литературном обзоре.

В разделе **«Устройство и принцип работы прибора»** детально описывается принцип действия оригинальных разработанных компонентов, а также покупных и заимствованных изделий, приводится их функциональная взаимосвязь. Этот раздел может содержать технологические схемы сборки прибора и его компонентов.

В технологическом проекте вводится раздел **«Разработка технологического процесса»**, включающий типовые технологические процессы изготовления деталей, входящих в оптический прибор или один из его механизмов.

В разделе **«Расчетная часть»** представляют расчёты как прибора в целом, так и его составных механических и оптических узлов либо расчёт блоков и приспособлений для обработки и контроля деталей или юстировки оптических компонентов. Например: энер-



гетический, точностной, габаритный, абберационный, кинематический, расчёт резонаторов, систем охлаждения и т. п. Для дипломного проекта необходимым является наличие оптических, конструкторских и технологических расчётов.

**Приложения** содержат результаты абберационных расчетов, вспомогательные расчётные схемы, листинги компьютерных программ, спецификации к чертежам различного вида, проспекты (изделия), справочные листки (технических) данных (изделия) (data sheet) покупных компонентов, операционные эскизы и карты технологического процесса, характеристики технологического, контрольно-измерительного и вспомогательного оборудования.

В **графической части** представляют чертежи и плакаты оптического прибора или его основных узлов следующего содержания:

- сравнительный лист с изображением 3D-моделей (фотографий) предыдущих образцов и разработанного прибора (узла);
- таблица, в которой отражены технические параметры прибора, например, до и после модернизации;
- чертежи общего вида, сборочные, рабочие чертежи деталей (деталировка) с различной технологией их изготовления;
- оптическая схема прибора (сборочного компонента) и графики абберационного выпуска;
- блок-схемы технологических процессов (сборки, изготовления и контроля), операционные эскизы технологического процесса;
- интерферограммы поверхностей ОД, маски обрабатываемых инструментов и т. п.;
- схемы и фотографии экспериментальных установок, графики устойчивости и моды резонатора, спектры поглощения, люминесценции, усиления, временные диаграммы интенсивности люминесценции, населенностей энергетических уровней и т. д. (для дипломной работы).

### **3.2. Организационная последовательность действий студента-дипломника**

На кафедре предусмотрена периодическая индивидуальная отчетность каждого дипломника перед руководителем по этапам выполнения студентом дипломного проекта или работы. Как правило, *в конце апреля* (29.04–31.04) проводится *1-я предварительная процентовка*, которая в среднем предполагает готовность проекта

на уровне 20–30 % ПЗ и 20–30 % графического материала. В конце мая (30.05–31.05) проводится **2-я окончательная процентовка**, которая предполагает готовность проекта на уровне 70–80 % ПЗ и 80–90 % графического материала. К этому времени уже должны быть подписаны разделы по охране труда и экономике. Данные о степени готовности студента руководитель от университета в свою очередь предоставляет заведующему кафедрой. Затем сведения озвучиваются на заседании кафедры.

В случае непосещения дипломником консультаций без уважительных причин, а также значительном отставании его работы от графика кафедра информирует об этом декана факультета и рассматривает вопрос переноса защиты на декабрь текущего года (на платной основе).

**Предзащита** является генеральной репетицией защиты проекта и проводится в период с 11 по 14 июня. К предзащите (заседанию рабочей комиссии) должны быть готовы и подписаны: пояснительная записка, чертежи и плакаты (на форматах А1, допускается использование тонкой бумаги), подготовлен доклад (прил. Ц, Ш, Щ) (на данном этапе можно читать с листа).

При написании пояснительной записки и доклада студент должен стремиться стилистически грамотно излагать свои мысли и представленный материал.

**Доклад** строится по следующей схеме:

- в зависимости от назначения – краткое описание предшествующей конструкции, существующие проблемы и состояние дел по данному вопросу;
- цель дипломного проекта (работы);
- суть проделанной работы (личный вклад): выполненные конструкторские и технологические разработки, проведенные научные исследования и т. д.;
- основные результаты и достижения, их сравнительный анализ;
- заключение: актуальность выполненной работы, перспектива использования разработки и пр.

Рабочая комиссия кафедры на предзащите заслушивает сообщение студента по дипломному проекту (работе) и определяет соответствие дипломного проекта (работы) заданию и готовность студента к защите. **В случае успешной защиты студенту выдается направление на рецензию.**

Рецензент выбирается руководителем и является специалистом по указанной тематике проекта. Рецензент считается независимым экспертом по представленному материалу, поэтому имеет право на личное общение со студентом в отношении результатов прочтения пояснительной записки и изучения графической части для снятия спорных вопросов.

Студентам обеих специализаций, не прошедших предзащиту, даётся время на устранение замечаний, как правило в течение одной недели, и назначается дополнительный день для их повторного заслушивания на заседании рабочей комиссии.

Если заведующий кафедрой на основании выводов рабочей комиссии не считает возможным допустить студента к защите, этот вопрос рассматривается на заседании кафедры с участием руководителя дипломного проекта (дипломной работы). При отрицательном заключении кафедры протокол ее заседания представляется декану факультета, который не допускает студента к защите и делает представление ректору об отчислении студента из университета.

За *три рабочих дня* до защиты дипломного проекта (работы) студент **должен представить** заведующему кафедрой следующий комплект документов:

- *пояснительную записку* дипломного проекта (работы), подписанную студентом, руководителем, консультантом от предприятия, консультантом по охране труда, консультантом по экономической части и нормоконтролёром (Р.В. Фёдорцевым);

- *отзыв руководителя* на дипломный проект (работу) (с указанием оценки, подписью руководителя, заверенной в деканате или отделе кадров БНТУ);

- *рецензию* на дипломный проект (работу), составленную в соответствии с рекомендациями, приведенными в направлении, и с указанием оценки, а также подписью, заверенной на предприятии или в организации, где работает рецензент. *При наличии оценки ниже 10 (десяти) баллов письменно указать причины занижения оценки!*

- *второй экземпляр задания* на дипломный проект (работу);

- полный *комплект графического материала* дипломного проекта (работы), листы которого окончательно утверждаются подписью заведующего кафедрой, забирается с собой.

## 4. КОНСТРУКТОРСКИЕ ПРОЕКТЫ

Конструкторские проекты обычно составляют 60 % от общего объема дипломного проектирования, выполняемого в текущем году. В связи с обязательным распределением студентов-бюджетников по окончании вуза в организации как с государственной, так и частной формой собственности конструкторские дипломные проекты выполняются на следующих минских предприятиях оптического профиля: ОАО «Пеленг», ММЗ им. С.И. Вавилова, ЧУП «ЛЭМТ», реже УП «КБТЭМ-ОМО», ЗАО «Солар ЛС», ЗАО «Солар ТИИ», ЗАО «Спектроскопия, оптика и лазеры – авангардные разработки» (СОЛАР), СП ООО «Лотис-ТИИ» ООО, ИП «БелтексОптик» (Yukon) (г. Лида), НПЛ «Ситела ООО», ООО «Регула», ЗАО «Янсар» и др. Студенты, обучающиеся на платной форме (по согласованию с руководством предприятия), могут самостоятельно выбрать себе место выполнения дипломного проектирования.

Конструкторский проект строится по двум схемам (прил. Д):

1. Модернизация существующего изделия (оптического прибора, комплекса, установки, контрольно-измерительного стенда, технологического оборудования и пр.).

2. Разработка новой конструкции изделия (с аналогичным перечнем из п.1) или отдельной его части.

Во введении обычно приводят краткий исторический очерк рассматриваемого вопроса, расставляют акценты по актуальности темы проектирования, можно ввести общие терминологические определения понятий, которые в последующем будут встречаться в ПЗ.

### 4.1. Литературный обзор

Литературный обзор включает результаты патентного поиска, отображающие последние научно-технические разработки в данной области и позволяющие провести сравнительную характеристику изделий по аналогам и прототипам оптического прибора.

Обзор рекомендуется выполнять следующим образом.

Вначале описывается область использования или применения изделия. Например, прибор для измерения высоты нижней границы облаков. В первом пункте рассматривают структуру атмосферы земли с общим описанием (на схеме) нижнего, среднего и верхнего ярусов облаков, их видов, высоты над уровнем моря, наличия различных примесей и т. п.

Во втором пункте рассматриваются существующие (известные) структурные схемы вариантов построения прибора; приводится их сравнительный анализ, указываются достоинства и недостатки. Например, для рассматриваемого выше прибора существуют схемы построения с отдельным и комбинированным каналами для передающего и приёмного излучения; с узким или широким пучком зондирующего сигнала (рис. 4.1, *а* и *б*); с применением зеркальных объективов, построенных по схемам Максутава и Ньютона, и т. п.

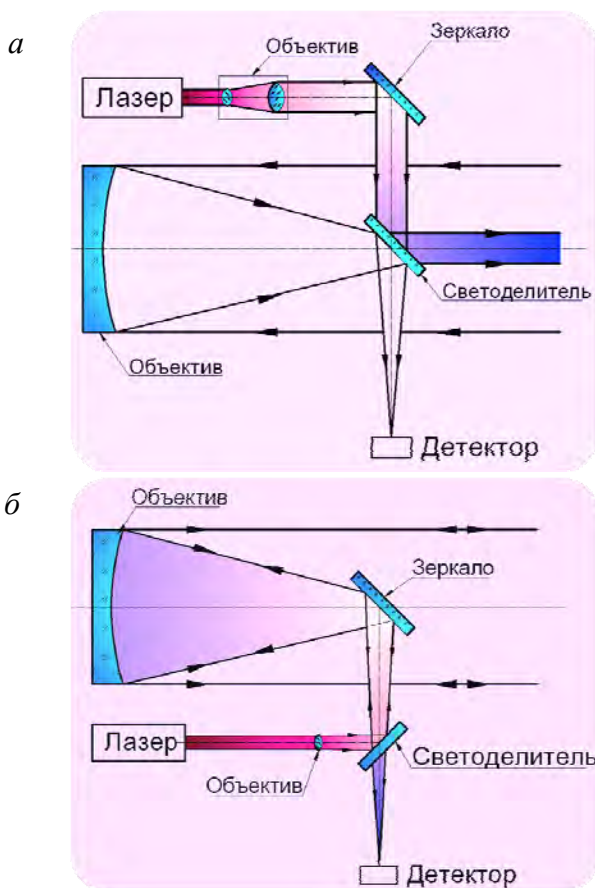


Рис. 4.1. Коаксиальные схемы зондирования атмосферы:  
*а* – узким и *б* – широким лазерным пучком

В третьем пункте приводится описание моделей приборов, серийно или эксклюзивно выпускаемых различными зарубежными и отечественными производителями. На рисунках показывают прибор в осевом сечении, с указанием позиций основных узлов и механизмов (рис. 4.2).

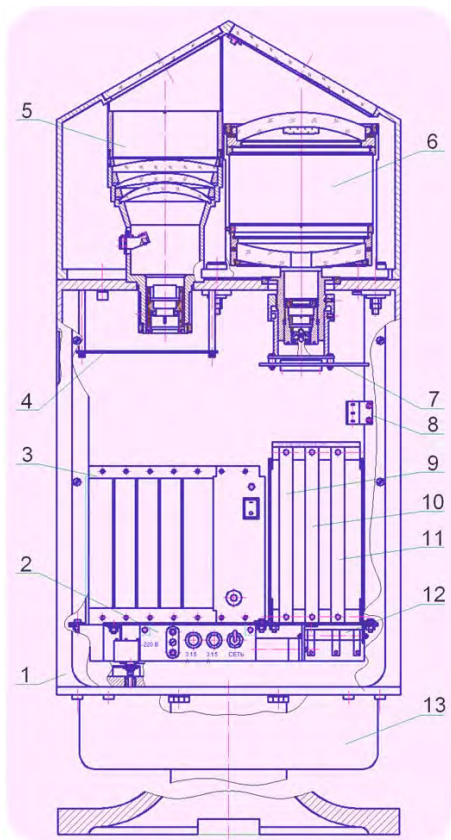


Рис. 4.2. Прибор для измерения ВНГО мод «СД-01-2000»:  
 1 – корпус; 2 – вставки плавкие 3, 15 А; 3 – электронный блок; 4 – плата передатчика; 5 – передающая ОС; 6 – приемная ОС; 7 – плата устройства фотоприемного;  
 8 – кнопки несанкционированного вскрытия прибора;  
 9 – плата стабилизатора напряжения + 15, +5 В; 10 – стабилизатор напряжения +15, +27 В; 11 – плата устройства контроля и обогрева;  
 12 – обогреватель; 13 – крышка защитная

Как правило, рассматриваемые приборы являются аналогами и прототипами изделия, разрабатываемого в данном дипломном проекте.

**Аналогом** считается техническое решение, уже известное на момент проектирования и содержащее признаки, наиболее близкие (сходные) по сущности и результату, достигаемому при его использовании. В дальнейшем новый оптический прибор и аналог сопоставляются по эффективности функционирования. Считается, что разрабатываемое изделие должно устранять недостатки своего предшественника.

К **прототипу** относится конкретное известное устройство, наиболее близкое по технической сущности и достигаемому положительному эффекту, т. е. наиболее близкий аналог. Прототипом считается такой аналог, который содержит наибольшее количество существенных признаков (или один основной), также имеющих место и в новом проектируемом приборе.

В крайнем случае, при отсутствии конструкторской документации, допускается приводить внешний вид изделий или их фотографии (*в хорошем разрешении!*). Далее кратко описывается принцип работы прибора. В тексте ПЗ дополнительно указываются отличительные особенности изделия.

Литературный обзор, как правило, заканчивается самостоятельным составлением сводной таблицы, в которой указываются общие сравнительные технические характеристики рассмотренных изделий (табл. 4.1). Эта же таблица вместе со схемами или внешним видом оптических приборов может выноситься на **первый плакат** или габаритный чертеж (прил. Н).

Технические характеристики приборов для измерения высоты нижней границы облаков

Наименование параметра	ДОЛ-2	8340-Cloud Height Indicator Laser Ceilometer	Пеленг СД-01-2000	CL-31 VAISALA
Диапазон измерений ВНГО (Н), м	7,5–3000	4–12200	10–2000	15–7500
Количество измеряемых высот нижних границ облаков	–	До четырех, измеряет высоты и глубины облаков	–	Не менее двух
Разрешающая способность, м	7,5	4	10	15
Один цикл измерения, с	15	От 30 до 180	–	От 2 до 120
Источник излучения	Полупроводниковый импульсный лазер	Импульсный InGaAs диод	GaAs полупроводниковый диод	Лазер на основе арсенида индия-галлия (InGaAs)
Длина волны, нм	–	905±10	900	905
Диапазон рабочих температур, °С	От –50 до +50	От –40 до +60	От –50 до +50	От –40 до +60
Габаритные размеры (длина, ширина, высота), мм	370 × 530 × 960	686 × 229 × 406	1200 × 340 × 310	1190 × 335 × 325
Источник питания	187–242 В, 50 Гц	95–240 В, 47–64 Гц	(220 В, 50 Гц)±10 %	(230±23) В, (50,0±1,5) Гц
Наличие встроенной диагностики	Есть	Есть	Есть	Есть
Точность измерения для различных высот (Н), м	Н от 0 до (100±10) м; Н от 100 до 3000 м± ± (0,05Н+5)	±6 м	Н от 15 до (100±10) м; Н от 100 до 2000 м± ±10 % от Н	Н от 15 до (100±10) м; Н от 100 до 7500 м± ±10 % от Н
Масса, кг	52	27,5	35	31



## 4.2. Техническое задание

Техническое задание (ТЗ) является исходным документом для разработки изделия и документации на него. Оно составляется разработчиком (*согласовывается с руководителем предприятия*) на основе технических требований заказчика (*который утверждает документ*) в рамках договора о сотрудничестве или контракта, а также на основе результатов научно-исследовательских и экспериментальных работ, ранее проведенных в данном направлении. При необходимости ТЗ дополнительно проходит стадию согласования с третьей вышестоящей (головной) организацией (*например, с Государственным военно-промышленным комитетом*).

**Техническое задание** в дипломном проекте **студент составляет самостоятельно** на основании предоставленных ему материалов, **под руководством консультанта с предприятия** и согласует окончательную версию с руководителем от БНТУ.

В соответствии с требованиями ТКП 424–2012 (02260) [2] ТЗ в общем случае содержит следующие разделы и пункты:

4.2.1. **«Наименование и область применения (использования)»**, где даются наименование и условное обозначение изделия, его классификация (классификационные признаки) и краткая характеристика области применения.

4.2.2. **«Основание для разработки»**, в котором указываются полное наименование и номер регистрации документов: договор или контракт, государственная научно-техническая программа (ГНТП) Республики Беларусь или Российской Федерации, на основании которых разрабатывается изделие, организация, утвердившая документ и дата утверждения. Например: Задание на дипломное проектирование, выданное кафедрой «Лазерная техника и технология», утверждённое 16 февраля 2012 г. заведующим кафедрой Кулешовым Н.В.

4.2.3. **«Разработчик»** – указывается точное наименование предприятия, разрабатывающего принципиальную схему будущего изделия, выполняющего предварительные исследования и осуществляющего выпуск конструкторской и технологической документации и т. п.

4.2.4. **«Изготовитель»** – указывается точное наименование предприятия, на производственной базе которого будет осуществлён выпуск изделия (прибора).

4.2.5. **«Цель и назначение разработки»** – определяется эксплуатационное и функциональное назначение, перспективность разрабатываемого изделия.

4.2.6. **«Источник финансирования»** – указывается пропорциональный объём денежных средств: внебюджетных (собственные средства) организации разработчика или заказчика, а также бюджетных (государственные средства), в рамках конкретной государственной научно-технической программы Республики Беларусь, (например «Приборы, средства измерений и техническая диагностика») или Российской Федерации.

4.2.7. **«Технические требования»** содержит технические требования и нормы, определяющие эксплуатационные характеристики изделия и его показатели качества, соблюдение которых при проектировании обязательно.

В ТЗ, как правило, включаются прогнозируемые показатели технического уровня и качества, а для продукции на экспорт – показатели патентной чистоты и патентоспособности.

4.2.7.1. Требования назначения.

4.2.7.2. Состав продукции.

4.2.7.3. Конструктивные требования.

4.2.7.4. Требования экономного использования сырья, материалов, топлива и энергии.

4.2.7.5. Требования стойкости к внешним воздействиям.

4.2.7.6. Требования надёжности.

4.2.7.7. Требования технологичности.

4.2.7.8. Требования безопасности и охраны окружающей среды.

4.2.7.9. Требования совместимости.

4.2.7.10. Требования к взаимозаменяемости и унификации.

4.2.7.11. Требования эргономики.

4.2.7.12. Требования к патентной чистоте.

4.2.7.13. Требования к составным частям продукции (при их наличии), исходным и эксплуатационным материалам.

4.2.7.14. Условия эксплуатации (использования), требования к техническому обслуживанию и ремонту (при необходимости).

4.2.7.15. Требования к маркировке и упаковке.

4.2.7.16. Требования к транспортированию и хранению.

4.2.7.17. Требования к метрологическому обеспечению.

4.2.7.18. Дополнительные требования (например, по возможности получения комплектующих изделий и других обоснованных причин).

При выборе параметров необходимо указывать диапазон и граничные предельно допустимые или оптимальные численные значения, без наложения жёстких ограничений на конструктора и проектируемую систему. Рекомендуется использовать наречия «не более» (например, касательно погрешности  $\pm 5'$ ; энергопотребления – 20 Вт; габаритных размеров 170 × 120 × 50 мм или массы 0,5 кг) или «не менее» (например, угловое поле  $2\omega - 30^\circ$ ; дальность видения  $L - 1500$  м; энергия в импульсе  $W - 80$  Дж) и т. д. Однако существует ряд параметров, которые в любом случае должны быть заданы однозначно. Например, фокусное расстояние (объектива)  $f' = 300$  мм; лазерная среда – Nd:YAG; рабочая длина волны (лазера)  $\lambda = 1,570$  мкм; частота следования импульсов: 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 Гц; панель управления – тактильная, 8-строчный дисплей; выходной интерфейс – mini USB, тип A и т. п.

4.2.8. **«Экономические показатели»** – указывают лимитную цену изделия, ориентировочную экономическую эффективность, срок окупаемости затрат, предполагаемую годовую потребность на изделие, а также экономические преимущества изделия по сравнению с аналогами или прототипами. Например, годовая потребность – 1000 изделий, лимитная цена – 200 у. е. (*определяется в экономической части проекта*).

4.2.9. **«Стадии и этапы разработки»** – обычно оформляются в виде таблицы, в графах которой указывают номер и наименование этапа разработки, сроки их выполнения, а также перечень отчётных документов, подлежащих разработке.

4.2.10. **«Порядок контроля и приёмки, материалы, предъявляемые по окончании отдельных стадий (этапов) и работы в целом»** – на основе календарного плана составляется таблица, в которой приводится перечень документов, подлежащих согласованию и утверждению на отдельных стадиях проектирования, требования к приёмке работы, изготовлению и испытанию опытных образцов.

Изменения в утверждённое ТЗ могут вноситься на любом этапе разработки продукции на основании предложений заказчика или по согласованию с ним. Дополнение к ТЗ, как правило, состоит из вводной части, в которой указывают обоснование вносимых изменений, и изменяемых разделов (в виде таблицы из двух колонок), в которых приводят номера и содержание изменяемых (отменяемых) пунктов ТЗ в старой и новой редакции.

После выпуска дополнения на титульном листе ТЗ делают запись:  
«Действует с дополнением» \_\_\_\_\_ дата его утверждения.  
номер дополнения

В качестве ТЗ допускается использовать другой документ, заменяющий его (договор, контракт, протокол, решение и т. д.), имеющий достаточное количество исходных данных для разработки продукции и признанный заказчиком и разработчиком.

Общие требования и порядок разработки документации устанавливаются для КД по ЕСКД; для ТД по ЕСТД; для ТУ в ТКП 1.3 [3].

Ниже приведен пример, составления развёрнутого технического задания на телевизионный прибор с вариообъективом.

#### ***4.2.1. Наименование и область применения***

Телевизионный прицел с вариообъективом предназначен:

- для обеспечения стрельбы из пушки объекта при выходе из строя основных прицелов;
- выдачи телевизионного видеосигнала через коммутатор на видеосигнальное устройство (ВСУ) командира и наводчика для отображения на экранах: наблюдаемой местности в дневное и сумеречное время суток; прицельной марки; значения дальности;
- автоматического ввода угла прицеливания при вводе дальности с учетом типа и подтипов боеприпасов в положение прицельного знака;
- для отслеживания полев зрения прибора положения пушки за счет механической передачи.

#### ***4.2.2. Основание для разработки***

Основанием для разработки является задание на дипломное проектирование, выданное ОАО «Пеленг» и утвержденное 16 февраля 2012 ПСФ БНТУ.

### **4.2.3. Требования назначения прибора**

4.2.4.1. Прицел должен обеспечивать дальность распознавания цели типа «танк–бортовая проекция» при МДВ свыше 10 км и контрасте цели 0,3;

- днем при освещенности более 5000 лк – не менее 2000 м;
- в сумерках при освещенности более 3 лк – не менее 1000 м.

4.2.4.2. Прицел должен обеспечивать минимальную дальность фокусировки на объект 100 м.

4.2.4.3. В прицеле должен быть реализован режим ручного ввода дальности кнопками установки дальности с дискретностью 20 м.

4.2.4.4. В прицеле должен быть реализован режим ручного ввода дальности методом «база на цели 2,4 м» путем совмещения базовой линии с нижней линией контура цели и подводом дальномерной линии к верхней линии контура цели. Подвод дальномерной линии осуществляется кнопками установки дальности.

Погрешность измерения на дальности 2000 м при неподвижном состоянии объекта – не более 20 м (уточняется по результатам разработки).

4.2.4.5. Прицел должен обеспечивать автоматический ввод угла прицеливания в положение прицельного знака для типов и подтипов боеприпасов с учетом замеренной дальности.

4.2.4.6. При работе прицел должен передавать на экран ВСУ следующую служебную информацию:

- прицельный знак;
- выбранный тип боеприпаса;
- введенная (замеренная) дальность.

4.2.4.7. Прицел должен работать:

- от бортовой сети объекта;
- автономного источника питания совместно с ВСУ наводчика в течение не менее 40 мин. При включении прибора, в случае отсутствия напряжения бортовой сети, должен обеспечиваться автоматический переход на питание от автономного источника. При наличии напряжения бортовой сети должна обеспечиваться подзарядка автономного источника питания.

4.2.4.8. Должна обеспечиваться выверка прицела:

- в плоскости ВН путем разворота зеркала механизмом выверки на устройстве передачи угла не менее  $\pm 14^\circ$ ;

– в плоскости ГН путем смещения прицельного знака на экране монитора в диапазоне не менее  $\pm 15$  угл. минут (точная).

4.2.4.9. Поле зрения телевизионного канала – 3 и 9° (по результатам разработки).

4.2.4.10. Углы наведения зеркала в вертикальной плоскости должны быть от минус 7 до плюс 17°.

4.2.4.11. Ошибка передачи угла от пушки к зеркалу в диапазоне углов наведения пушки от минус 5 до плюс 15° должна быть не более 1 т.д. (3,6 угл. мин).

4.2.4.12. При работе от бортовой сети танка при включении обогрева стекла ПНМ должен обеспечиваться обогрев защитного стекла блока зеркала прицела-дублера.

4.2.4.13. На панели управления прицела должен быть расположен тумблер включения прибора под откидной пломбируемой крышкой, кнопки для ввода дальности, типа боеприпаса и выверки прибора в горизонтальной плоскости,

4.2.4.14. Время готовности прицела к работе – не более 1 мин.

#### ***4.2.4. Состав образца прибора***

Встраиваемый в башню прицел включает в себя:

- блок оптико-механический (БОМ);
- блок зеркала (БЗ);
- блок электронный (БЭ);
- автономный источник питания (АИ);
- панель управления прибором (ПУ) – 2 шт.;
- комплект монтажных частей.

#### ***4.2.5. Работа прибора (пункт вводится дополнительно при необходимости)***

Работа ПДТ должна осуществляться в двух режимах:

4.2.5.1. При работе от автономного источника питания (основной):

– автономная работа прицела и ВСУ наводчика – в течение не менее 40 мин;

– отслеживание в поле зрения прицела положения пушки за счёт механической передачи;

– стрельба наводчиком через прицел с использованием ВСУ с ручных приводов;

– возможность измерения дальности через прицел методом «с базой на цели» и введение угла прицеливания в положение прицельного знака при управлении с панелей управления прибора наводчика. Замер дальности производится при неподвижном состоянии объекта.

Коммутация цепей выходного телевизионного видеосигнала и питания ВСУ наводчика от автономного источника питания осуществляется через коммутатор. Прорабатывается возможность индикации времени, оставшегося до разряда автономного источника питания при работе без бортовой сети.

4.2.5.2. При работе от бортовой сети объекта, стабилизации башни и пушки (дополнительный):

– наведение от основного пульта наводчика, при включении режима с места наводчика или от основного пульта командира, при включении с места командира;

– стрельба командиром через прибор с использованием ВСУ;

– стрельба наводчиком через прибор с использованием ВСУ;

– возможность измерения дальности через прицел методом «с базой на цели» и введение угла прицеливания в положение прицельного знака при управлении с панелей управления прибора командира или наводчика (по выбору).

#### ***4.2.6. Конструктивные требования***

4.2.6.1. Масса прицела не должна превышать 20 кг (уточняется по результатам проектирования).

4.2.6.2. Прицел должен работать от бортовой сети объекта с напряжением  $27 \pm 2/5$  В или от автономного источника питания.

4.2.6.3. Ток, потребляемый изделием, – не более 2 А.

4.2.6.4. Прицел должен обеспечивать возможность работы с ним в индивидуальных средствах защиты.

4.2.6.5. Лакокрасочные покрытия прицела должны обладать устойчивостью к моющим средствам, топливу, маслам в соответствии с ГОСТ В 20.57.309–76.

*Ниже приведен вариант дополнительного введения ряда требований к лазерному технологическому комплексу на базе мощного промышленного СО<sub>2</sub>-лазера.*

#### **4.2.7. Требования экономного использования сырья, материалов, топлива и энергии**

В конструкции составных частей ЛТК должны использоваться недефицитные материалы с широкой сырьевой базой.

Конструкция должна предусматривать максимальное использование стандартных и нормализованных деталей, узлов, красок, смазок.

Допускается использование импортных комплектующих электронных элементов, приборов и устройств в технически обоснованных случаях.

Конструкция должна предусматривать изготовление деталей и заготовок, полученных прогрессивными методами, а также использование станков с ЧПУ.

#### **4.2.8. Требования стойкости к внешним воздействиям**

4.2.8.1. ЛТК должен сохранять работоспособность в пределах срока службы в любое время суток при работе в макроклиматических районах с умеренно холодным климатом – УХЛ по ГОСТ 15150–69. «Машины, приборы и другие технические изделия». Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

4.2.8.2. Устойчивость по ГОСТ 12997–84. «Изделия государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). Общие технические условия»:

к механическому воздействию – группа N3 при условии: частота от 5 до 80 Гц;

климатическому воздействию – группа D3 по ГОСТ 12997–84 при условии:

- предельных температур от +10 до +40°;
- относительной влажности воздуха не более 80 % (при температуре +40 °С);
- степень защиты оболочки корпуса от проникновения пыли и воды – IP32 категории 2 по ГОСТ 14254–96.

4.2.8.3. ЛТК должен сохранять работоспособность при воздействии на него:



- электростатических разрядов (степень жесткости 2, критерий качества функционирования А) СТБ ГОСТ Р 51317.4.2–2001;
- наносекундных импульсных помех (степень жесткости 2, критерий качества функционирования А) СТБ ГОСТ Р 51317.4.4–2001;
- динамических изменений напряжения электропитания (степень жесткости 1, критерий качества функционирования А) СТБ ГОСТ Р 51317.4.11–2001.

#### ***4.2.9. Требования к надежности***

- 4.2.9.1. Продолжительность работы – 16 ч/сут.
- 4.2.9.2. Вероятность безотказной работы за 8 ч – не менее 100 %.
- 4.2.9.3. Период профилактического обслуживания – 500 ч.
- 4.2.9.4. Средняя наработка на отказ – не менее 10000 ч (уточняется расчетным методом).
- 4.2.9.5. Полный средний срок службы – не менее 2,5 года.
- 4.2.9.6. Среднее время восстановления работоспособного состояния ЛТК – не более 48 ч.
- 4.2.9.7. Гарантийный срок эксплуатации – не менее 12 месяцев.

#### ***4.2.10. Требования к технологичности***

- 4.2.10.1. Разработка устройства должна производиться с учётом требований ГОСТ 14.201–83 «Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования».
- 4.2.10.2. Конструкция прибора должна быть разработана с учётом требований единичного производства.
- 4.2.10.3. Допускается применение комплектующих изделий и материалов иностранного производства.

#### ***4.2.11. Требования безопасности и охраны окружающей среды***

Предъявляемые к ЛТК общие требования безопасности для обслуживающего персонала и охраны окружающей среды должны соответствовать требованиям:

- 4.2.11.1. ГОСТ 12.2.007.0–75. «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности»:

- конструкция прибора должна отвечать требованиям защиты от поражения током класса I;

- электрическая прочность изоляции первичных цепей питания должна быть достаточной, чтобы в течение одной минуты выдерживать без пробоя испытательное напряжение 1500 В частотой 50 Гц.

4.2.11.2. ГОСТ 12.1.002–84. «Система стандартов безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах».

4.2.11.3. ГОСТ 12.1.004–91. «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования»:

- вероятность возникновения пожара не должна быть более 3.

4.2.11.4. ГОСТ 12.1.040–83. «Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения»:

- по опасности генерируемого излучения ЛТК относится к 4-му классу;

- правила безопасной эксплуатации должны быть изложены в руководстве по эксплуатации;

- к работе с ЛТК допускаются только лица, которые имеют средства индивидуальной защиты от воздействия лазерного излучения – защитные очки и маски со светофильтрами;

- вокруг рабочей зоны должны быть установлены защитные экраны из бесцветного или безосколочного стекла БС-15, непрозрачные для длины волны лазерного излучения 10,6 мкм;

- доступ на участок лазерной сварки посторонним лицам должен быть ограничен.

4.2.11.5. ГОСТ 12.1.031–81. «Система стандартов безопасности труда. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения»:

- предельно допустимый уровень лазерного излучения для роговицы глаза и кожи (длина волны 10,6 мкм и длительность импульса 2 мс) – 2 Дж/см<sup>2</sup>.

#### **4.2.12. Требования к взаимозаменяемости и унификации**

4.2.12.1. В конструкции устройства должно быть предусмотрено использование максимального числа стандартных унифицированных и покупных составных узлов и частей.

4.2.12.2. Конструкция ЛТК должна обеспечить взаимозаменяемость составных частей прибора, а также вышедших из строя электронных блоков и модулей.

#### ***4.2.13. Требования эргономики и эстетики***

4.2.13.1. Эстетические и эргономические требования к ЛТК должны соответствовать ГОСТ 12.2.049–80 «Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие эргономические требования».

4.2.13.2. Конструкция прибора должна обеспечить удобный доступ к ремонтируемым блокам.

4.2.13.3. Внешний вид ЛТК должен соответствовать тенденциям современного приборостроения и обладать организованностью объёмно-пространственной структуры, рациональностью формы и целостностью композиции.

#### ***4.2.14. Требования к патентной чистоте***

4.2.14.1. Должны быть проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011–96 «Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения».

4.2.14.2. Научно-технический задел по теме проекта должен быть патентно чистым и способным к патентной охране в Республике Беларусь и за рубежом.

4.2.14.3. Патентная чистота на методы изготовления и конструктивные решения должна быть обеспечена в отношении Республики Беларусь и других стран, куда возможна поставка изделий, а также передача технической, информационной и другой документации.

4.2.14.4. Обладающая коммерческим потенциалом совместная интеллектуальная собственность, полученная в ходе работы, должна быть защищена патентами в соответствии с международным законодательством.

#### **4.2.15. Требования к составным частям продукции, исходным и эксплуатационным материалам**

4.2.15.1. При использовании прокачного CO<sub>2</sub>-лазера мощностью выше 200 Вт подача рабочих газов осуществляется через газовые редукторы от газобаллонной рампы со сжатыми газами. Редукторы по техническим характеристикам должны соответствовать применяемым газам.

Качество рабочих газов должно удовлетворять требованиям:

- N<sub>2</sub> или смесь N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> (9:1) – по ТУ-6-16-2956–92;
- CO<sub>2</sub> – 99,5 % по ГОСТ 8050–85;
- He – 99,9 % по ТУ-51-940–80.

4.2.15.2. Расход сжатого воздуха для прокачки – до 150 л/мин. Класс загрязненности воздуха по ГОСТ 17433–80 – не грубее 1. Давление сжатого воздуха на входе в головку – от порога срабатывания датчика давления 0,05 до 0,4 МПа.

4.2.15.3. Силовое электропитание лазерной установки должно удовлетворять следующим требованиям:

- 220/380 В, частотой 50 Гц;
- отклонение напряжения в сети – не более 10 %;
- пропускная способность силового кабеля должна составлять не менее 2 кВт;
- пропускная способность силового кабеля для питания вспомогательных систем и технологического лазера должна составлять не менее 150 % от номинальной потребляемой мощности.

#### **4.2.16. Условия эксплуатации (использования), требования к техническому обслуживанию и ремонту**

4.2.16.1. ЛТК предназначен для эксплуатации на открытом воздухе при следующих параметрах:

- пределы температуры – от +10 до +40°;
- относительная влажность воздуха – не более 80 %;
- атмосферное давление – от 84 до 106,7 кПа (630–800 мм рт. ст.).

4.2.16.2. Обязательным является наличие контура заземления сечением не менее 60 мм<sup>2</sup> с возможностью подсоединения к нему гибкого медного провода сечением не менее 16 мм<sup>2</sup> (для лазера).

4.2.16.3. ЛТК не предназначен для эксплуатации во взрывоопасных и пожароопасных зонах.

4.2.16.4. На расстоянии менее 40 м от ЛТК не должно быть источников повышенных вибраций, таких как движение тяжелого автотранспорта и прочее.

4.2.16.5. На стадии ОКР должны быть определены периодичность и объем технического обслуживания.

#### ***4.2.17. Требования к маркировке и упаковке***

4.2.17.1. На кожухе излучателя должны быть установлены предупреждающие таблички, содержащие информацию о виде и мощности излучения лазеров в соответствии с ГОСТ 12.4.026–2001 «Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний».

4.2.17.2. Места и способ нанесения транспортной маркировки, размеры маркировочных ярлыков, манипуляционных знаков и надписей, а также маркировка транспортной тары должны соответствовать ГОСТ 14192–96 «Маркировка грузов».

4.2.17.3. Упаковку составных узлов ЛТК выполнить в соответствии с ГОСТ 26032–83 «Система унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов ГСП. Общие технические условия».

4.2.17.4. На корпусах составных частей ЛТК: СО<sub>2</sub>-лазера, He-Ne-лазера, орбитальной головки, видеокамеры, контактном и опорном устройствах, устройстве подачи инертного газа, дозаторе проволоки, блоке управления должны быть закреплены пластины с надписью, указывающей десятичные номера изделий и их заводские номера.

4.2.17.5. На соединительных силовых и информационных кабелях должны крепиться маркировочные бирки, на разъемах гравированы соответствующие адреса подключения.

#### ***4.2.18. Требования к транспортировке и хранению***

Транспортирование допускается любыми видами крытых транспортных средств: воздушным, железнодорожным транспортом и водным путем (кроме моря) в сочетании их между собой и с автомобильным транспортом.

Наличие в ЛТК хрупких оптических компонентов и точных отражающих металлических зеркал требует к нему бережного отношения, исключая тряску и удары.

Условия транспортирования в части механических факторов – согласно группе Ж по ГОСТ 23216.

#### ***4.2.19. Требования по метрологическому обеспечению***

На этапе разработки РКД должен быть определен и обоснован оптимальный состав измеряемых (контролируемых) параметров, отражающих техническое состояние прибора.

Средства измерений и контроля, применяемые при производстве, техническом обслуживании и испытаниях, должны быть утвержденных типов, обеспечены методами и средствами поверки и удовлетворять ОТГ 7.1.2–81.

Испытательное оборудование должно быть аттестовано. В случае необходимости разработки оригинальных средств измерений или испытательного оборудования они должны пройти испытания до начала проведения испытаний.

Применяемые методики выполнения измерений при испытаниях должны обеспечивать требуемую точность измерений прибора.

Разрабатываемая конструкторская документация на всех этапах проектирования должна подвергаться метрологической экспертизе в соответствии с требованиями МИ 2267–2000.

#### ***4.2.20. Экономические показатели***

На этапе разработки необходимо выполнить технико-экономическое обоснование комплекса, в числе которого должна быть предусмотрена оценка следующих показателей:

- полная себестоимость изготовления опытного образца ЛТК в цеховых условиях;
- отпускная цена изделия с НДС;
- экономический эффект.

При разработке и производстве должна обеспечиваться экономия и рациональное использование дефицитных материалов.

#### 4.2.21. Стадии и этапы разработки

Номер этапа [2]. Наименование и содержание работ	Продолжительность этапа работ	ОНТД и продукция
1	2	3
1. Разработка эскизного проекта 1.1. Разработка структурных схем и математической модели 1.2. Моделирование работы ЛТК в различных режимах 1.3. Уточнение требований ТЗ на ОКР по результатам моделирования	01.09.2011 – 30.10.2011	1. Пояснительная записка 2. Математическая модель (на оптическом носителе) 3. Дополнение к ТЗ
2. Разработка технического проекта	01.11.2011 – 30.12.2011	Пояснительная записка, чертеж общего вида
3. Разработка КД (составных блоков)	01.01.2012 – 30.03.2012	Комплект КД с literой «О»
4. Проведение патентных исследований. Разработка и утверждение проекта технических условий	01.04.2012 – 30.05.2012	ТУ
5. Изготовление опытного образца ЛТК	01.06.2012 – 30.08.2012	Опытный образец – 1 шт.
6. Разработка программного обеспечения по обработке и передаче данных (для устройства управления)	01.09.2012 – 30.10.2012	1. Программы и методики испытаний 2. Акт испытаний опытного образца
7. Разработка программы и методики предварительных испытаний Проведение предварительных испытаний опытного образца	01.11.2012 – 30.12.2012	ПО на устройство управления
8. Корректировка КД по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца	01.01.2013 – 30.02.2013	Доработанный комплект КД с literой «О»
9. Проведение приёмочных испытаний опытного образца. Проведение отладки программы обработки и передачи данных	01.03.2013 – 30.04.2013	1. Акт испытаний опытного образца 2. Акт тестирования ПО
10. Корректировка КД по результатам приёмочных испытаний опытного образца	01.05.2013 – 30.06.2013	Доработанный комплект КД с literой «О <sub>1</sub> »

1	2	3
11. Разработка и изготовление специальной технологической оснастки. Проведение подготовки производства для серийного выпуска	01.07.2013 – 30.08.2013	Комплект КД на технологическую оснастку. Технологическая оснастка – 1 шт.
12. Изготовление установочной серии ЛТК в количестве 5 штук	01.09.2013 – 30.11.2013	ЛТК – 5 шт.
13. Проведение квалификационных испытаний ЛТК [5]	01.12.2013 – 30.12.2013	Акт испытаний. Комплект КД с литерой «О <sub>1</sub> »

*Примечание: Завершение работ по выполнению каждого этапа подтверждается актом приёмки.*

#### **4.2.22. Порядок контроля и приемки результатов ОКР**

Порядок выполнения и приемки ОКР – по ТКП 424–2012 (02260) [2]. По окончании ОКР должны быть представлены следующие документы:

- комплект КД;
- проект ТУ;
- патентный формуляр;
- опытные образцы – 2 шт.;
- протоколы и акт приемочных испытаний;
- программа и методика испытаний;
- акт приемки ОКР.

#### **4.3. Общие принципы расчета оптических систем**

*Основная функция* оптического прибора выполняется оптическими средствами, т. е. с помощью оптической системы (ОС). От правильного выбора принципиальной схемы ОС и надлежащего её расчёта во многом зависят не только быстродействие и точность работы самого прибора, но и его минимальные габаритные размеры, масса и устойчивость конструкции в целом. Для получения оптимальной по сложности ОС нужно хорошо знать абберрационные возможности и предельные значения оптических характеристик отдельных компонентов, входящих в её состав.



**Цель расчета ОС** – определение номинальных значений и допустимых отклонений всех конструктивных параметров с учётом требований к качеству изображения, а также технологических и экономических требований.

К конструктивным параметрам относятся:

– параметры оптических сред (например, показатель преломления для заданной длины волны  $n_\lambda$ , число Аббе  $\nu_\lambda$ );

– параметры формы (например, радиус сферической поверхности  $r$ , толщина по оси отдельной оптической детали или сборки (склейки) нескольких ОД  $d$ );

– параметры взаимного расположения компонентов (например, воздушные промежутки  $d_{\text{возд}}$ , передние и задние фокальные отрезки  $S_F$  и  $S_{F'}$ );

– параметры диафрагм (например, радиус внутренней дуги лепестка  $r_{\text{вн}}$ , число лепестков  $n$ );

– параметры покрытий (например, коэффициент пропускания на рабочей длине волны – не менее 0,85).

**Задачи расчёта ОС** предусматривают:

1. Создание принципиальной схемы, которая основывается на функциях, выполняемых ОС, и определяется её назначением в приборе.

2. Соответствие требованиям физической осуществимости прибора.

3. Обеспечение технической реализации.

Решение **первой задачи** сводится к определению следующих параметров:

1) габаритных размеров ОС;

2) основных оптических характеристик: светосилы  $H$ , диаметра входного  $D$  и выходного  $D'$  зрачков и их положения  $t$  и  $t'$ , линейного  $2y$  ( $2y'$ ) и углового  $2\omega$  ( $2\omega'$ ) полей, увеличения ОС (линейного  $\beta$ ; углового  $\gamma$ ), её фокусного расстояния  $f'$ , оптической силы  $\phi$ ;

3) условий эксплуатации ОП: теплостойкости, допустимых вибраций, ударных нагрузок, радиационного воздействия и т. п.

**Вторая задача** заключается в создании ОС, удовлетворяющей законам образования изображения.

Например, при расчете **фото- и кинопроекторных** ОС, работающих в видимом диапазоне длин волн 0,48–0,6438 мкм, профессором В. С. Волосовым на основании анализа большого числа объ-

активов был введён критерий добротности, устанавливающий соотношение между фокусным расстоянием  $f'$ , относительным отверстием  $D/f'$  и угловым полем в пространстве предметов  $2\omega$  [4, 58]:

$$C = \frac{D}{f'} \operatorname{tg} \omega_1 \sqrt{\frac{f'}{100}} = 0,22 - 0,26.$$

Соответственно расчётный критерий добротности должен попадать в указанный диапазон значений.

Для **панкратических систем** критерий добротности

$$C \approx \frac{f'_{\max} \varepsilon}{L_c - \frac{1,2 f'_{\max}}{\sqrt{M}}},$$

где  $L_c$  – габаритные размеры системы по оптической оси;

$\varepsilon = D / f'$  – относительное отверстие;

$M$  – перепад (кратность) фокусных расстояний.

Для предварительных расчётов принимают  $C = 0,4$ .

При разработке **систем микроскопов** следует исходить из понятия полезного увеличения  $\Gamma_{\Pi}$ :

$$500 A \leq \Gamma_{\Pi} < 1000 A,$$

где  $A = n |\sin \sigma|$  – числовая апертура микрообъектива, которая определяется из предельного разрешения микроскопа.

Для визуальных **зрительных труб** полезное увеличение  $\Gamma_{\Pi}$

$$0,2 \text{ Д} \leq \Gamma_{\Pi} < 0,75 \text{ Д}.$$

#### 4.3.1. Габаритный расчет

Целью габаритного расчёта является определение основных конструктивных параметров деталей и компонентов, входящих в оптическую схему прибора, расстояний между ними, а также их оптимального взаимного расположения. Для упрощения проведения габаритного расчёта сложных ОС компоненты её образующие считаются бесконечно тонкими (т. е. не имеют толщины по оптической оси).

Правила выполнения габаритного расчета рассмотрим на примере телескопической системы. При расчёте используют основные формулы теории телескопических систем [4], которые характеризуются видимым увеличением  $\Gamma_T$ , угловым полем  $2\omega$ , диаметром  $D'$  выходного зрачка, его удалением  $t'$  и угловой разрешающей способностью  $\psi$ .

Угловое поле окуляра меняется в пределах  $2\omega = 40\text{--}70^\circ$ . В оптических приборах увеличение трубы  $\Gamma_T$  обычно не превышает  $10\text{--}30\times$ , в этом случае угловое поле объектива  $2\omega = 10\text{--}12^\circ$ . Диаметр  $D'$  в визуальных ОС составляет  $1,5\text{--}7,0$  мм в зависимости от условий наблюдения, а его удаление от последней поверхности линзы окуляра  $S'_p \geq 5$  мм. Диаметр выходного зрачка является главным параметром светосилы ОС, работающей совместно с глазом:

$$H = gD_{\text{гл}}^2,$$

где

$$g = \pi\tau \left( \frac{n'}{n} \right)^2 / (4f'_{\text{гл}})^2;$$

$\tau$  – коэффициент пропускания оптических сред;  
 $n'$  и  $n$  – показатели преломления соприкасающихся сред;

$$f'_{\text{гл}} = 22,8 \text{ мм},$$

если  $D_{\text{гл}} < D'$ , при этом субъективная относительная яркость телескопической системы определяется квадратом видимого увеличения  $(\Gamma_T)^2$ .

Глубина резкости изображаемого пространства в телескопических системах, если глаз аккомодирован на бесконечность, определяется расстоянием до переднего плана:

$$P_1 = \Gamma_T^2/A,$$

где  $A$  – объем аккомодации в диоптриях (для нормального глаза  $A = 4$  дптр.).

При выполнении габаритного расчёта необходимо учитывать тип ОС: центрированная или нецентрированная. Во втором случае следует резервировать место для дополнительной установки различного рода регулировочных элементов, необходимых для пространственной юстировки компонентов прибора.

Рассмотрим пример выполнения габаритного расчёта приёмного блока спектрофотометра.

С учетом припуска на крепеж элементов принимаем расстояние от выходной щели монохроматора до отклоняющего зеркала 5 равным  $l_1 = 30$  мм (рис. 4.3).

Угол падения  $\psi = 55^\circ$ , расстояние между зеркалом 5 и объективом 6  $l_2 = 245$  мм,  $f'_6 = 170$  мм.

Исходя из конструктивных соображений, расстояние от объектива 6 до зеркала 7 примем  $h = 223$  мм.

Расстояние  $S'_6$  от центра кривизны объектива 6 до плоскости диафрагмы

$$S'_6 = (f'_6 \cdot S_6) / (f'_6 + S_6) = (-170 \cdot 275) / (-170 + 275) = -445,24 \text{ мм},$$

где  $S_6 = l_1 + l_2$ .

Апертурный угол  $2\sigma$  выходного объектива монохроматора будет зависеть от размера входного зрачка  $D_{\text{вх.зр}}$ :

$$2\sigma = 2 \cdot \arctg(D_{\text{вх.зр}} / 2 \cdot f'_3) = 14,14^\circ.$$

Световой диаметр объектива 6 определим по формуле

$$D_{\text{св6}} = 2 \cdot \text{tg}\sigma \cdot S_6 = 2 \cdot \text{tg}7,7 \cdot 275 = 68 \text{ мм}.$$

Получим расстояние от зеркала 7 до диафрагмы II:

$$H = 445,24 - 223 = 222,24 \text{ мм}.$$

Угол отклонения осевого луча от первоначального направления  $\varphi = 15^\circ$ .

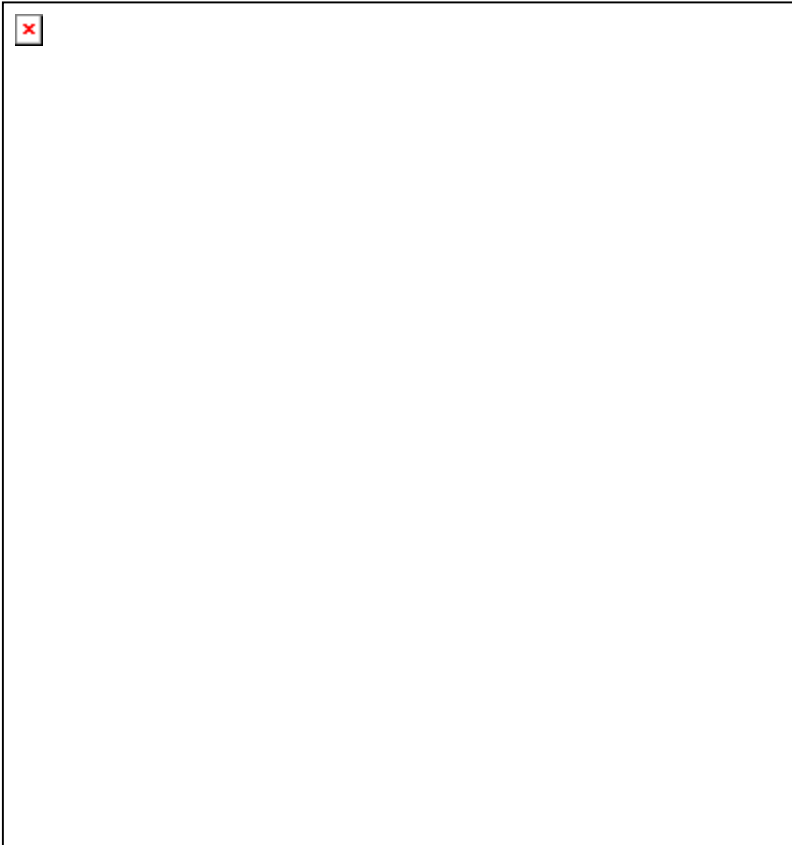


Рис. 4.3. Оптическая схема спектрофотометра:

- 1 – эллипсоидный отражатель; 2 – коллиматорный объектив;  
3 – камерный объектив; 4 – дифракционная решетка;  
5 – плоское зеркало; 6 – зеркальный объектив; 7 – плоское зеркало;  
8 – зеркальный объектив; 9 – плоские зеркала; 10 – зеркальный объектив;  
11 – модуляторы

Примем фокусное расстояние объектива 8 равным 60 мм, следовательно, для формирования параллельного пучка объектив 8 должен отстоять от диафрагмы на расстоянии 60 мм. Световой диаметр объектива 8 находим по формуле

$$D_{\text{св8}} = f'_8 \cdot D_{\text{св6}} / S' = 9,2 \text{ мм.}$$

Угол падения светового пучка на диск модулятора

$$\alpha = 90^\circ - 110^\circ - 2 \cdot \varphi + \varphi = -35^\circ .$$

По конструктивным соображениям четыре плоских зеркала 9 разнесены друг относительно друга в поперечном направлении на расстояние  $t_1 = 150$  мм и в продольном направлении – на расстояние  $t_2 = 155$  мм.

Фокусное расстояние вогнутого зеркала  $l_0 - f'_{10} = 35$  мм, расстояние от отражающей поверхности диска модулятора 11 до центра кривизны зеркала  $l_3 = 70$  мм, угол отклонения осевого луча от первоначального направления –  $\mu = 30^\circ$ .

Таким образом, габаритные размеры прибора, исходя из оптической схемы, составляют  $480 \times 480$  мм.

***По итогам проведения габаритного расчёта выполняют второй чертёж с принципиальной оптической схемой прибора, требования по её оформлению см. в п.7.2.2 и прил. Р.***

#### ***4.3.2. Энергетический расчёт***

Для качественной работы любого оптико-электронного прибора (ОЭП) важно обеспечить определенные энергетические соотношения между полезным сигналом и шумом, источники которого могут быть как внутри прибора, так и вне него. Определение этих соотношений, и на их основе некоторых важнейших параметров ОЭП, составляет главное содержание и цель энергетических расчетов [5].

В той или иной форме энергетический расчет выполняется практически всегда, т. е. при разработке любого ОЭП. Он позволяет найти важнейшие габаритные параметры ОС (площадь входного зрачка, относительное отверстие, угловое поле и др.), определить необходимое значение порогового потока или разрешающей способности приёмника излучения, сформулировать требования к источнику излучения, определить ряд требований к сканирующей системе и электронному тракту ОЭП. Очень часто энергетический расчет помогает определить точностные характеристики ОЭП.

Например, при расчёте прибора для определения ВНГО задачей энергетического расчета является определение максимальной дальности  $H$  действия проектируемого прибора.

Исходные данные:

диаметр передающего объектива  $D_{\text{перед}} = 0,04$  м;

диаметр приемного объектива  $D_{\text{приемн}} = 0,10$  м;

площадь светочувствительной площадки фотоприёмника:

$$A_{\text{фп}} = 0,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

метеорологическая дальность видимости  $S_{\text{м}} = 10$  км;

импульсная мощность лазерного излучения  $\Phi_{\text{л}} = 1,50$  Вт;

длительность импульса  $\tau_{\text{имп}} = 100$  нс;

пропускание передающей и приемной систем  
 $\tau_{\text{пр.ОС}} = \tau_{\text{пер.ОС}} = 0,7$ ;

чувствительность фотоприёмника  $S(\lambda) = 108$  А/Вт;

заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

отношение «сигнал/шум» измерительного прибора  $\mu = 10$ ;

полоса пропускания электронного тракта  $\Delta f = 3$  МГц;

расходимость излучения на выходе передающего объектива  
 $\alpha_{\text{ист}} = 5'$ ;

пропускание атмосферы  $\tau_{\text{атм}} = 0,2$ .

Основанием для расчёта является энергетическое уравнение

$$i_{\text{полезн}} \geq \mu \sigma_{\text{шум}},$$

где  $i_{\text{полезн}}$  – значение полезного сигнала, приведенное к выходу фотоприемника с учетом потерь во всех частях ОЭП:

$$i_{\text{полезн}} = \Phi_{\text{полезн}} \cdot S(\lambda);$$

$\sigma_{\text{шум}}$  – среднеквадратичное значение шумов, приведенное к выходу фотоприёмника, определяемое по формуле

$$\sigma_{\text{шум}} = \sqrt{2 \cdot e \cdot i \cdot \Delta f},$$

где  $i$  – значение тока, которое обусловлено как засветкой, так и значением темнового тока, определяется по формуле

$$i_{\text{полн}} = \Phi_{\text{полн}} \cdot S(\lambda).$$

Подставив данные значения в основное энергетическое уравнение, получили следующее неравенство:

$$\Phi_{\text{полезн}}^2 \cdot S(\lambda) \geq \mu^2 \cdot 2 \cdot e \cdot \Phi_{\text{полн}} \cdot \Delta f .$$

Распишем все величины, входящие в уравнение:

полезный поток  $\Phi_{\text{полезн}}$  – поток лазерного излучения, отраженно-го от облака:

$$\Phi_{\text{полезн}} = \Phi_{\text{рас}} \cdot b_{\pi} \cdot \tau_{\text{атм}} \cdot \tau_{\text{пр.OC}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{приемн}}^2}{4 \cdot H^2} ,$$

где  $\Phi_{\text{рас}}$  – поток помехи обратного рассеяния;

$b_{\pi}$  – лидарное отношение;

$\tau_{\text{атм}}$  – коэффициент пропускания атмосферы.

$\tau_{\text{пр.OC}}$  – коэффициент пропускания приемной ОС.

Полный поток  $\Phi_{\text{полн}}$ , приходящий в плоскость фотоприемника, определяется по формуле

$$\Phi_{\text{полн}} = \Phi_{\text{полезн}} + \Phi_{\text{солн}} ,$$

где  $\Phi_{\text{солн}}$  – фоновый поток (солнечный свет).

Лидарное отношение определяет, какая часть потока, рассеянно-го единицей объёма среды, рассеивается в обратном направлении в единичном телесном угле:

$$b_{\pi} = \frac{x(\pi)}{4\pi} ,$$

где  $x(\pi)$  – значение индикатрисы рассеяния.

Значение индикатрисы рассеяния соответствует углу  $\gamma = \pi$  между направлениями распространения падающего излучения и наблюдения

$$x(\pi) = 0,33 \sigma_a^{-0,31} ,$$

где  $\sigma_a$  – показателя рассеяния.



Показатель рассеяния определяется по формуле

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{\varepsilon_a}{1 + \beta(\lambda)},$$

где  $\varepsilon_a$  – показатель ослабления;

$\beta(\lambda)$  – показатель поглощения аэрозоля.

Спектральная зависимость  $\varepsilon_a(\lambda)$  для дымок и туманных дымок приближенно аппроксимируется формулой

$$\varepsilon_a(\lambda) = \frac{3,91}{S_M} \left( \frac{0,555}{\lambda} \right)^{0,585(S_M)^{1/3}},$$

где  $S_M$  – метеорологическая дальность видимости, т. е. расстояние, на котором контраст черного объекта достаточно больших размеров на фоне неба при его достаточной яркости снижается до контрастной чувствительности глаза  $\varepsilon_k$  (общепринятое значение  $\varepsilon_k = 0,02$ ).

В инфракрасном диапазоне поглощение

$$\beta(\lambda) \approx (0,1 - 0,2) \cdot \left( \frac{\lambda}{0,555} \right)^{0,8}.$$

Поток помехи обратного рассеяния определяется по формуле

$$\Phi_{\text{рас}} = \Phi_{\text{л}} \tau_{\text{атм}} \tau_{\text{пер.ОС}} \varepsilon_a l_{\text{имп}} 4 \frac{A_{\text{фп}}}{\pi a_{\text{ист}}},$$

где  $l_{\text{имп}}$  – длина импульса:

$$l_{\text{имп}} = c \cdot \tau_{\text{имп}}.$$

Подставив соответствующие величины в уравнение для полезного потока, получаем

$$\Phi_{\text{полез}} = \Phi_{\text{л}} \frac{x_{\text{л}} A_{\text{фп}}}{\pi \cdot a_{\text{ист}}} \tau_{\text{атм}}^2 \tau_{\text{пр.ОС}} \tau_{\text{перед.ОС}} \varepsilon_a l_{\text{имп}} \frac{D^2_{\text{приемн}}}{4H^2}.$$

Поток фоновой засветки

$$\Phi_{\text{солн}} = B_{\text{обл}} \cdot \tau_{\text{атм}} \cdot \tau_{\text{пер.ОС}} \frac{A_{\text{ФП}} \cdot \pi \left( \frac{D_{\text{приемн}}}{f'_{\text{приемн}}} \right)^2}{4},$$

где  $B_{\text{обл}}$  – значение яркости в заданном диапазоне длин волн:

$$B_{\text{обл}} = B_{\lambda_{\text{обл}}} \cdot \Delta\lambda,$$

где  $B_{\lambda_{\text{обл}}}$  – спектральная плотность яркости;

$\Delta\lambda$  – спектральный интервал, выделяемый фильтром.

$$B_{\lambda_{\text{обл}}} = B_{\lambda_{\text{безобл}}} \cdot \rho_{\text{обл}},$$

где  $\rho_{\text{обл}}$  – спектральный коэффициент диффузного рассеивания (для поверхности облаков равен 50–65 %).

Находим численные значения величин:

$$\varepsilon_a(\lambda) = \frac{3,91}{10} \left( \frac{0,555}{0,905} \right)^{0,585(10)^{1/3}} = 0,211;$$

$$l_{\text{имп}} = 3 \cdot 10^8 \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 30;$$

$$\beta(\lambda) \approx 0,2 \cdot \left( \frac{0,905}{0,555} \right)^{0,8} = 0,296;$$

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{0,211}{1 + 0,296} = 0,163;$$

$$x(\pi) = 0,33 \cdot 0,163^{-0,31} = 0,579;$$

$$\Phi_{\text{полез}} = 75 \frac{0,579 \cdot 0,64 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,00146} \cdot 0,2^2 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,211 \cdot 30 \times$$

$$\times \frac{0,1^2}{4 \cdot H^2} = \frac{1,493 \cdot 10^{-6}}{H^2};$$

$$B_{\lambda, \text{обл}} = 3 \cdot 10^2 \cdot 0,65 = 195;$$

$$B_{\text{обл}} = 195 \cdot 55 \cdot 10^{-9} = 1,073 \cdot 10^{-5};$$

$$\Phi_{\text{солн}} = 1,073 \cdot 10^{-5} \cdot 0,2 \cdot 0,7 \frac{0,64 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \left( \frac{0,1}{0,11985} \right)^2}{4} = 7,402 \cdot 10^{-13};$$

$$\Phi_{\text{полн}} = \frac{1,493 \cdot 10^{-6}}{H^2} + 1,073 \cdot 10^{-13}.$$

Подставляем в энергетическое уравнение вычисленные значения  $\Phi_{\text{полн}}$ ,  $\Phi_{\text{полезн}}$  и решаем его относительно неизвестной величины  $H$ :

$$\left( \frac{1,493 \cdot 10^{-6}}{H^2} \right)^2 \cdot 108 \geq 2 \cdot 10^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^6 \left( 1,073 \cdot 10^{-13} + \frac{1,493 \cdot 10^{-6}}{H^2} \right);$$

$$\frac{2,408 \cdot 10^{-10}}{H^4} \geq 71,059 \cdot 10^{-24} + \frac{14,333 \cdot 10^{-17}}{H^2};$$

$$H \leq 7,044 \cdot 10^3 \text{ м}.$$

Таким образом, с помощью энергетического расчета была определена максимальная дальность работы проектируемого прибора, которая равна 7 км. Следовательно, проектируемый прибор удовлетворяет техническим требованиям.

К *энергетическим*, например, также относятся *расчёты системы охлаждения* на основе термоэлектрических элементов (модулей) Пельтье. Данные элементы используются для активного охлаждения ЭОП, ПЗС-матриц и других приёмников излучения.

Величина холодопроизводительности ( $Q_c$ ) и тепловое сопротивление ( $R_{\text{ins}}$ ) определяется посредством специального программного обеспечения, разработанного компанией Kryotherm (рис. 4.4) [6].

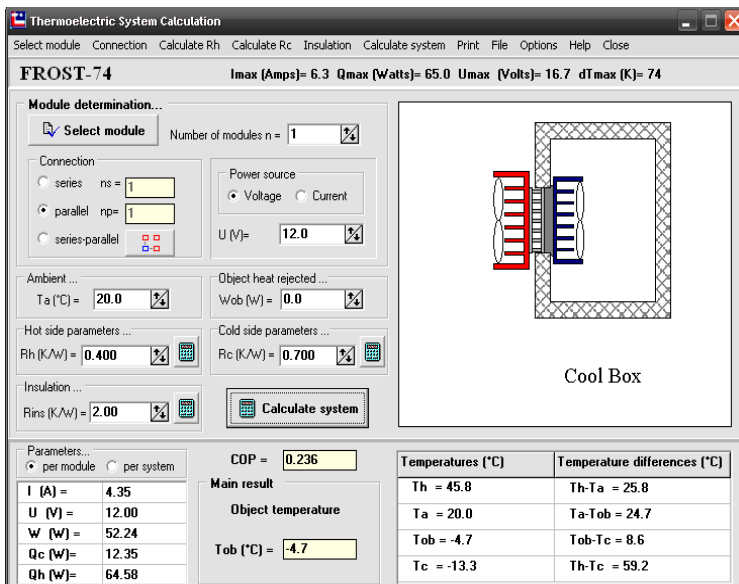


Рис. 4.4. Рабочее окно программы Kryotherm для ввода исходных параметров

Указанные величины связаны выражением

$$Q_c = k^3 \cdot R_{\text{ins}} \cdot V \cdot (T_a - T_{\text{об}}),$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий применяемый для охлаждения материал и его толщину (например, для алюминия толщиной 17 мм  $k = 0,074$  Вт/(м·К));

$R_{\text{ins}}$  – тепловое сопротивление материала (для алюминия  $R_{\text{ins}} = 93,76$  К/Вт);

$V$  – объём материала, м<sup>3</sup>;

$T_a$  – температура (исходная) нагретой среды, °С или К;

$T_{\text{об}}$  – температура (конечная), до которой необходимо охладить объект, °С или К.

Результаты расчёта представляют в виде графиков зависимости температуры от величины напряжения (В), потребляемой электрической мощности (Вт), холодильного коэффициента (COP) и других параметров (рис. 4.5).

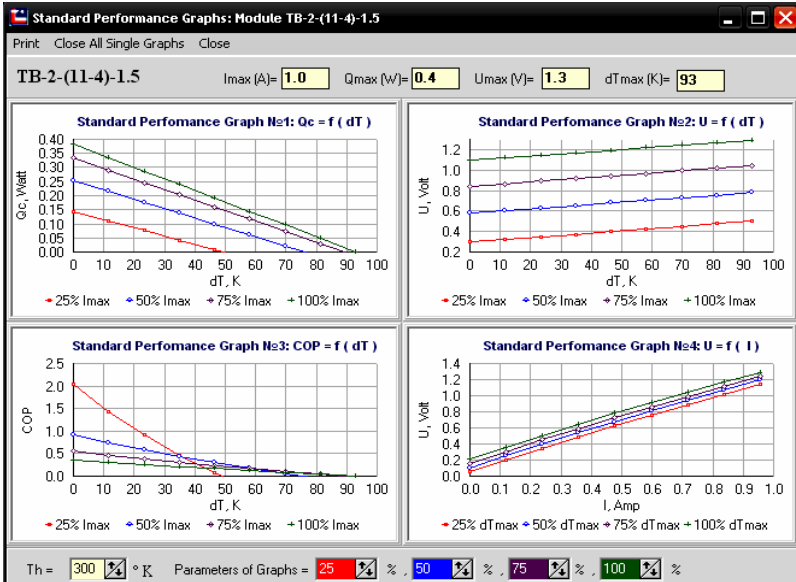


Рис. 4.5. Графики зависимости различных характеристик термоэлектрического модуля ТВ-7-1,4-2,5

### 4.3.3. Светотехнический расчёт

Данный вид расчётов предусматривает определение максимальной интенсивности освещенности участка поверхности или пространства за счёт правильного выбора схемы расположения источников света, оптимального подбора их числа, углов наклона и прочих электротехнических характеристик. Светотехнические расчёты проводят для решения следующих задач:

1. Оптимальное размещение ламп или светодиодных панелей внутри производственных и бытовых помещений различной формы (прямоугольной, квадратной, круглой и др.).
2. Оптимальное размещение прожекторов на наружных стенах (крышах) зданий и сооружений для их декоративной подсветки.

Формула для расчета количества светильников [7]

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K_3}{U \cdot n \cdot \Phi_{\text{л}}},$$

где  $E$  – требуемая горизонтальная освещенность, лк;

$S = a \cdot b$  – площадь помещения или площадки поверхности ( $a$  – ширина,  $b$  – длина), м<sup>2</sup>;

$K_3$  – коэффициент запаса (табл. 4.2);

$n$  – число ламп в одном светильнике, шт.;

$\Phi_{\text{л}}$  – световой поток одной лампы, лм.

Таблица 4.2

Зависимость коэффициента запаса от типа помещения

Тип помещений	Коэффициент запаса, относительные единицы
Очень чистые помещения, а также осветительные установки с малым временем использования	1,25
Чистые помещения с трёхгодовым циклом обслуживания	1,50
Наружное освещение, трёхгодовой цикл обслуживания	1,75
Внутреннее и наружное освещение при сильном загрязнении	2,00

$U$  – коэффициент использования, определяемый в каждом конкретном случае по индивидуальной таблице, например табл. 4.3, ( $U = 0,51$ ) для определённой марки светильника (418, 436) и его типа (ARS) на основании коэффициентов отражения потолка, стен и пола, а также индекса помещения  $\rho$  (табл. 4.4).

Таблица 4.3

Определение коэффициента использования,  
например для лампы модели ARS 418, 436

ARS 418, 436								
Потолок	80	80	80	70	50	<b>50</b>	30	0
Стены	80	50	30	50	50	<b>30</b>	30	0
Пол	30	30	10	20	10	<b>10</b>	10	0
0,6	53	38	32	37	35	<b>31</b>	31	27
0,8	60	45	38	44	41	<b>38</b>	37	34
1,0	65	51	43	49	46	<b>43</b>	42	38
1,25	70	57	49	54	51	<b>48</b>	47	44
<b>1,5</b>	<b>72</b>	<b>61</b>	<b>52</b>	<b>57</b>	<b>54</b>	<b>51</b>	51	47
2,0	76	66	56	61	57	55	54	51
2,5	78	70	59	64	60	58	57	54
3,0	80	73	62	67	62	60	59	57
4,0	81	76	64	69	63	62	61	58
5,0	82	78	65	70	65	64	62	60

Таблица 4.4

Зависимость коэффициента отражения от цвета материала

Материал	Коэффициент отражения, %
Поверхность белого цвета	70–80
Светлая поверхность	50
Поверхность серого цвета	30
Поверхность тёмно-серого цвета	20
Тёмная поверхность	10

Индекс помещения находим из выражения

$$\varphi = \frac{S}{(h_1 - h_2) \cdot (a + b)},$$

где  $h_1$  – высота помещения, м;

$h_2$  – высота расчётной поверхности, м.

На сегодняшний день процесс светотехнического расчёта практически полностью автоматизирован, разработано огромное количество программных пакетов, к наиболее известным из которых относятся:

для задач 1-й группы: DIALux [8], база данных светильников (plug-in) [9], Calculux (компания Philips), Lanzini Lighting Service (Lanzini), Ulysse (Schreder), SLI-Win (Sylvania), ProLite (Gewiss), Faellite (Faelluce) и многие другие;

для задач 2-й группы: Ulysse v.1 (разработана в исследовательском центре компании Шредер в Великобритании) [10], Fael-Lite [11], Light-in-Night (Road) [12].

3. Размещение источников света внутри прибора для оптимального освещения плоскостей промежуточного изображения или плоскости предмета.

4. Определение величины потерь светового потока внутри ОС или определение коэффициента пропускания оптических компонентов (объективов, коллективов, оборачивающих систем, конденсоров, интерференционных светофильтров и т. п.).

Коэффициентом пропускания  $\tau$  называют отношение потока излучения  $\Phi_\tau$ , прошедшего через данную ОС, к потоку излучения  $\Phi$ , вошедшему в указанную ОС:

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi}.$$

Потери потока излучения в ОС обусловлены следующими факторами:

1. Отражением при преломлении света на границе раздела двух сред.

2. Поглощением материала входящих в неё ОД.

3. Отражением от зеркал и металлических поверхностей (светорассеяние).

Потери яркости лучей на отражение при преломлении характеризуются коэффициентом отражения

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi} = \frac{B_\rho}{B},$$



где  $\Phi$  и  $\Phi_p$  – падающий и отражённый поток излучения;

$B$  и  $B_p$  – яркость падающего и отражённого потока излучения.

Коэффициент отражения  $\rho$  зависит от показателей преломления  $n$  и  $n'$  соприкасающихся сред и от углов падения  $\varepsilon$  и преломления  $\varepsilon_1'$ . При малых углах падения и преломления (до  $30^\circ$ ) коэффициент отражения определяется по формуле

$$\rho = \left( \frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$$

или для воздушных систем

$$\rho = \left( \frac{n' - 1}{n' + 1} \right)^2.$$

Прозрачность оптических стёкол в видимой области спектра характеризуют коэффициентом светопоглощения  $\alpha$ . Коэффициент светопоглощения находят через коэффициент пропускания как отношение светового потока  $\Phi_\tau$ , поглощённого стеклом на пути 1 см, к потоку  $\Phi$  в начале этого пути:

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} = (1 - \rho)^2 e^{\alpha l},$$

где  $l$  – толщина образца, см.

После преобразования получим

$$\alpha = \frac{1}{l \ln e} = [2 \ln(1 - \rho) - \ln \tau].$$

Все три коэффициента связаны между собой соотношением

$$\tau + \rho + \alpha = 1.$$

Коэффициент пропускания  $\tau$  также зависит от длины волны падающего света. Среднее значение  $\tau$  в заданном спектральном диапазоне  $\lambda_2 - \lambda_1$  определяется по формуле

$$\tau = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} d\lambda.$$

Для ОС, состоящей из преломляющих и отражающих поверхностей, коэффициент пропускания можно вычислить по формуле

$$\tau = \prod_{k=1}^{k=q+1} (1 - \rho_k) \cdot \prod_{j=1}^{j=m} (1 - \alpha_{lj})^{lj} \cdot \prod_{n=1}^{n=N_3} \rho_{3n} \cdot \prod_{p=1}^{p=N_c} \tau_{cp},$$

где  $\rho_k$  – коэффициент отражения на  $k$ -ой поверхности раздела оптических сред,  $k = 1, \dots, q + 1$ ;

$q$  – число поверхностей раздела;

$\alpha_{lj}$  – коэффициент поглощения на 1 см пути лучей в  $m$ -й оптической среде,  $m = 1, \dots, p$ ;

$p$  – число оптических сред, проходимых излучением;

$l_m$  – длина пути излучения в  $m$ -й среде вдоль оптической оси, см;

$\rho_{3n}$  – коэффициент отражения на  $n$ -й зеркальной поверхности,  $n = 1, \dots, N_3$ ;

$N_3$  – число зеркальных поверхностей.

Для непросветлённых преломляющих кроновых поверхностей  $\rho = 4\%$ , для непросветлённых преломляющих флинтových поверхностей  $\rho = 5\%$ , для просветлённых преломляющих поверхностей  $\rho = 1\%$  либо  $\rho = 0,5\%$ . Коэффициент поглощения для толщины стекла любой марки в 1 см  $\alpha_1 = 1\%$ . Для серебряных отражающих поверхностей  $\rho_3 = 0,94$ , для алюминиевых отражающих поверхностей  $\rho_3 = 0,85$ .

Для вычисления коэффициента пропускания  $\tau$  ОС используют приближённую формулу, которая учитывает все рассмотренные потери:

$$\tau = 0,96^{N_1} 0,95^{N_2} 0,98^{N_3} 0,99^{N_4} 0,995^{N_5} 0,99^L 0,94^{N_c} 0,85^{N_a} 0,98^{N_p},$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – число непросветлённых преломляющих кроновых и флинтových поверхностей;

$N_3$ ,  $N_4$  и  $N_5$  – число просветлённых поверхностей;

$L$  – суммарная длина хода луча вдоль оптической оси в стекле ОД, см;

$N_c$  и  $N_a$  – число серебряных или алюминиевых отражающих поверхностей;

$N_n$  – число просветлённых серебряных или алюминиевых отражающих поверхностей.

#### **4.3.4. Расчёты на точность**

При проектировании механизмов точных приборов наряду с кинематическими и динамическими расчетами необходимо производить и расчеты их на точность. Расчеты на точность как прибора в целом, так и отдельных его узлов и компонентов, а также обоснованное задание допусков на деталь и их сопряжения – обязательный и важный этап проектирования.

На точность прибора влияют ошибки отсчетных и передаточных механизмов, а также погрешности оптической системы. От оптимального сочетания конструктивных параметров, рационально выбранных посадок и допусков на изготовление и сборку механизма в значительной мере зависят себестоимость изготовления прибора, его надежность и долговечность в эксплуатации [13].

Перед началом выполнения расчета в пункте ПЗ необходимо сделать вводную часть с обоснованием необходимости его проведения, указанием основных расчетных элементов конструкции узла (механизма).

К расчетам на точность отдельных узлов прибора относятся, например:

- расчёт упругих элементов, связанных с подвижными компонентами прибора (например, усилия или жёсткости пружины фиксатора) [14];

- расчёт зазоров в соединениях (например, величины мертвого хода в зубчатом механизме, температурного расширения оправы объектива);

- расчёт угла наклона главной оси юстируемого оптического компонента относительно базовой поверхности корпуса (геометрических параметров винтового механизма);

- расчёт посадки подшипника (скольжения или качения) на приводной вал (например, при установке вентилятора системы охлаждения) и пр.

Вариант выполнения кинематического расчёта рассмотрим на примере определения ошибок, возникающих в механизме поворота дифракционной решётки.

Одна из ошибок, возникающих в процессе работы прибора, связана с точностью установки длины волны. Точность установки длины волны определяется точностью механизма развертки спектра – поворот решетки.

В проектируемом приборе поворот дифракционной решетки 3 (рис. 4.6) осуществляется шаговым электродвигателем 5 через прямозубую эвольвентную передачу, включающую шестерню 1 и рейку 2. Данная передача относится к точной (отсчетной), поэтому к ней предъявляются особые требования качества изготовления и сборки.

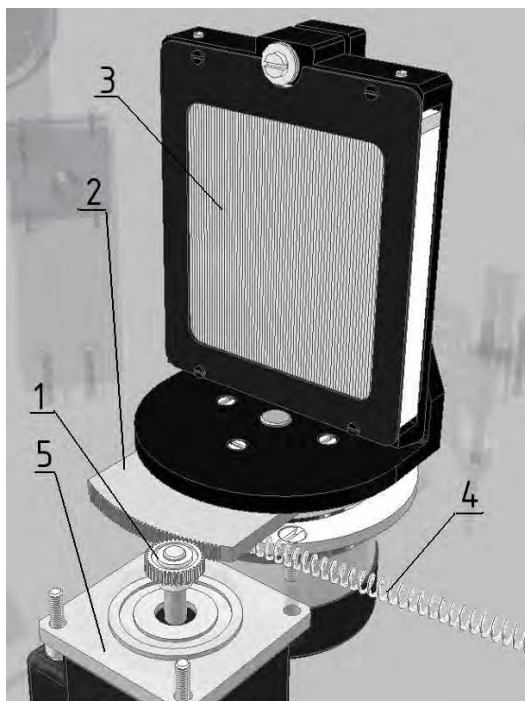


Рис. 4.6. Узел дифракционной решетки:  
1 – шестерня; 2 – рейка; 3 – дифракционная решетка; 4 – пружина;  
5 – двигатель

Качество точной зубчатой передачи определяется следующими показателями [15]:

- кинематической точностью;
- величиной мертвого хода;
- легкостью вращения;
- плавностью работы;
- износостойкостью.

Для повышения стабильности оси вращения дифракционная решетка устанавливается в оправе на двухрядном насыпном шарико-подшипнике.

В соответствии с перечисленными выше требованиями, а также исходя из конструктивных соображений выбрана зубчатая передача со следующими параметрами:

- модуль  $m = 0,4$  мм;
- диаметр делительной окружности шестерни  $d_1 = 16$  мм;
- число зубьев шестерни

$$z_1 = d_1 / m = 40;$$

- диаметр делительной окружности ведомого колеса  $d_2 = 128$  мм;
- число зубьев ведомого колеса  $z_2 = d_2 / m = 320$ ;
- передаточное число

$$u = z_2 / z_1 = 8;$$

- межосевое расстояние

$$a_w = (d_1 + d_2) / 2 = 64 + 8 = 72 \text{ мм};$$

- материал зубчатой шестерни и рейки – Сталь 50 ГОСТ 1050–88.  
Точность передачи: 4-5-5-6g ГОСТ 9178–81.

Выборка мертвого хода осуществляется силовым замыканием ведомого колеса 2 на корпус прибора пружиной сжатия 4.

Шестерня 1 устанавливается на валу электродвигателя. Согласно данным источника [16], угол поворота вала в микрошаговом режиме составляет

$$\varphi = 0,007^\circ.$$

Следовательно, угол поворота ведомого колеса

$$\psi = \varphi / u = 0,007^\circ / 8 = 0,000875^\circ = 3,15''.$$

Поворот дифракционной решетки на такой же угол  $\psi$  для  $\lambda = 550$  нм вызовет смещение дифракционной картины в плоскости выходной щели монохроматора на величину  $\Delta\lambda = 0,023$  нм, что удовлетворяет требованиям ТЗ.

Спектральный диапазон работы спектрофотометра 190–1100 нм; сканирование по спектру осуществляется поворотом решетки, следовательно, необходимо вычислить угловой диапазон поворота ведомого колеса.

Положение максимума дифракционного спектра определяется выражением

$$m\lambda = d (\sin \beta - \sin \alpha),$$

где  $m$  – порядок спектра ( $m = 1$ );

$\lambda$  – длина волны;

$d$  – период решетки ( $d = 1 / 1200$ );

$\beta$  – угол отклонения дифрагированных лучей (рис. 4.7);

$\alpha$  – угол падения параллельных лучей на решетку.

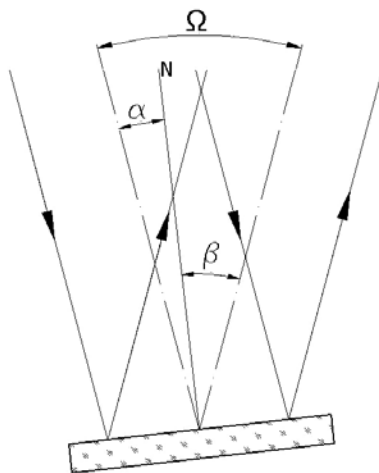


Рис. 4.7. Соотношения между углами в дифракционной решетке

Основой для расчета является постоянство угла  $\Omega = 30^\circ$  (угол между направлениями падающего и отраженного луча):

$$\Omega = \beta \pm \alpha \text{ (с учетом знаков).}$$

В результате компьютерного расчета получено следующее значение:

$$\text{для } \lambda_1 = 190 \text{ нм} \quad \alpha_1 = -8,23^\circ;$$

$$\text{для } \lambda_2 = 1100 \text{ нм} \quad \alpha_2 = 28,1^\circ.$$

Тогда общий диапазон поворота решетки  $\Delta\alpha = 36,33^\circ$ .

Следовательно, зубчатое колесо можно заменить зубчатым сектором с углом  $40\text{--}45^\circ$ .

Пересчитанное количество зубьев на участке рейки  $z_2 = 40$ .

Приведём пример расчёта оптимальной величины зазоров в соединениях нескольких элементов объектива модели «Сириус-НН» (рис. 4.8), устанавливаемого в модернизируемый прибор ночного видения, при изменении температуры.

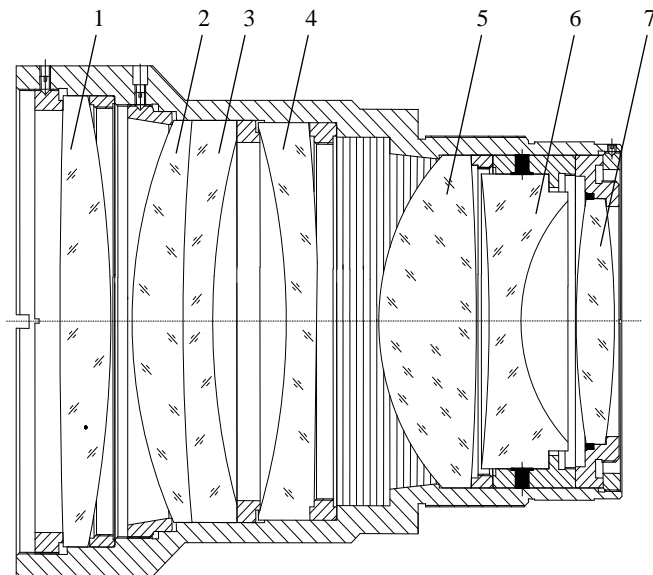


Рис. 4.8. Телеобъектив модели «Сириус-НН»

В связи с различием коэффициентов линейного расширения материалов линз и оправ при изменении температуры эксплуатации прибора в соединениях оптических и механических деталей могут возникать натяги. Если величина натяга превысит величину конструктивно предусмотренного зазора, произойдет разрушение оптической детали (например, линзы) вследствие её сдавливания механической деталью (оправой, корпусом).

Расчет температурных зазоров проводим по общей формуле

$$D_t = D_0 + D_0 \cdot \alpha (t - t_0),$$

где  $D_t$  – диаметр детали, мм, при температуре  $t$ , °С;

$D_0$  – диаметр детали при температуре  $t_0 = 20$  °С (в соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.050–73 за начало отсчета колебаний температуры среды и деталей принимается +20 °С);

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала детали.

Запишем выражения для каждой из детали:

для оправы

$$D_t = D_0 + D_0 \cdot \alpha_0 (t - t_0) = D_0 (1 + \alpha_0 (t - t_0));$$

для линзы

$$d_t = d_n + d_n \cdot \alpha_n (t - t_0) = d_n (1 + \alpha_n (t - t_0)).$$

Изменение диаметра оправы

$$\Delta D = D_t - D_0.$$

Изменение диаметра линзы

$$\Delta d = d_t - d_n.$$

Разность

$$\Delta = \Delta D - \Delta d$$

характеризует натяг (или зазор), возникающий в соединении.



При расчете принимаем

$$D_0 = d_{\text{л}} = d,$$

где  $d$  – номинальный диаметр.

Тогда

$$\Delta = d (1 + \alpha_0 (t - t_0)) - d (1 + \alpha_{\text{л}} (t - t_0)). \quad (4.1)$$

Если  $\Delta < 0$ , то оправка сжимается сильнее линзы и в соединении будет натяг, что с конструктивной точки зрения недопустимо. В этом случае необходимо за счёт выбора верхнего предельного отклонения наружного диаметра линзы обеспечить гарантированный зазор равного значения или больше, чем возникающий натяг. Варьировать размерами оправы мы не можем, задавая её поле допуска в системе отверстия.

В соответствии с пунктом ТЗ прицел должен сохранять работоспособность после кратковременного пребывания (в течение 16 ч) в условиях окружающей среды при температуре плюс 70 – минус 50 °С.

Материалом корпуса линз (поз. 1, 2, 3, 4, 5), (см. рис. 4.8) является титановый сплав Вt 1–0, коэффициент линейного расширения для которого

$$\alpha_0 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}.$$

Используя формулу (4.1), произведём расчет:

линза № 1:

стекло N-SSK5 SCHOTT;

$$\alpha_{\text{л}} = 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C};$$

$$d = 101 \text{ мм};$$

$$\Delta_{+70} = 101 (1 + 8 \cdot 10^{-6}(70 - 20)) - 101(1 + 6,8 \cdot 10^{-6}(70 - 20)) = 0,00606;$$

$$\begin{aligned} \Delta_{-50} &= 101 (1 + 8 \cdot 10^{-6}(-50 - 20)) - 101(1 + 6,8 \cdot 10^{-6}(-50 - 20)) = \\ &= -0,00848; \end{aligned}$$

получаем  $\varnothing 101 f 7 \left( \begin{smallmatrix} -0,036 \\ -0,071 \end{smallmatrix} \right)$  мм.

Данные по остальным оптическим деталям сводим в таблицу (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Величины натягов и зазоров для заданных температур  
в зависимости от материалов и коэффициентов линейного  
расширения выбранных деталей

Номер линзы	Оправа	$\alpha_0 \cdot 10^{-6}$ , 1/°C	Стекло SCHOTT	$\alpha_n \cdot 10^{-6}$ , 1/°C	$\Delta_{+70}$	$\Delta_{-50}$	Диаметр
1	Вт 1-0	8,0	N-SSK5	6,8	0,00606	-0,00848	101 <sup>-0,036</sup> <sub>-0,071</sub>
2	Вт 1-0	8,0	N-SSK5	6,8	0,00540	-0,00760	90 <sup>-0,220</sup> <sub>-0,440</sub>
3	Вт 1-0	8,0	SF6	8,1	0,00606	-0,00848	90 <sup>-0,036</sup> <sub>-0,071</sub>
4	Вт 1-0	8,0	SF6	8,1	0,00450	-0,00630	89 <sup>-0,036</sup> <sub>-0,071</sub>
5	Вт 1-0	8,0	N-SSK5	6,8	0,04470	-0,00848	74,5 <sup>-0,03</sup> <sub>-0,062</sub>
6	Д16Т	22,7	ОФ-4	4,4	0,00578	-0,00846	66 <sup>-0,085</sup> <sub>-0,104</sub>
7	Д16Т	22,7	N-SSK5	6,8	0,12450	-0,17440	55 <sup>-0,06</sup> <sub>-0,08</sub>

При неустановившемся тепловом режиме кроме изменений размеров также происходят изменения формы деталей, не поддающиеся строгому расчету; в этих случаях прибегают к различным методам защиты ответственных деталей от воздействия переменного теплового излучения (герметизации корпусов, обогреву, экранированию и другим).

Для обеспечения высокого качества сборки оптических компонентов объектива и снижения величины аберраций необходимо точно выдержать воздушные промежутки между оптическими деталями по главной оптической оси. С этой целью осуществляется расчёт стрелок прогиба выпуклых и вогнутых сферических поверхностей линз с учётом конструктивно заданного или фактического значения поля допуска по следующим формулам:

$$h_{1(\text{вн})} = R_1 - \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{d_{\text{вн}}}{2}\right)^2}; \quad (4.2)$$

$$h'_{1(d_{\text{вн}} + TA_{\Delta})} = R_1 - \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{d_{\text{вн}} + (TA_{\Delta})}{2}\right)^2}, \quad (4.3)$$

где  $h'_{1(d_{\text{вн}}+TA_{\Delta})}$  – величина стрелки прогиба с учётом значения допуска, мм;

$R_1$  – радиус сферической поверхности, мм;

$d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр уступа или промежуточного кольца ( $d_{\text{св}} + 0,1-0,2$ ), мм;

$h_{1(\text{вн.})}$  – номинальное (теоретическое) значение стрелки прогиба, мм;

$TA_{\Delta}$  – допуск, мм.

Рассмотрим в качестве примера фрагмент конструкции объектива «Сириус-НН» с двумя сопряжёнными линзами, изображённый на рис. 4.9.

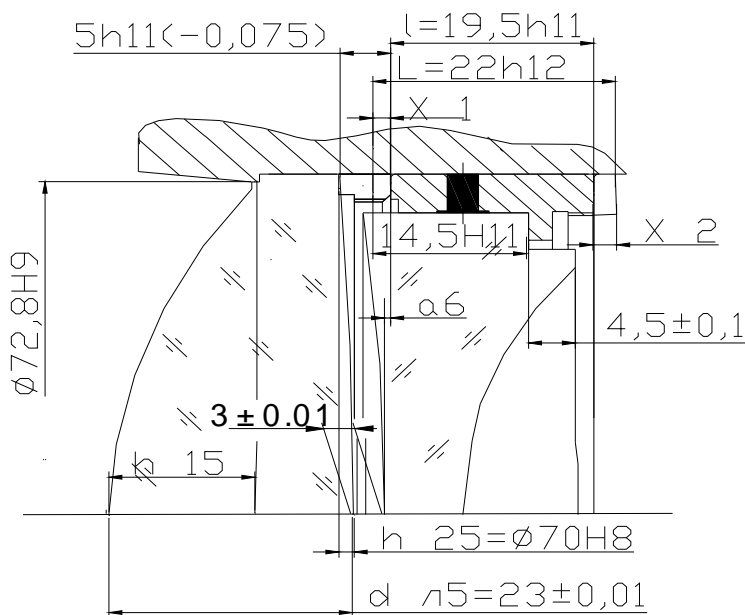


Рис. 4.9. Фрагмент автоколлимационной оправы объектива с линзами

Выполним расчёт стрелок прогиба для линзы № 5 (см. табл. 4.2) по формулам (4.2) и (4.3).

Для первой сферической поверхности со световым диаметром 72,8 мм

$$h_{15} = 53,66 - \sqrt{53,66^2 - \left(\frac{72,8}{2}\right)^2} = 14,234 \text{ мм};$$

и с учётом значений предельных отклонений для поля допуска *H9*  $\varnothing 72,874$  мм:

$$h'_{15} = 53,66 - \sqrt{53,66^2 - \left(\frac{72,874}{2}\right)^2} = 14,268 \text{ мм}.$$

Следовательно, стрелка прогиба  $h_{15} = 14,234^{+0,034}$  мм.

Для второй сферической поверхности на диаметре 70 мм

$$h_{25} = 530,2 - \sqrt{530,2^2 - \left(\frac{70}{2}\right)^2} = 1,156 \text{ мм},$$

и с учётом значений предельных отклонений для поля допуска *H8* диаметра 70,046 мм:

$$h'_{25} = 530,2 - \sqrt{530,2^2 - \left(\frac{70,046}{2}\right)^2} = 1,158 \text{ мм}.$$

Получаем стрелку прогиба  $h_{25} = 1,156^{+0,002}$  мм.

Аналогичным образом рассчитываются стрелки прогиба для линзы № 6:  $h_{16} = 1,824_{-0,0058}^{-0,0047}$  мм для диаметра  $66_{-0,104}^{-0,085}$  мм и

$$h_{26} = 11,0747_{-0,0977}^{0,0991} \approx 11,075^{\pm 0,1} \text{ мм для диаметра } 54 \pm 0,2 \text{ мм}.$$

Коррекция величины воздушного промежутка осуществляется подрезкой опорного торца оправы (корпуса) или подбором ширины промежуточного кольца.

Для расчета автоколлимационной оправы линзы № 6 необходимо определить пригоночный размер  $\alpha_6$  (см. рис. 4.9). В качестве исходных данных выбираем следующие значения параметров:

$$d_{\text{возд}} = 3 \pm 0,01 \text{ мм}; h_{25} = 1,156^{+0,002} \text{ мм}; d_k = 5h11^{-0,075} \text{ мм}.$$

Строим схему для определения  $\alpha_6$  (рис. 4.10).

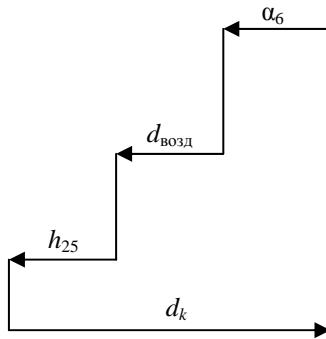


Рис. 4.10. Размерная цепь для определения  $\alpha_6$

Получаем

$$\alpha_6 = d_k - d_{\text{возд}} - h_{25} = 5^{-0,075} - 3^{\pm 0,01} - 1,156^{+0,002} = 0,844^{+0,01}_{-0,087} \text{ мм}.$$

Далее определяем припуск на подрезку слева  $x_1$  (рис. 4.11).

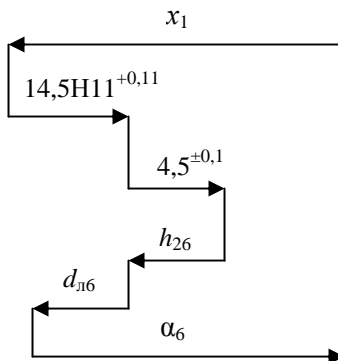


Рис. 4.11. Размерная цепь для определения величины подрезки  $x_1$

Исходные данные:  $h_{26} = 11,075 \pm 0,1$  мм;  $d_{л6} = 7,5 \pm 0,01$  мм;  
 $\alpha_6 = 0,844^{+0,01}_{-0,087}$  мм.

Припуск на подрезку слева

$$x_1 = 14,5H11^{+0,11} + 4,5^{\pm 0,1} - 11,075^{\pm 0,1} -$$

$$- 7,5^{\pm 0,01} + 0,844^{+0,01}_{-0,087} = 1,269^{+0,23}_{-0,297} \text{ мм.}$$

Определяем припуск  $x_2$  на подрезку торца оправы справа (рис. 4.12).

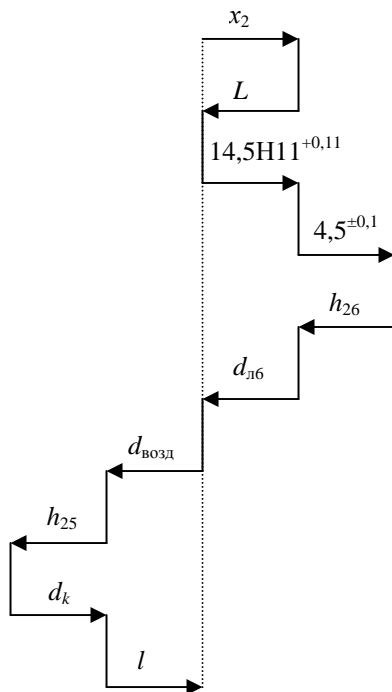


Рис. 4.12. Размерная цепь для определения величины подрезки  $x_2$

Исходные данные:

$$L = 22^{-0,21}; l = 19,5^{-0,13} \text{ мм.}$$

Припуск на подрезку справа

$$x_2 = 22^{-0,21} - 14,5H11^{+0,11} - 4,5^{\pm 0,1} + 11,075^{\pm 0,01} + 7,5^{\pm 0,01} + 3^{\pm 0,01} + \\ + 1,156^{+0,002} - 5^{-0,075} - 19,5^{-0,13} = 1,231_{-0,54}^{+0,427}.$$

По итогам расчётов делается вывод о соответствии полученных значений исходным данным указанным, например, в ТЗ, или их несоответствии и необходимости проведения дальнейшего изменения конструкции с целью уменьшения величины погрешности и обеспечения нормального функционирования системы.

Например, при энергетическом расчёте было установлено, что температура горячей стороны термоэлектрического модуля будет составлять 313 К. Способ охлаждения естественным потоком воздуха обеспечивает минимальную температуру в помещении, где находится прибор, 20 °С (или 293 К), следовательно, для её уменьшения до указанного значения потребуются принудительная конвекция воздуха, которая может быть обеспечена, в частности, установкой вентилятора. Далее определяют требуемый воздушный поток  $Q$  для отвода тепловой мощности  $W$  по формуле

$$Q = \frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{W}{\Delta T},$$

где  $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха;

$c_p = 1 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К} = 1 \text{ кВт}\cdot\text{с/кг}\cdot\text{К}$  – теплоёмкость воздуха при неизменном давлении;

$\Delta T = T_{\text{in}} - T_{\text{out}}$  – разность температур внутри и снаружи корпуса.

Ход выполнения энергетических, светотехнических расчетов и расчётов на точность приводится в соответствующем разделе ПЗ.

**При защите дипломного проекта в докладе делается ссылка на полученные результаты с указанием соответствующего чертежа узла, к которому они относятся.**

### 4.3.5. Аберрационный расчёт

Геометрическая оптика, как известно, является предельным случаем волновой оптики при бесконечно малой длине волны. С точки зрения геометрической оптики в приборе с идеальной оптической системой изображение каждой точки входной щели есть точка. При наличии аберраций лучи, вышедшие из какой-либо точки щели, уже не сходятся в одной точке; вместо этого в плоскости изображения получается пятно рассеяния.

На характер и значение искажения спектра, а для щелевых приборов – и на искажение изображения щели, оказывают влияние как монохроматические (сферическая аберрация, кома, астигматизм, кривизна поля, дисторсия), так и хроматические аберрации (хроматизм положения, хроматизм увеличения, хроматическая разность сферической аберрации).

Аберрационный расчёт оптической системы заключается в автоматическом выборе из каталога программы оптимизированной системы с характеристиками, ближайшими к заданным. При этом выбор принципиальной конструкции оптической системы тесно переплетается с её коррекционным расчётом. Коррекционный расчёт является наиболее автоматизированным этапом разработки оптических систем. Для этой цели созданы и эффективно используются программы, которые осуществляют автоматическое изменение определённых параметров некоторой исходной оптической системы с целью получения заданных (минимальных) значений аберраций [17].

Для объектива со сравнительно невысоким относительным отверстием сферическая аберрация, сферохроматические разности и условие изопланатизма рассчитывают для двух лучей: крайнего ( $m_{кр} = D/2$ ) и зонального ( $m_3 = m_{кр} / \sqrt{2}$ ). При высоких относительных отверстиях число лучей в осевом пучке увеличивают до трех-четырех ( $m_3 = m_{кр} / 2$ ;  $m_3 = m_{кр} / \sqrt{2}$ ;  $m_3 = (\sqrt{3}/2) \cdot m_{кр}$ ). График хроматизма положения обычно приводят для лучей на зоне  $m_3 = m_{кр} / \sqrt{2}$ .

*Аберрации главных лучей и наклонных пучков* рассчитывают для двух или трех точек поля у объективов с угловым полем до  $60^\circ$  и для четырех или пяти точек поля для широкоугольных объективов.



Аберрации широких наклонных пучков определяют на основании расчёта четырех или пяти лучей в меридиональном и двух или трех лучей – в сагиттальном сечении. Для светосильных систем с высоким относительным отверстием число лучей в пучке увеличивается.

В некоторых оптических системах (в фотообъективах, телескопических системах и пр.) обычно допускается виньетирование части наклонного пучка оправами линз или специальными виньетирующими диафрагмами. В этих случаях на оптических выпусках строятся диаграммы виньетирования, где следует указывать, какая поверхность или диафрагма вносит виньетирование. На графиках аберраций указываются зоны виньетирования. Для зеркальных и зеркально-линзовых систем на графиках аберраций рекомендуется указывать зоны центрального экранирования.

*Коррекция аберраций оптической системы* обычно выполняется для плоскости Гаусса. Однако плоскость, в которой получается наиболее благоприятное распределение лучей в пятне рассеяния, часто смещена относительно плоскости идеального изображения, что показывается на графиках поперечных аберраций для разных наклонов, построенных в системе координат  $\Delta y'$  и  $100\Delta t g \sigma'$ . Для определения этого смещения на графиках поперечных аберраций, построенных в системе координат  $\Delta y'$  и  $100\Delta t g \sigma'$ , через начало координат проводят прямую (секущую), отклонение которой от кривой поперечной аберрации является минимальным. В оптическом выпуске указывают значение смещения ПНУ относительно плоскости Гаусса.

Рассмотрим пример выполнения аберрационного расчёта дневного канала прибора ночного видения с широким полем зрения.

Исходными данными для проведения аберрационного расчёта являются:

- линейное увеличение рассчитываемой оборачивающей системы  $\beta \cong 0,24^{\times}$  (исходя из габаритного расчёта);
- спектральный диапазон работы  $\Delta \lambda = 480\text{--}640$  нм;
- предел разрешения ЭОП модели ЭПМ 53 Г-С  $R > 55$  штр./мм (в соответствии с техническими характеристиками ЭОП);
- расстояние от плоскости предмета до плоскости изображения системы  $L = 78,7$  мм.

С учётом приведённых исходных данных был произведён аберрационный расчёт в программном пакете Oral [18], в результате

которого были определены параметры оптических компонентов (радиусы кривизны линз, показатели преломления, толщины по оси и т. д.), межлинзовые расстояния, передние и задние отрезки и т. д.

Результатом аберрационного расчёта является **аберрационный выпуск**, который представляет собой совокупность графиков и таблиц и выносится в приложение к ПЗ (см. табл. М1–М8). Кроме того, он дополнительно **оформляется в виде чертежа как 2-й лист** (прил. С) **к принципиальной оптической схеме прибора** (прил. Р) в соответствии с правилами, приведенными в п.7.2.2.

#### **4.4. Этапы и последовательность выполнения компоновки прибора**

На основании проведенных предварительных расчётов осуществляют внутреннюю и внешнюю компоновку изделия с учётом требований ТЗ по функциональности, надёжности, а также эстетическим и эргономическим показателям. Данный пункт предусматривает правильный выбор и взаимное расположение основных функциональных элементов и узлов прибора, к которым чаще всего относятся:

- источники излучения (различные виды ламп, типы лазеров, светодиоды и другие полупроводниковые приборы);
- формирующие и передающие элементы ОС (телевизионные камеры, объективы, коллективы, окуляры и др.) [19, 20];
- диспергирующие устройства, предназначенные для преломления света, разложения или выделения части спектра (узлы призм, дифракционные решётки, щели, диафрагмы и т. п.);
- приёмники излучения (ПЗС-матрицы, ЭОП, ФЭУ, фотодиоды, различные детекторы и пр.);
- блоки управления и индикации (кнопки и клавиши, встроенные разъёмы, интерфейсные порты, ЖК-экраны и панели, одно- и многострочные дисплеи);
- блоки накопления информации (Flash-карты памяти, HDD жёсткие диски, винчестеры, USB устройства и др.);
- источники питания (внешние – работающие от сети переменного тока с напряжением 220 В и подключаемые к прибору через силовой присоединительный кабель; внутренние – вставляемые элементы питания или аккумуляторные батареи, обеспечивающие постоянное напряжение 3–12 В).

На первом этапе выполняют *предварительную компоновку* прибора. Осуществляют анализ оптической схемы прибора, на которой выделяют самостоятельные сборочные единицы. Внешнюю конфигурацию сборочных единиц обводят тонкой штрихпунктирной линией (для оптических компонентов) или тонкой сплошной линией (для механических компонентов). Например, для фотоповторителя (рис. 4.13) таковыми являются: основание 1, корпус 4 со светочувствительной пластинкой 6 (негатив), объектив 2, окулярная трубка со светоделителем 3 и осветитель 5. Указывают установочные базы (Б2, Б3, Б5) – присоединительные поверхности при сборке, и технологические базы (БТ) – поверхности, относительно которых осуществляется взаимная регулировка оптических компонентов. Устанавливают размерную взаимосвязь между базами.

На втором этапе осуществляют *окончательную компоновку* прибора. Определяют форму и размеры несущих элементов конструкций, оформляют органы управления и средства отображения информации с учётом требований инженерной психологии [21].

При компоновке прибора необходимо стремиться обеспечить:

- минимальные габаритные размеры и массу изделия;
- удобство разборки изделия для замены элементов, имеющих малый срок службы (источников света и т. п.);
- устойчивость и надёжность крепления сборочных единиц;
- удобство расположения органов управления прибором;
- доступность мест (разъёмов) подключения к внешним устройствам (кабели питания, кабели информационные, Flash-карты памяти и пр.).

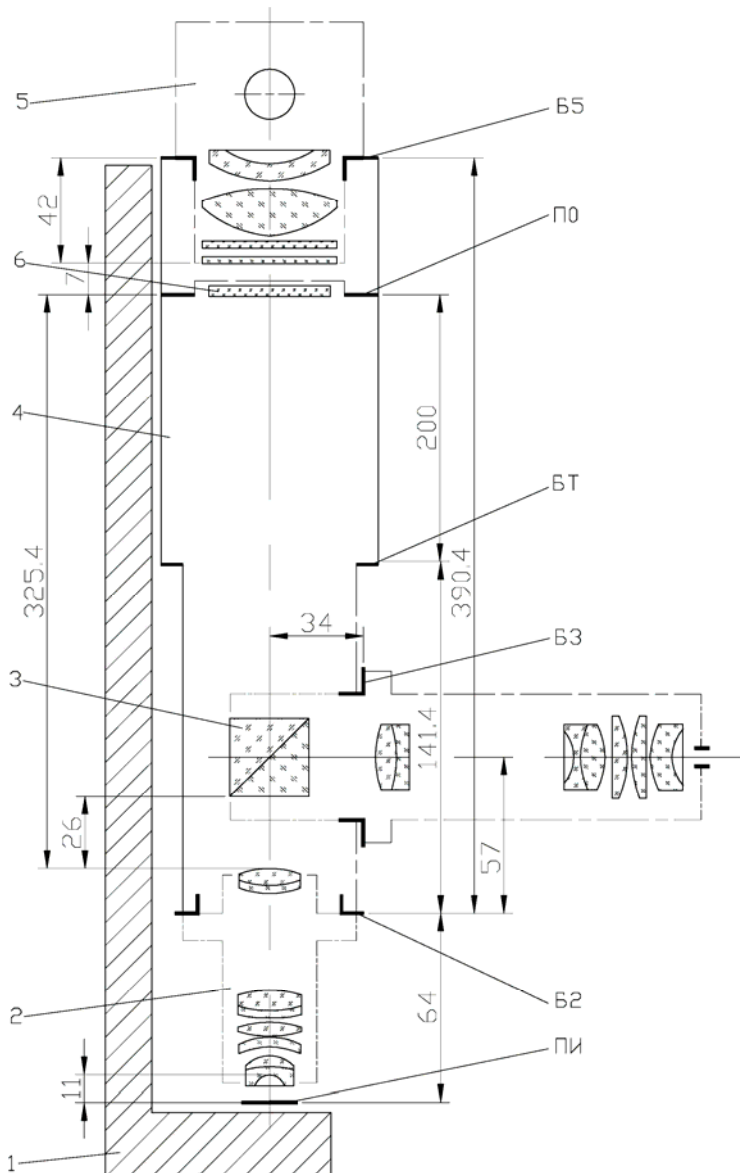


Рис. 4.13. Вариант компоновки фотоповторителя

#### 4.5. Описание конструкции, устройство и принцип работы прибора

Описание конструкции прибора производится в статике и динамике.

В статике первоначально перечисляется, из каких отдельных сборочных единиц (узлов) состоит изделие, и одновременно производится их нумерация. Указывается, как и посредством чего они соединены между собой. Описание устройства следует начинать с крупных базовых деталей (корпуса, тубуса, основания, плато и др.), которые обеспечивают базирование всех остальных, более мелких компонентов, входящих в изделие. При необходимости перечисляются более мелкие детали (крепёжные элементы), которые однозначно определяют правила сборки компонентов прибора или необходимы для правильной его настройки и юстировки.

Рекомендуется применять такие глаголы, как «состоит», «включает», «входит», «содержит», «соединен», «вкручен» и т. д., с дополнительным указанием, каким образом: «посредством», «с помощью», «благодаря», «за счёт» и т. п.

Отдельно на странице приводится рисунок (копия чертежа общего вида), на котором указываются позиции деталей (узлов, сборочных единиц) в строгом соответствии с теми, что упоминаются в тексте пояснительной записки. Если формат графического листа достаточно большой (A2–A1) и многие детали при уменьшении до формата A4 становятся неразличимыми, необходимо разделять исходный чертёж на виды (главный, сверху, сбоку) и представить каждый из них в пояснительной записке на отдельном листе формата A4.

Часто возникают ситуации, когда деталь является частью более мелкой сборочной единицы и имеет свой внутренний номер, но её упоминание крайне необходимо при описании общего принципа работы изделия, в этом случае вначале указывается собственно номер сборочной единицы, в которую деталь входит, а затем в круглых скобках дополнительно записывается основной её номер по спецификации оригинальных деталей, например, винт 3 (10).

После этого производится описание изделия в динамике, которое начинается с фразы ***Прибор работает следующим образом.***

При необходимости предварительно в описании указывается тот перечень действий, которые необходимо произвести оператору или

сборщику перед тем, как прибор перейдет в рабочее состояние (совместить деления на шкалах, выставить горизонтальный/вертикальный уровень, снять защитный колпачок/крышку, подсоединить разъём питания и пр.).

На данной стадии не обязательно упоминать все вышеперечисленные детали и компоненты (особенно это касается крепёжных элементов). Главным образом здесь задействуются те компоненты, которые непосредственно обеспечивают процесс измерения или участвуют в их подвижке (перемещении) (например, вариообъективы, оборачивающие системы, устройства переключения, револьверные и реечные механизмы, координатные столики, маховики и пр.).

Рекомендуется применять такие глаголы, как «включаем» (блок питания, двигатель), «поворачиваем» (рукоятку, маховик), «перемещается» (сетка, оправа), «наклоняется» (зеркало, призма) и т. д.

В конце описания прибора необходимо грамотно сформулировать рекомендации, которые необходимо выполнять пользователю в процессе эксплуатации изделия. Эти рекомендации часто содержат информацию, указываемую в технических требованиях на сборочных чертежах и чертежах общего вида прибора. Однако в данном случае в пояснительной записке приводятся разделы из технических условий, содержащие полный комплекс требований к продукции, её изготовлению, контролю и приёмке [22].

Чертёж общего вида или сборочный чертёж, по которому ведётся описание конструкции прибора, оформляется как **третий лист графического материала**. Если изделие является достаточно сложным техническим решением, то отдельные виды с указанных выше чертежей допускается выносить на последующие листы (**четвёртый лист графического материала**). Например, главный вид размещают на третьем листе, а вид сбоку, сверху или снизу – на четвёртом. Однако технические требования и технические характеристики размещают на третьем листе над основной рамкой чертежа. На **пятом листе** размещают два–четыре сборочных узла прибора, для которых проводились расчёты или которые непосредственно разрабатывались самим дипломником. На **шестом листе** приводятся рабочие чертежи деталей-представителей.

## 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ

Технологические проекты обычно составляют 20 % от общего объёма дипломного проектирования, выполняемого в текущем году. К числу государственных организаций, в которых выполняются такие дипломные проекты, относятся завод «Сфера» (БелОМО), Белорусско-германское СП «Цейсс-БелОМО» ООО, ОАО «Пеленг» или частные предприятия, такие как ООО «Изовак», опытно-конструкторское УП «Аксикон».

Примерная структура и содержание технологического проекта приведена в прил. Е.

### 5.1. Литературный обзор

#### *5.1.1. Обзор вариантов и сравнительный анализ существующих конструкций изделий с аналогичными оптическими изделиями*

В данном пункте кратко указывается назначение и область применения изделия, приводится состав конструктивных узлов и компонентов оптического прибора, принцип его работы. Разрабатывается сводная сравнительная таблица, в которой приводятся внешний вид (или оптическая схема) изделий; указываются типы или модели ОП (желательно указывать белорусских, российских и зарубежных производителей), а также их технические характеристики и подобные параметры (см. табл. 4.1). Оптический прибор, куда непосредственно должна входить проектируемая оптическая деталь, должен быть представлен на чертёже общего вида или сборочном чертеже, который оформляется как *первый лист графического материала*.

#### *5.1.2. Назначение оптической детали в приборе и область ее применения*

Если найти чертёж общего вида или сборочный чертёж всего изделия не представляется возможным, допускается вести описание назначения оптической детали по *сборочному чертежу* (или оптической схеме) *узла прибора*, в который она входит (рис. 5.1). Указанный сборочный узел приводится в конце *шестого чертежа* при описании схем и методов контроля готовой оптической детали.

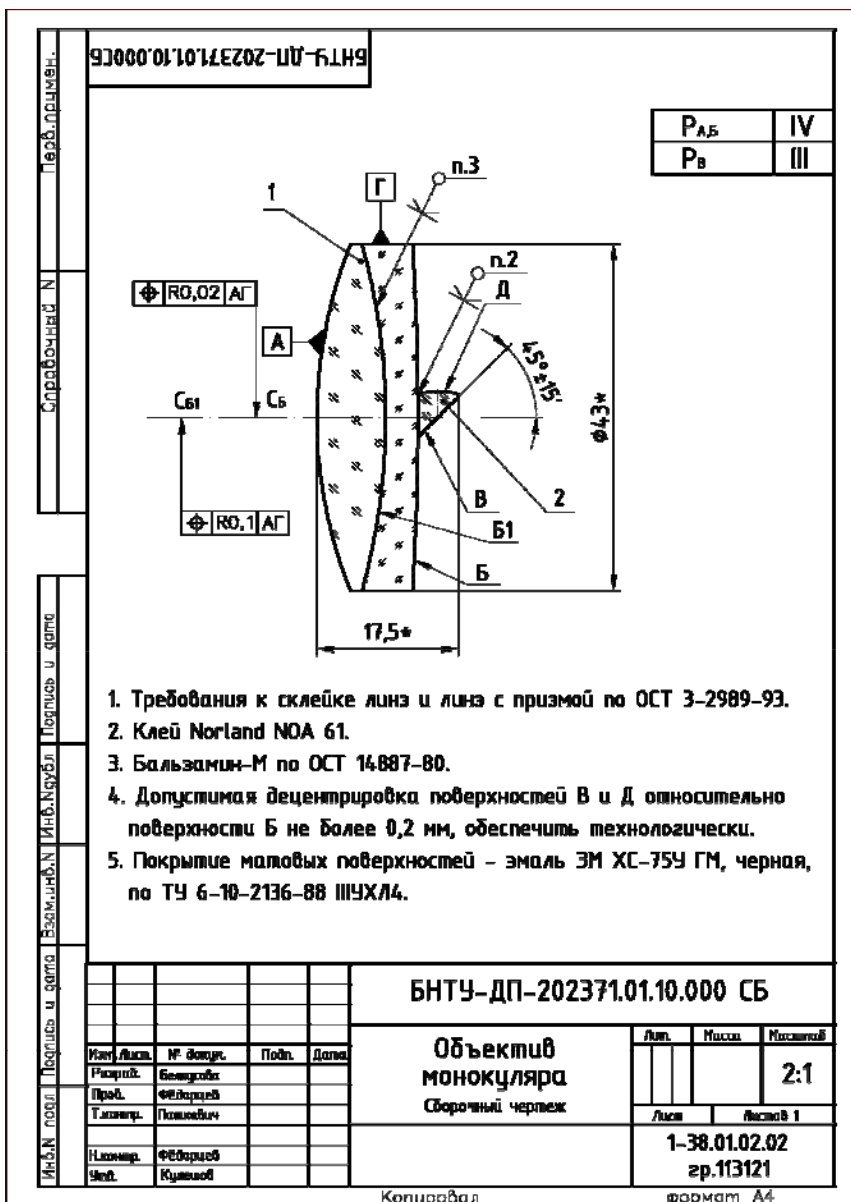


Рис. 5.1. Пример оформления сборочного чертежа «Объектив монокуляра»



Например: «Изготавливаемый телескопический объектив монокуляра представляет собой наиболее распространенную конструкцию и состоит из двух склеенных линз – двояковыпуклой из кронowego стекла марки ТК16 и вогнуто-выпуклой из флинтowego стекла марки ТФ4 (см. рис. 5.1).

Особенностью данной конструкции является дополнительное наличие в центральной зоне второй линзы приклеенного оптического компонента в виде модифицированной призмы АР-90° со сферической поверхностью. Данная призма изготовлена из стекла марки К8 и предназначена для ввода в поле зрения монокуляра лазерного излучения от полупроводникового диода, выполняющего функцию целеуказателя. Сферическая поверхность призмы выполняет роль собирающей линзы и позволяет фокусировать излучение непосредственно на рассматриваемом объекте, предмете или явлении.

## 5.2. Технологические процессы изготовления призм, линз, зеркал и других оптических деталей

Для разработки процесса изготовления какой-либо оптической детали необходимо иметь чертеж оптической детали, содержащий все требования к ней, чертеж заготовки; знать характеристики имеющегося на предприятии оборудования и размер партии выпускаемых изделий. Технологический процесс должен обеспечивать изготовление качественных деталей, высокую производительность и безопасность труда, наименьшую себестоимость выпускаемой продукции.

Основными документами, регламентирующими *технологический процесс*, являются технологические маршрутные и операционные карты. В *маршрутной карте* указывают перечень всех операций технологического процесса в порядке их выполнения. *Операционную карту* составляют отдельно на каждую технологическую операцию. Основным в этой карте является эскиз обработки детали. Деталь вычерчивают в том виде, в котором она получается после завершения данной операции. На эскизе должны быть проставлены все выдерживаемые размеры, классы точности, допуски, посадки, шероховатость обработки и другие необходимые требования. Все другие сведения (режимы обработки, нормы времени, шифр станка, инструмент и т. д.) указывают в соответствующих графах карты.

Существуют *три системы технологических процессов*: индивидуальные, типовые и групповые. **Индивидуальные технологические процессы** разрабатывают в условиях массового и крупносерийного производства для каждой детали отдельно и предусматривают также разработку всего комплекса технологической оснастки для обрабатываемой детали.

**Типовые технологические процессы** разрабатывают для деталей одного класса, близких по конструкции, размерам, точности и общности их производства. Например, прямоугольные призмы, применяемые в биноклях различных моделей, имеют небольшие конструктивные особенности и составляют один класс деталей. В типовой процесс включают основные элементы конкретного технологического процесса: крепление детали в приспособлении, последовательность операций, тип оборудования и оснастки и т. д. На основе типового технологического процесса можно составить конкретный процесс любой детали данного класса. Типовые процессы сокращают сроки подготовки производства, их применяют для серийного и мелкосерийного производства.

В **групповых технологических процессах** за основу берут не отдельную деталь, а группу технологически сходных деталей. Сам технологический процесс разрабатывают для комплексной детали, отвечающей всем требованиям группы деталей. Групповые процессы используют в мелкосерийном производстве.

### ***Этапы проектирования технологического процесса изготовления оптической детали***

1. Выбрать вид заготовки и определить её размеры.
2. Назначить очередность обработки поверхностей заготовки.
3. Рассчитать геометрические параметры обрабатывающего инструмента для предварительного шлифования сферических и плоских поверхностей (например, алмазного круга).
4. Распределить припуск на механическую обработку поверхностей ОД (призм, пластин, линз и т. п.) между операциями, предусмотренными технологическим процессом.
5. Рассчитать плоский блок (плоскопараллельные пластинки, призмы, плосковыпуклые и плосковогнутые линзы) и наклейные приспособления с учётом имеющегося технологического оборудования.

6. Рассчитать сферический блок и наклеечные приспособления для его сборки.

7. Рассчитать конструктивные элементы обрабатывающего инструмента для тонкого шлифования (свободным и связанным абразивом) сферических и плоских поверхностей. Если выполнение данной операции предусматривается с помощью свободного абразива, определить конструктивные элементы планшайб, грибов и чашек (радиус рабочей поверхности, высота грибов, глубина чашек, диаметр планшайб).

8. Определить конструктивные элементы инструмента для полирования плоских и сферических поверхностей. Выбрать материал рабочей поверхности инструмента.

9. Рассчитать угол зажатия линзы между патронами центрировочного станка. В зависимости от величины этого угла и заданной точности совмещения геометрической и оптической осей линзы выбрать способ установки линзы на станке. Определить радиус фасетировочной чашки.

10. Разработать технологический маршрут изготовления заданной детали.

Техпроцессы изготовления призм отличаются увеличенным объёмом заготовительных операций, применением сложных наклеечных приспособлений, использованием способа оптического контакта и специфичных наклеечных приспособлений из стекла, изготавливаемых с высокой точностью взаиморасположения контактных поверхностей.

### ***5.2.1. Выбор материала для изготовления оптической детали***

Оптические материалы подразделяются на следующие виды: бесцветные, цветные и кварцевые стекла, ситаллы, монокристаллы и поликристаллы (оптическая керамика) [22].

Предварительный выбор марки оптического материала осуществляется на стадии расчёта аберраций компонентов, входящих в оптическую систему прибора, и окончательно – при разработке рабочего чертежа оптической детали с учётом оптимального обеспечения следующих основных отличительных признаков:

– высокая **однородность** партии деталей по показателю преломления ( $n_{e1} - n_{e2}$ ) и дисперсии, т. е. обеспечения одинаковости значений у всех заготовок при отжиге (классы А, Б, В, Г → понижение);

– высокая прозрачность, которая оценивается по светопоглощению (**показателю ослабления**) и в среднем должна составлять  $\mu\text{A}-0,0002-0,0025 \text{ см}^{-1}$  (на 1 см толщины материала) (категории 1, 2, 3, 4 → повышение) по ГОСТ 23136–93 [23];

– соответствующая категория и класс по номинальному **показателю преломления**  $\Delta n_e$  света в материале (от 1,4375 для S-FPL53 до 4,010 для Si) по ГОСТ 3514–94;

– рабочая **длина волны**  $\lambda$  устанавливается в пределах от ультрафиолетовой (10–380 нм) до инфракрасной (760–5000 нм) области спектра и определяется исходя из назначения и условий работы прибора;

– **лучевая (оптическая) прочность** характеризует прочность оптических материалов, работающих с лазерным излучением. Она важна для материалов таких деталей, как активные элементы твердотельных лазеров (например, из неодимового стекла), резонаторы, окна, линзы, зеркала, призмы, установленные в пучках лазерного излучения. Различают три вида лучевой прочности оптических материалов: термоупругое растрескивание, разрушение вследствие разогрева инородных включений и пробой в поле световой волны (явление самофокусировки) [24].

Кроме перечисленных выше параметров при выборе материала необходимо учитывать также и остальные физико-механические и оптические характеристики, определяемые ГОСТ 13659–78.

В данном пункте ПЗ на основании рассмотренных параметров приводится развёрнутое обоснование выбора определённой марки стекла или кристалла. Для нахождения определённой марки оптического материала целесообразно пользоваться каталогами известных мировых производителей данного вида продукции: Schott (Германия) [25], OHARA (Германия) [26], ГОСТ 3514–94 (Россия) [27], CDGM (Китай) [28].

### **5.2.2. Обоснование выбора метода получения заготовки и расчёт её геометрических параметров**

Различают следующие виды получения оптических заготовок:

– круглый цилиндрический прокат (вытягивание в штабик);

- прямоугольный листовой прокат (пластины и плиты);
- прессованные из стекломассы шамотные (с непрозрачными включениями в поверхностном слое);
- прессованные из стекломассы чистовые.

Первоначально поставляемые заводом оптического стекла заготовки могут иметь размеры до 500 мм, поэтому в большинстве случаев, непосредственно на заготовительном участке оптического предприятия, их подвергают дополнительной расколке или механической разделке с последующей обработкой края.

Вследствие наличия высокотемпературных термических процессов, протекающих при формировании исходной оптической заготовки, а также из-за наличия значительных локальных деформаций, сопутствующих процессу плавления стекла, в её поверхностном слое присутствует ряд дефектов: шамот, дым, складки, вмятины, приливы, рифли и др., которые при отсутствии последующей механической обработки могут отрицательно сказываться на качестве готовой ОД.

Параметры качества заготовок линз и пластин регламентирует ГОСТ 13240–78. Общая толщина заготовки  $t_3$  определяется по следующей формуле:

$$t_3 = \left| t + \Delta t_{\text{в}} + h_1 + h_2 + F_{\text{деф1}} + F_{\text{деф2}} + (-\Delta t_3) \right|_{-\Delta t_3}^{+\Delta t_3},$$

где  $t$  – толщина готовой детали, мм;

$\Delta t_{\text{в}}$  – верхний предел допуска на толщину, мм;

$F_{\text{деф1}}$  и  $F_{\text{деф2}}$  – дефектный слой соответственно на верхней и нижней поверхности заготовки (табл. 5.1), мм;

$h_1$  и  $h_2$  – стрелки прогиба на линзе соответственно для первой и второй поверхности ( $h = 0$ , если  $h / D < 0,03$ , т. е. линза имеет сферическую поверхность с большим радиусом кривизны или в ней присутствует одна из плоских поверхностей, а также если расчёт относится к ОД с плоскими поверхностями: призмы, шкалы и пр.), мм;

$(-\Delta t_3)$  – нижний предел допуска на толщину (принимается в расчётах с отрицательным значением для гарантированного удаления с поверхности заготовки), мм.

Таблица 5.1

## Геометрические параметры качества заготовок линз и пластин

Вид заготовки	Марка стекла	Диаметр или ширина заготовки $D_3$ , мм	Допуск на диаметр или ширину $\pm\Delta D_3$ , мм	Допуск на толщину $\pm\Delta t_3$ , мм	Дефектный слой, мм	
					$F_{\text{деф1}}$	$F_{\text{деф2}}$
Круглый цилиндрический прокат (штабик)	К, ЛК, БК, Ф, ЛФ, ТФ, ОФ	8–17	$\pm 0,2$	+1,0/–0,5	0,5	0,5
Прессованные чистовые	Ф, ЛФ, ТФ, ОФ	12–22	$\pm 0,2$	+0,3/–0,3	0,5	0,5
Шамотные	ОК, ФК, СТК, ТБФ	До 20	$\pm 0,3$	+1,5/–0,5	0,5	0,8
		20–50	$\pm 0,3$	+1,0/–0,5	0,5	0,8
		50–80	$\pm 0,5$	+1,0/–0,5	0,5	0,8
		80–120	$\pm 0,8$	+1,5/–0,5	0,8	1,5

Припуск  $\delta_D$  на механическую обработку заготовок линз и пластин по диаметру назначают согласно требованиям ОСТ 3-510–79 (табл. 5.2).

Таблица 5.2

## Соотношение припуска на обработку и диаметра детали

Диаметр детали $D$ , мм	Припуск $\delta_D$ , мм
До 20	1,3
20–50	1,5
50–100	2,5
100–150	3,5

Таким образом, выбор метода получения заготовки необходимо осуществлять с учётом следующих факторов:

- полного удаления дефектного слоя со всех поверхностей исходной заготовки;
- физико-механических свойств (качественных характеристик) самой заготовки;
- функционального назначения ОД, её габаритных размеров, объёма партии и серийности выпуска готового изделия;

– обеспечения минимального съёма припуска с поверхности заготовки, т. е. коэффициент использования материала  $K_{им}$  должен оптимальным, это, в свою очередь, обеспечит максимальную загрузку оборудования по мощности и времени:

$$K_{им} = \frac{m_{дет}}{m_{заг}} \rightarrow 1,$$

где  $m_{дет}$  и  $m_{заг}$  – масса готовой оптической детали и заготовки соответственно, г.

$$m_{заг} = V_{заг} \cdot \rho_{ТК16},$$

где  $V_{заг}$  – объём заготовки, определяется исходя из линейных геометрических размеров (для плоских деталей: длины  $\times$  ширины  $\times$  высоты; для круглых деталей – диаметра и толщины), см<sup>3</sup>;

$\rho_{ТК16}$  – плотность стекла марки ТК16, г/см<sup>3</sup>.

Например

$$m_{заг} = (4,9 \cdot 4,9 \cdot 1,3) \cdot 3,56 = 111,1 \text{ г.}$$

Расчёт численных значений припуска проводится для всех поверхностей заготовки. Каждое полученное значение в последующем суммируются с размерами готовой ОД и проставляется на чертеже заготовки с соответствующими предельными отклонениями. Рядом с размерами заготовки в скобках как справочные проставляют соответствующие размеры готовой детали. Для деталей с размерами более 150 мм на заготовке также указывают световой диаметр или расположение рабочей зоны (прил. Т).

### ***5.2.3. Выбор клеечного приспособления и расчёт количества заготовок в блоке***

После подготовительной и заготовительной стадий обработки детали поступают на участки шлифования и последующего полирования. Для повышения производительности труда и снижения основного рабочего времени оптические заготовки обрабатываются блоками. Блоки заготовок могут быть собраны эластичным, жестким или сепараторным способами [29, 30].

При расчёте блоков последовательно решают следующие задачи: выбирают оптимальную схему расположения заготовок на приспособлении, устанавливают оптимальное количество одновременно обрабатываемых заготовок, определяют геометрические размеры блока (диаметр и высоту для сферических заготовок или диаметр для плоских заготовок), которые нужны при расчете инструмента и приспособлений, при выборе оборудования, обрабатывающих и вспомогательных материалов. Рассчитанный блок должен удовлетворять двум условиям:

1. Обеспечивать размещение на приспособлении как можно большего числа заготовок.
2. Заготовки должны быть распределены равномерно по всей его поверхности.

Первое условие направлено на повышение производительности, второе – на увеличение точности формы поверхности каждой детали. Существуют три схемы размещения круглых заготовок: одна ( $n_1 = 1$ ), три ( $n_1 = 3$ ) или четыре ( $n_1 = 4$ ) относительно центра приспособления.

В качестве примера рассмотрим эластичный способ блокировки линз. Этот способ обеспечивает лучшую точность обработки поверхностей и технологически проще в реализации по сравнению с двумя вышеперечисленными. Базирование заготовок выполняется по настроенной базе, положение заготовок на приспособлении фиксируется приклеиванием. Толщина клеящего слоя смолы  $t_{см}$  связана соотношением

$$t_{см} \leq (0,1-0,2) \cdot D_{заг}.$$

Из-за недостаточной прочности соединения данный способ сборки блоков применяют в основном после операции грубого шлифования отдельных заготовок. Термопластические свойства клеящих веществ ограничивают интенсификацию режимов тонкого шлифования и полирования блоков. В то же время наклейные приспособления просты в изготовлении и универсальны в использовании. Точность конструктивных параметров деталей, в частности толщины пластин и линз в пределах заданных на рабочем чертеже, обеспечивают без применения дополнительной операции подгонки.



Для повышения производительности процесса целесообразно применение сферических блоков с углом раствора  $180^\circ$  (полусфера). Однако процесс формообразования в этом случае имеет ряд технологических сложностей, поскольку нормальная составляющая  $P_n$  усилия  $P$ , с которым обрабатываемая поверхность прижата к инструменту, изменяется по закону  $P_n = P \cdot \cos \gamma_{\text{бл}} / 2$  и при  $\gamma_{\text{бл}} = 180^\circ$   $P_n = 0$  [30]. Износ краевой зоны заготовок нижнего ряда будет происходить лишь за счет относительной скорости перемещения блока и инструмента. Ограничение угла раствора блока  $\gamma_{\text{бл}}$  упрощает процесс формообразования.

В качестве примера рассмотрим расчёт сферического блока для обработки выпуклой поверхности линзы.

Расчет производим в соответствии с формулами источника [22].

В соответствии с конструктивными данными рабочего чертежа ОД радиус готовой детали  $R_1 = +57,81$  мм; толщина заготовки  $t_3 = 8,5$  мм; диаметр заготовки  $D_3 = 44,5$  мм.

Диаметр сферического блока  $D_{\text{сф.бл}}$  условно принимаем равным двум радиусам обрабатываемой поверхности, т. е.

$$D_{\text{сф.бл}} = 2R_1 = 115,62 \text{ мм.}$$

Обработка будет производиться на шлифовально-полировальном станке мод. 6ШП-200, максимальный диаметр обрабатываемого на нём плоского блока  $D_{\text{пл.бл}} = 200$  мм.

В нашем случае  $D_{\text{сф.бл}} < 0,9 D_{\text{пл.бл}}$ , следовательно, угол раствора  $\gamma_{\text{бл}}$  рассчитываем по формуле

$$\gamma_{\text{бл}} = \frac{5600}{R_1 + 60} + 88^\circ = \frac{5600}{57,81 + 60} + 88^\circ = 135,53^\circ.$$

Если  $D_{\text{сф.бл}} > 0,9 D_{\text{пл.бл}}$ , то для расчёта  $\gamma_{\text{бл}}$  используют выражение

$$\gamma_{\text{бл}} \leq 2 \arcsin \frac{0,9 D_{\text{пл.бл}}}{2R_1}.$$

Положение заготовок на блоке определяют два угла:

угол  $\phi$  характеризует раствор заготовок в меридиональной плоскости (рис. 5.2);

угол  $\theta$  характеризует положение заготовок в сагиттальной плоскости (рис. 5.3).

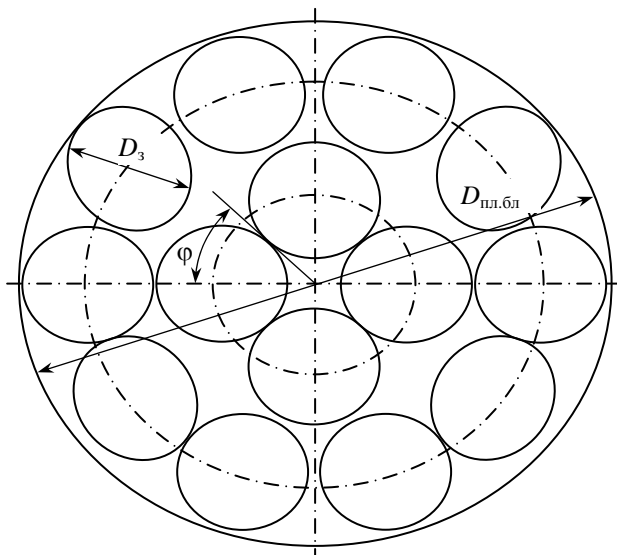


Рис. 5.2. Схема расположения заготовок на клеучном блоке

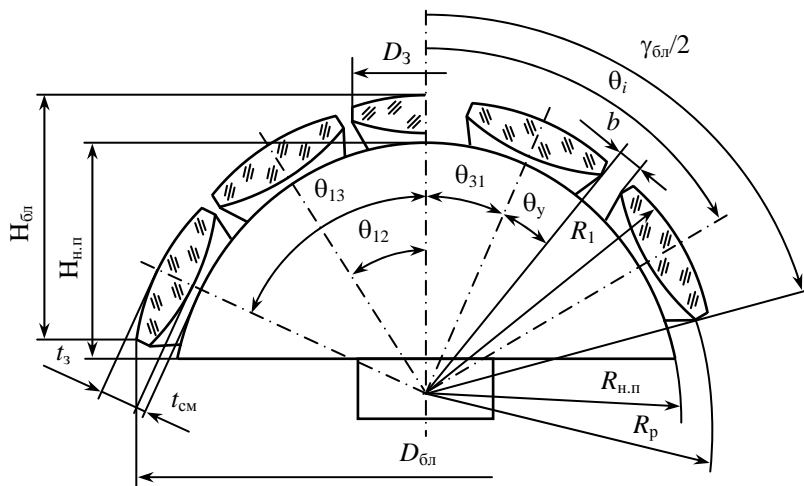


Рис. 5.3. Основные расчётные параметры выпуклого сферического блока

При  $n_1 = 1$  угол  $\theta_1 = 0$ .

$$\text{При } n_1 = 3 \text{ угол } \theta_{31} = \arctg \sqrt{\frac{4B}{3-B}} = \arctg \sqrt{\frac{4 \cdot 0,159}{3-0,159}} = 25^\circ;$$

$$\text{при } n_1 = 4 \text{ угол } \theta_{41} = \arctg \sqrt{\frac{2B}{1-B}} = \arctg \sqrt{\frac{2 \cdot 0,159}{1-0,159}} = 31^\circ,$$

$$\text{где } B = \left( \frac{D_3 + b}{2R_p} \right)^2 = \left( \frac{44,5 + 1,6}{2 \cdot 57,81} \right)^2 = 0,159.$$

Исходя из значений радиуса сферической поверхности и с учётом диаметра заготовок, расстояния между заготовками на сферическом блоке принимаем равными  $b = 1,6$  мм.

Значения углов  $\theta$  для последующих рядов, независимо от числа заготовок в первом ряду:

$$\theta_i = \theta_1 + 2\theta_y(i-1),$$

$$\text{где } \theta_y = \arctg \frac{D_3 + b}{2R_p} = \arctg \frac{44,5 + 1,6}{2 \cdot 57,81} = 21^\circ.$$

Тогда для второго ряда

$$\theta_{12} = \theta_{41} + 2\theta_y(i-1) = 31 + 2 \cdot 21 \cdot (2-1) = 73^\circ.$$

Далее определяем число рядов заготовок:

$$l_{n_i=1} = 1 + \frac{\gamma_{6л/2} - \theta_y}{2\theta_y};$$

$$l_{n_i=3} = 1 + \frac{\gamma_{6л/2} - \theta_{31} - \theta_y}{2\theta_y};$$

$$l_{n_i=4} = 1 + \frac{\gamma_{6л/2} - \theta_{41} - \theta_y}{2\theta_y} = 1,38.$$

Полученное расчётное значение округляем в большую сторону до целого числа. Таким образом, для нашего случая при размещении в центре четырёх заготовок число рядов  $l_{n_i=4} = 2$ .

Углы  $\varphi$  при числе заготовок в первом ряду  $n_1 = 3$  и  $n_1 = 4$  равны соответственно  $60$  и  $45^\circ$ . Для остальных рядов углы  $\varphi$  рассчитываются по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 \theta_i + 1}{\frac{\operatorname{tg}^2 \theta_i}{B} - 1}}.$$

Число  $n_i$  заготовок по рядам и их общее количество  $M$  на блоке

$$n_i = 180^\circ / \varphi_i, \text{ шт.};$$

$$M = \sum_{i=1}^l n_i = 4 + 10 = 14.$$

Окончательная высота блока

$$H_{\text{бл}} = R_{\text{бл}} \cdot (1 - \cos \gamma_{\text{бл}} / 2).$$

Радиус наклеечного приспособления

$$R_{\text{нп}} = R_1 - t_3 - t_{\text{см}},$$

где  $R_1$  – выпуклая поверхность;

$$R_{\text{нп}} = R_1 + t_3 + t_{\text{см}},$$

где  $R_1$  – вогнутая поверхность.

Расчётный радиус блока

$$R_p = R_1 - t_3 + h_2,$$

где  $R_1$  – выпуклая поверхность;

$h_2$  – стрелка прогиба второй сферической поверхности.

$$R_p = R_1 - h_1,$$

где  $R_1$  – вогнутая поверхность;

$h_1$  – стрелка прогиба первой сферической поверхности.

Высота наклеечного приспособления

$$H_{\text{нп}} = R_{\text{нп}} \cdot (1 - \cos \gamma_{\text{бл}} / 2).$$

Диаметр наклеечного приспособления

$$D_{\text{нп}} = 2 \cdot R_{\text{нп}} \cdot \sin(\gamma_{\text{бл}} / 2).$$

Диаметр блока

$$D_{\text{бл}} = 2 \cdot R_{\text{бл}} \cdot \sin(\gamma_{\text{бл}} / 2).$$

Расчётные формулы для остальных вариантов сочетания выпуклых и вогнутых поверхностей оптической детали приведены в источнике [22, с. 306–311].

Найденное при расчёте блока расположение заготовок в центральной зоне не зависит от способа его сборки (эластичного или жёсткого).

На рис. 5.3 схематично изображен сферический блок и показаны все рассчитываемые для блоков параметры.

#### ***5.2.4. Расчёт и выбор основного технологического инструмента***

Выбор формы и типа инструмента определяется стадией обработки, назначением технологической операции, а также физико-механическими характеристиками самой оптической детали (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Виды и назначение инструмента для обработки оптических материалов

Наименование инструмента	Обозначение и нормативный документ	Назначение и область применения
Алмазные отрезные сегментные круги	Форма АПСД ГОСТ 16115-88 Форма АОК ГОСТ 10110-87Е	Распиливание блоков и больших кусков стекла или пластин
Сверла алмазные кольцевые	ОСТ 3-6007-85 с державкой форма АСК эксцентриковые формы АСКЭ сегментные формы АСКС тонкостенные трубчатые формы АСПП	Сверление отверстий в стекле
Алмазные круги	Формы 1А1 ГОСТ 16167-90 Формы АПП1, АПП2, АППК ОСТ 3-6007-85	Круглое шлифование пластин, центрирование и фасетирование линз
Алмазные круги, грибы, чашки и планшайбы	Кольцевой круг 2F2 и АК1 ОСТ 3-6007-85 2А2 ГОСТ 17006-80 12А2 ГОСТ 16172-80 Грибы, чашки, планшайбы ОСТ 3-4791-80, ОСТ 3-4780-80	Предварительное шлифование сферических и плоских поверхностей оптических материалов
Свободный абразив	Грибы ОСТ 3-3513-85 Чашки ОСТ 3-3514-85 Планшайбы ОСТ 3-3515-85	Окончательное шлифование и полирование сферических и плоских поверхностей ОД

Существует определённая последовательность расчёта алмазного инструмента:

1. Определяют зернистость  $d_{3,a}$  (ГОСТ 9206-80Е) алмаза в инструменте, которая зависит от относительной кривизны обрабатываемой поверхности:

при  $h/D > 0,7$  средний размер зерна основной фракции алмазного порошка  $d_{3,a,c} = 50 + 0,62 \cdot D_3$ ;

при  $h/D < 0,7$  назначают  $d_{3,a} = 63/50$ .

2. Находят расчётную концентрацию  $K_{3,a}$  алмаза в инструменте:

$$K_{3,a} = \left[ \frac{30 + 0,2 \cdot D_3}{25} \right] \cdot 25 \% .$$

Полученное значение  $K_{3,a}$  приводят к ближайшему нормализованному: 25, 50 или 100 %.

3. Рассчитывают радиус кривизны  $R_3^{п.ш}$  поверхности заготовки:

$$R_3^{п.ш} = R \pm (0,001d_{3,a}^2 + 0,5d_{3,a} + 4)(1/H_S) ,$$

где  $R$  – радиус поверхности готовой детали;

$d_{3,a}$  – наибольший размер зерна основной фракции алмаза (числитель в обозначении зернистости);

$H_S$  – коэффициент относительной твёрдости стекла по сошлифовыванию;

«±» – знаки, относящиеся к выпуклой (+) или вогнутой (–) обрабатываемой поверхности.

4. Определяют угол наклона  $\alpha_p$  (EW) шпинделя инструмента относительно вертикальной оси изделия и расчётный диаметр  $D_{и,р}$  инструмента (рис. 5.4 и 5.5):

$$\alpha_p = \arcsin \frac{0,55D_3}{2R_3^{п.ш}} ; \quad D_{и,р} = \frac{0,55D_3}{\cos \alpha_p} .$$

5. Выбирают диаметр инструмента  $D_{и}$ , ближайший к расчётному.

Число  $M_{эл}$  алмазосодержащих элементов, размещаемых на корпусе гриба, чашки или планшайбы, определяют, исходя из их размеров (табл. 5.4), коэффициента  $k$  заполнения площади конуса элементами и их диаметра  $D_{эл}$ :

$$\text{для планшайб} \quad M_{эл} = (D_{пл} / D_{эл})^2 k ;$$

$$\text{для грибов и чашек} \quad M_{эл} = (R^{шпл} H / D_{эл}^2) \cdot 8k ,$$

где  $D_{пл}$  – диаметр планшайбы, мм;

$R^{\text{шл}} = R_1 \pm F_{d_{3,a}}$  – радиус рабочей поверхности шлифовального инструмента, рассчитываемый для каждого перехода по известному радиусу  $R_1$  поверхности готовой детали и глубины нарушенного дефектного слоя  $F_{d_{3,a}}$ ;

$H$  – высота (глубина) гриба (чашки) соответственно, мм.

Таблица 5.4

Основные размеры алмазосодержащих элементов ТУ 3-269–84

Диаметр $D_{\text{эл}}$ , мм	Радиус сферы $R^{\text{шл}}$ , мм	Толщина $s$ , мм	Зернистость алмаза $d_{3,a}$ , мкм
6,0±0,4	12; ∞	3	40/28
8,0±0,6	16; 20; 25; 40; ∞	4	28/20
10,0±0,8	20; 25; 32; 40; 63; ∞	5	20/14
14,0±1,0	∞		14/10
			10/7

### 5.2.5. Выбор марки и зернистости шлифующих и полирующих абразивных материалов

Все технологические операции, предусматривающие механическую обработку оптических материалов, выполняют с использованием шлифующих и полирующих абразивов [22].

В зависимости от способа получения различают природные и синтетические абразивные материалы. Шлифующие абразивы применяют в свободном (водные суспензии, пасты) или связанном состоянии (алмазный инструмент).

Выбор марки шлифующего абразивного материала осуществляют с учётом назначенного числа технологических переходов (зернистость абразива на каждом последующем переходе должна уменьшаться) и с постепенным приближением к значению минимальной шероховатости, которая является исходным значением для начала операции полирования. Необходимо также стремиться обеспечить оптимальное соотношение между максимальной производительностью процесса обработки, характеризуемой параметром относительная шлифующая способность (табл. 5.5), и достижением минимального значения глубины нарушенного (дефектного) слоя ( $F_{Mn}$ , мкм) оптического материала.



Таблица 5.5

## Классификация шлифующих абразивных материалов

Наименование абразива	Условное обозначение, основной состав и назначение	Относительная шлифующая способность
Алмаз (модифицированный углерод С)		1,0
<i>природный</i>	A1, A2, A3, A5, A8	
<i>синтетический</i>	AC2, AC4, AC6, AC15, AC20, AC23, AC50	
Кубический нитрид бора	КНБ (эльбор) бор (43,6 %) и азот (56,4 %)	0,58–0,60
Карбид бора В <sub>4</sub> С	КБ	0,5–0,6
Карбид кремния SiC		0,25–0,45
<i>Черный</i>	53С, 54С, 55С	
<i>Зелёный</i>	63С, 64С	
Электрокорунд Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,14–0,16
<i>нормальный</i> (цвет: розовый, светло или тёмно-коричневый)	13А, 14А, 15А (92–96 % оксида Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
<i>белый</i>	13А, 14А, 15А (99 % оксида Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
<i>легированный</i> (цвет: розовый или тёмно-вишнёвый)	33А, 34А (примеси Сг), технический рубин 37А (примеси Ti), технический сапфир 38А (циркониевый)	
<i>монокорунд</i>	43А, 44А, 45А (повышенная прочность и твёрдость, предназначен для правки)	0,15–0,25

Карбид кремния получают из смеси кварцевого песка (51–55 %), кокса (35–40 %) с добавкой NaCl (1–5 %) и древесных опилок (5–10 %). Благодаря высокой твёрдости, химической устойчивости и износостойкости карбид кремния широко применяется как абразивный материал на заготовительных операциях. На завершающих стадиях шлифования его использование нецелесообразно из-за высокой твёрдости осколков разрушенных зерен, которые на обработанной оптической поверхности могут образовывать глубокие выколки и царапины.

Карбид бора получают плавлением шихты, состоящей из борного ангидрида и кокса. Он имеет ограниченное применение в свободном состоянии, применяется для сверления отверстий и шлифования твёрдых оптических материалов.

Все шлифующие абразивы в зависимости от размера зерна разделяются на группы, внутри которых установлено дополнительное деление по номеру зернистости (для основной фракции) (табл. 5.6). Процентное соотношение крупной, основной и мелкой фракции регламентируется для алмазного порошка по ГОСТ 9206–80\*Е, для остальных – по ГОСТ 3647–80.

Таблица 5.6

Зернистость абразивных материалов

Группа	Номер зернистости (мкм)	Глубина нарушенного слоя ( $F_{Mn}$ ) мкм
Шлифзерно	200, 160, 125, 100, 80, 63, 32, 25, 20, 16	
Шлифпорошки	12, 10, 8, 6, 5, 4, 3	
Микропорошки	M63, M50, M40,	
	M28	22
	M20	15
	M14	10
Тонкие микропорошки	M10	7
	M7	5
	M5	3

Для обработки полупроводниковых кристаллов, синтетического корунда и других кремниевых материалов используют алмазные субмикропорошки зернистостью 0,7/0,3; 0,5/0,1; 0,3/0,1; 0,1/0.

В качестве полирующих абразивов используют растворы порошков оксидов некоторых редкоземельных металлов (табл. 5.7).

На СП «Цейсс-БелОМО» в качестве шлифующих абразивных средств применяют, например: Optik Schmirgel FRPL 280 ALODUR «FRPL», Abralox 225/ F 400/17, Microgrit WCA T9 (белый кальцинированный карбид алюминия) и Abralox F 500/13, а в качестве полирующих средств используют Opaline Feststoff (Франция), Auерpol PZ 500 (Ce02-Pz 500) (Австрия), NanoArc CE-6450 (15%-я или 18%-я водная суспензия с коллоидной степенью дисперсности) (Германия, Великобритания).

Таблица 5.7

## Классификация полирующих абразивных материалов

Наименование абразива	Условное обозначение, основной состав и зернистость	Относительная полирующая способность	Назначение и область применения
1	2	3	4
Алмаз	Микропорошки АСМ и АСН 3/2 – 1,0; субмикropорошки 0,7/0–0,3/0		Полирование кристаллов рубина и кремния
Крокус	Безводный оксид железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 1,0/0,6 (концентрация суспензии Т : Ж = 1 : 5–1 : 10)	1,0	Сетки, шкалы, первые линзы широкоугольных окуляров (I класс чистоты)
Оксид тория	Зерна ( $\text{ThO}_2$ ) 4-гранной формы, размером до 10 мкм	2,2	Полирование оптических деталей высокой твёрдости
Оксид хрома	Зерна ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 1,2/0,8; 0,4/0,3	0,5	Полирование кристаллов малой твёрдости
Полирит оптический ТУ 48-4-424–87 (Казахстан)	Диоксид церия $\text{CeO}_2$ (53 %), зерна 1,4/1,3 (концентрация суспензии Т : Ж = 1 : 10)	1,5	Полирование деталей из химически стойких и нестойких стёкол (ФФС)
Фторопол ТУ 334–97	Диоксид церия $\text{CeO}_2$ (75–90 %), (концентрация суспензии Т : Ж = 1 : 4). Модификации: «К» (зерна 3,2 мкм)		Материал полировального войлока: натуральный войлок, смола пекоканифольная, пенополиуретан
	«У» (зерна 1,35 мкм)	2,1	Высокоскоростная обработка очковой оптики, ситаллов, кварца и др.
	«М» (зерна 1,28 мкм)	1,0	Нейтральные стёкла
		0,9	Высокоточная оптика, химически нестойкие и мягкие стёкла
Оптипол-1 ТУ 328–96 (Россия)	Диоксид церия $\text{CeO}_2$ (56 %), зерна 1 мкм	1,7	Полирование кроновых стекол и элементов электронной техники: фотошаблоны, п/п пластины

Окончание табл. 5.7

1	2	3	4
Порошок ПФ-О ТУ 95-1161-83 (Эстония)	Диоксид церия $\text{CeO}_2$ (81–89 %), зерна 1,4/0,9; (концентрация суспензии Т : Ж = 1 : 15–1 : 20)	2,4	Полирование химически стойких стёкол на эластичных полировальниках
Церит ТУ 48-4-467-85 (Россия) Ce-Rite 4250 (США)	Диоксид церия $\text{CeO}_2$ (99,9 %) или (70 %), зерна 1,2/0,7 (концентрация суспензии Т : Ж = 1 : 10)	2,8	Полирование химически нестойких стёкол с высокой твёрдостью (СТК) на полировальниках из пенополиуретана
Фотопол ТУ 48-3861-39/0-80	Разновидность Церита, зерна 0,75/0,4 (концентрация суспензии Т : Ж = 1 : 10)	1,7	Полирование стёкол ЛФ, Ф, ТФ, ФФС, ОК кристаллов Si, Ge, ДКДП на смоляных полировальниках. Высокая точность формы поверхности
Элпол ТУ 48-3821-40-86	Диоксид церия $\text{CeO}_2$ (50 %), зерна 1,7/1,3 (концентрация суспензии Т : Ж = 1 : 10)		Полирование деталей с высокой твёрдостью по сошлифовыванию на полировальниках с рабочей поверхностью из синтетических материалов
Цириспол	Двуокись циркония $\text{ZrO}_2$ (80–70 %) и двойной основной сульфат циркония $\text{Zr}(\text{OH})_2\text{SO}_4$ (20–30 %), зерна 5/3,5; (концентрация суспензии Т : Ж = 1 : 3)	1,0 – 2,0	Полирование деталей из стекла марки СТК
Оксопол	Разновидность Цириспола по способу получения. Модификации:		Полирование деталей из стекла марки:
	ДГ	1,2	ТК
	ДС и ДС-1	2,4	СТК

Среди зарубежных производителей абразивных полирующих порошков высокую популярность получили следующие марки: Cerox 1650 (средний размер частиц – 1,54 мкм), Cerox 1670 (2,15 мкм) (Франция); Regipol 800 (3,15 мкм), Regipol 950 (1,35 мкм) (Англия) и др.

Недостатком циркониевых полировальных композиций является их кислотность, которая приводит к быстрому изнашиванию исполнительных частей оборудования, находящихся в контакте с суспензией.

Выбор марки полирующего абразивного материала следует осуществлять с учетом обеспечения требуемого значения шероховатости и чистоты обработанной оптической поверхности, заданных на рабочем чертеже детали.

Необходимо также учитывать относительную полирующую способность абразива (см. табл. 5.5) и соответствующий технологический переход (зернистость полирующего абразива на каждом последующем переходе также должна постепенно уменьшаться).

Полирующую способность оценивают по массе, мг, стекла марки К8, сполированного в заданный промежуток времени (мин) в стандартных производственных условиях.

### ***5.2.6. Применение вспомогательных материалов***

К вспомогательным материалам, используемым при обработке заготовок из оптического стекла и кристаллов, относятся: смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), блокировочные вещества, защитные лаки, промывочные жидкости, средства очистки оптической поверхности и многое другое.

СОЖ предназначены для повышения стойкости инструмента и вывода продуктов износа из зоны обработки. СОЖ применяются как на заготовительных операциях: распиливании, сверлении, круглении, так и на стадиях предварительного и тонкого шлифования (табл. 5.8). Применение водосодержащих СОЖ на стадии полирования алмазными материалами с малой нагрузкой приводит к окислению обрабатываемой поверхности или образованию налёта [22]. На финишных стадиях обработки в качестве СОЖ рекомендуется применять веретенное или вазелиновое масло.

Блокировочные вещества применяются для термопластического соединения заготовок оптических деталей с наклеечным приспособлением (табл. 5.9) [22].

Наклеечные смолы марок НС-1–НС-5, MKS/hell Haerte 39 служат для наклеивания оптических заготовок на планшайбу.

Таблица 5.8

Марки СОЖ, рекомендуемые для обработки оптических деталей

Вид СОЖ	Химические компоненты и процентный состав
Эмульсия	Эмульсол УВК (2–8 %) ГОСТ 1975–75; керосин (0–8 %); вода (85–98 %); кальцинированная сода (0,2–4 %) ТУ ВУ 390528423.004–2010
Водный раствор эмульсола НГЛ-205, Э-2(Б), Э-3(В)	Сульфокислоты (75 %); тринатрийфосфат (15 %); глицерин (10 %); эмульсол (3–5 %) ТУ 38-101-547–80
Водный раствор глицерина	Глицерин (10–20 %); триэтаноламин (0,5%) ГОСТ 6824–96
Водный раствор «Фосфопаг» (0,1–0,3 %)	ТУ 2332-037-41547288–2006

Таблица 5.9

Марки вспомогательных веществ для блокировки оптических заготовок

Вид материала	Толщина клеящего слоя, мм	Химические компоненты и процентный состав
Наклеенные смолы ОСТ 3-6461–88		Канифоль сосновая (гарпиус) (25–90 %) ГОСТ 19113–84; пек сосновый (пластификатор); парафин нефтяной ГОСТ 19660–74; битум (2 %) ГОСТ 781–78; пчелиный воск ГОСТ 21179–75; шеллак (40–50 %) (Е904)
Эластичный метод	Более 1 мм 0,1–0,2d ОД	
Жёсткий метод		
Наклеенные воски	0,2–0,3	Пчелиный воск (20–10 %) ГОСТ 21179–75; канифоль сосновая (80–90 %) ГОСТ 19113–84
Наклеенные парафины	0,05–0,1	Парафин (15–20 %) ГОСТ 23683–89; пчелиный воск (85–80 %) ГОСТ 21179–75
Гипс оптический	Определяется высотой призмы	Г-3П, Г-6П ГОСТ 125–79; медицинский ОСТ 21-8–80

Наклеечная смола марки НСт служит для фиксации заготовок большого диаметра. При наклеивании деталей микрооптики применяется смола НСш. Наклеечный воск используют для крепления пластин на приспособлении. Для крепления тонких пластин на приспособлении применяют смолу НЦ-85. Если требуется преодолеть проблему обработки мягких оптических кристаллов, используется специальная смола марки НВ [31].

Материалы для рабочей поверхности полировального инструмента выбираются в зависимости от интенсивности процесса полирования, устойчивости формы его рабочей поверхности по времени и обеспечения заданной чистоты поверхности на оптической детали (табл. 5.10).

Таблица 5.10

Материалы рабочей поверхности полировального инструмента

Вид материала	Показатели качества полированной поверхности		
	Точность формы $N$	Погрешность формы $\Delta N$	Шероховатость $R_z$ , мкм
Войлок шерстяной ГОСТ 288–72, сукно шинельное ГОСТ 11236–74	6,0–15,0	2,0–5,0	0,01
Пенополиуретан	2,0–3,0	0,2–0,5	0,1
Связанный полирующий абразив для инструмента на основе композиции «Аква-пол» ИСМ им. В.Н. Бакуля	2,0–3,0	0,3–0,5	0,05
Полировочные смолы ГОСТ 11506–73, ОСТ 3-6461–88	0,1	0,05	0,05

При полировании оптических деталей по классическим схемам и с использованием традиционного инструмента преимущественно используют смолы марок СП1–СП13. Коэффициент вязкости смолы (её мягкость) возрастает по мере увеличения численного значения в обозначении. Мягкая смола обеспечивает получение оптической поверхности высокой чистоты, однако при этом сложно длительное

время сохранить форму самой рабочей поверхности полировально-го инструмента. Если техпроцесс требует интенсивного полирования, то выбор следует делать в пользу оптических смол марки ПСм.

Так, например, технология «Синхроспид», широко применяемая на СП «Цейсс-БелОМО», предусматривает применение полиуретановых плёнок для полирования: Folie PU grau 135 (толщиной 0,51 и 0,81 мм) или Rotbraun 166 (толщиной 0,51 мм), которые фиксируются на планшайбе, грибе или чашке (см. рис. 5.5) посредством удерживающих клеечных средств Haltekitt (НК 5510А, 6508А, 7003А, 7504А Schwarz, 7506 А/Q) (Pie plow & Brand GmbH).

Для центровки оптических деталей при их обработке применяют центрировочные смолы марок ЦС-4 и ЦС-5, ЦС-6, а также С-kitt.

К вспомогательным материалам также относятся жидкости для промывки и чистки оптических деталей (табл. 5.11).

Таблица 5.11

Вещества для промывки оптических деталей

Наименование вещества	Удаляемые вещества
Бензин ГОСТ 3134–78	Сосновый пек, воск, жировой налёт
Ацетон ГОСТ 2768–84	Канифоль, защитные лаки на основе нитроэмали, жиры, каучук
Спирт этиловый ГОСТ 17299–78	Наклеечные смолы, спиртовые лаки, шеллак
Смесь: 75 % спирта и 25 % бензина 85 % спирта и 15 % ацетон 50 % ацетон и 50 % бензин	Смолы, защитные лаки

Основными требованиями для таких материалов являются: эффективное удаление посторонних веществ с поверхности, отсутствие частиц, способных повредить обработанную поверхность, отсутствие адгезии к основному материалу и нетоксичность.

При выборе способа промывки ОД необходимо учитывать объём деталей в партии, стадию обработки и другие параметры. Как правило, промывку осуществляют как ручным способом (с использованием аэрозольных распылителей, ватных тампонных палочек или хлопчатобумажных салфеток), так и механическим способом на специальных установках типа КП-1М, У-247 или НТ-493М.



Например, на СП «Цейсс-БелОМО» промывка оптических деталей выполняется в 18-камерной ультразвуковой очистительной установке Naicotec Automatik-systeme и предусматривает 18 циклов последовательной очистки в различных средах (деталь поступает неочищенная: лак, смола, абразив):

1. Щелочной раствор N-метилпирролидона (40 °С) (УЗ-поле 44 кГц) (первый цикл очистки в ванне обеспечивает предварительное удаление с поверхности детали лака и смолы);

2. N-метилпирролидон (NMP);

3. N-метилпирролидон (NMP);

4. N-метилпирролидон (NMP);

5. Спирт + NMP;

6. Вода проточная;

7. Вода + рН-нейтральный и мягкий щелочной фильтр (Optimal 9.12 + Optimal 9.9);

8. Вода + рН-нейтральный фильтр (Optimal GS10);

9. Вода из цикла (проточная вода из ванны (п. 6), прошедшая фильтры);

10. Вода + фильтр Optimal 27;

11. Вода из цикла (проточная вода из ванны (п. 9), прошедшая фильтры);

12. Вода из цикла (проточная вода из ванны (п. 11), прошедшая фильтры);

13. Циклогексан + обезжириватель (УЗ-поле);

14. Циклогексан + обезжириватель (УЗ-поле);

15. Циклогексан (ГОСТ 14198–78);

16. Циклогексан;

17. Циклогексан;

18. Циклогексан.

Из большого числа известных на сегодняшний день растворителей предпочтительно используется вода, поскольку она является негорючим и нетоксичным растворителем и не вступает во взаимодействие с лакокрасочными и защитными покрытиями оптической детали. Изопропиловый и этиловый спирты, кетон и петролейный эфир являются горючими веществами; хлорированные углеводороды (трихлорэтилен, перхлорэтилен, трихлортрифторэтан) – токсичны, обладают канцерогенным и мутагенным воздействием, образуют

смог и требуют утилизации отходов методом захоронения; хладон разрушает озоновый слой и усиливает парниковый эффект.

Органические растворители не удаляют отпечатков пальцев беспротирочно, поэтому для окончательного удаления загрязнений используют моющий щелочной раствор на основе циклогексана [32].

Готовые детали на разных стадиях обработки протирают фланелевыми или батистовыми салфетками (ГОСТ 8474–54) и упаковывают в папиросную бумагу (ГОСТ 3479–60).

### ***5.2.7. Характеристика технологического оборудования***

В данном пункте приводится сравнение различных моделей технологического оборудования, которое можно применить при изготовлении требуемой оптической детали. Предпочтительный выбор следует отдавать станкам, имеющим, с одной стороны, минимальные показатели по энергопотреблению (потребляемой мощности), габаритным размерам и стоимости, с другой – отличающихся высокой точностью и надёжностью. При этом необходимо учитывать производственные мощности и технологические возможности предприятия, на котором планируется размещение заказа для изготовления оптического изделия. Целесообразно выбирать наиболее распространённые и широко известные на производстве модели оборудования. В качестве источников информации рекомендуется использовать каталоги предприятия и справочники [22, 30], а также сайты ОАО «Сморгонский завод оптического станкостроения» [33], РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» [34], Satis-Loh GmbH [35] и OptoTech Optikmaschinen GmbH [36] Schneider Kreuznach [37], Lapmaster [38] и другие интернет-ресурсы.

Выбор оборудования осуществляется с учётом последовательности операций технологического процесса изготовления оптической детали. Первую группу обычно составляют распиловочные станки для формирования профиля заготовок, например алмазные типа АОС-200, К-8618, SPM-100 или лазерные технологические установки для резки листового стекла модели ЛУТ-2, а также сверлильные станки для получения отверстий в ОД или обработки их внутренних поверхностей типа 2Н-106П; 2Н-55.

Вторую группу оборудования составляют универсальные станки, автоматы и полуавтоматы для предварительной обработки, скруг-

ления заготовок (модели БШС-10М) обычной и повышенной точности; обдирочные станки моделей ОС-320–ОС-1500 для обработки свободным абразивом или станки, работающие с закреплённым алмазным инструментом, например круглошлифовальные модели ЗВ-110А, сферошлифовальные модели Алмаз-250 и др. Данная группа станков обеспечивает предварительный съём припуска с поверхности заготовки и максимально приближает её форму к готовой детали.

К третьей группе относятся станки тонкого алмазного шлифования, например моделей ЗША-20, ШП-50А, SPS-100, SLC-301, а также станки для одно- и двухстороннего полирования и доводки поверхностей свободным абразивом, например, моделей ЗШП-350М, ЗПД-320А, СД-2 и др. Технологические процессы обработки плоских и сферических поверхностей оптических деталей составляют примерно 80–90 % всего объёма производства. Остальная часть отводится для получения асферических, цилиндрических и шаровидных поверхностей. Например, на станках модели «Парабола-70-1» (ножевой инструмент), «Планета» (гибкий упругий инструмент), «Асфероид-100» (алмазный кольцевой инструмент) можно сформировать вогнутые и выпуклые параболические, эллипсоидные и гиперболические поверхности. Станки модели ШПА-200 или ШПА-500 предназначены для шлифования и полирования свободным абразивом выпуклых и вогнутых цилиндрических поверхностей.

К этой же группе относятся станки для сопутствующих финишных операций технологического процесса – центрирования, например ЦС-100, АЦСМ, WG Laser, или фасетирования ОД – DZ-48, DZ-61.

Четвёртую группу технологического оборудования составляют станки (моделей СП-15М–СП-1000М) для нанесения растворов химических оптических покрытий и вакуумные установки (моделей ВУ-1А, ВУ-2М, А-1100Q, CZ-111 и др.) для ионной обработки и напыления физических покрытий.

В указанном пункте ПЗ приводятся назначение технологического оборудования, рисунок с изображением основных узлов станка, габаритными размерами, внешним видом (при необходимости), предприятие-изготовитель и другие особенности его конструкции. Основные технические характеристики выбранных станков сводятся в общую таблицу (например, табл. 5.12), информация из которой используется в дальнейшем при заполнении маршрутных и операционных карт технологического процесса.

Свободная таблица основного технологического оборудования для изготовления линз телеобъектива и призмы AP-90 со сферической поверхностью

Наименование параметра (оборудования)	Отрезной станок	Сферошлифовальный станок	Шлифовально-полировальные станки	Доводочный станок
Модель	К-8611М	Алмаз 70-IV	ЗШП-350	6ШП-200А
Диаметр изделия (блока), мм	180 × 200 × 90	20–70	200–350	100–200
Радиус кривизны, мм	–	40–∞	–	–
Число шпинделей	1	1	3	6
Частота вращения шпинделя, с <sup>-1</sup>	1500	8,3 (изделия) 200 (инструмента)	0,4; 0,8; 1,7; 3,3	0,75–4,7
Подача, мм/мин	–	1–20	–	–
Частота качаний поводка, дв. ход/мин	–	–	8–100	19–84
Максимальный размах поводка, мм	–	–	240	150
Поворот, град	360 верт. ось ±10 гориз. ось	–	–	–
Усилие на поводке, Н	–	–	60–1100	30–784
Потребляемая мощность, кВт	3,0	3,0	7,0	6,85
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	1200 × 880 × × 1770	1300 × 800 × × 1500	2120 × 1100 × × 1160	2570 × 980 × × 1650
Масса, кг	600	800	1900	2100
				760 × 610 × × 922
				150

### **5.2.8. Описание маршрута обработки по основным и вспомогательным технологическим операциям**

Изготовление большинства оптических деталей включает три технологических этапа:

**1. Заготовительные операции** предназначены для удаления лишнего материала с заготовки и придания ей формы, максимально приближенной к конфигурации готовой детали. К заготовительным операциям относятся резка стекла, распиливание, обдирка.

**2. Основные технологические операции:** фрезерование контурное, уступов, пазов и т. д., центрирование и фасетирование по наружному диаметру, сверление сквозных и глухих отверстий, шлифование предварительное и окончательное свободным абразивом, грубое и тонкое алмазным инструментом, финишное полирование и доводка, нанесение покрытий на оптические детали.

**3. Вспомогательные операции** (наклейка, склейка, блокировка и др.) служат для крепления деталей на приспособлениях и группировки их для совместной дальнейшей обработки или для удаления всевозможных загрязнений (промывка, протирка).

### **5.2.9. Выбор метода обработки оптических поверхностей**

Для получения тонкого матового микрорельефа поверхности с минимальным разрушенным слоем применяют **метод глубокого шлифования и полирования**. Данный метод реализуется на шлифовально-полировальных и доводочных станках с применением приспособлений в виде плоских наклеечных планшайб и смоляной фиксации заготовок. Организационно предусматривается последовательное выполнение трёх технологических переходов операции шлифования микропорошками определённой зернистости и одной операции полирования. На каждом из переходов осуществляется равномерный съём незначительной величины припуска (табл. 5.13).

Оптические детали должны поступать на обработку по данному методу с выдержанными конструктивными требованиями по клиновидности, пирамидальности, толщине и угловым размерам. На глубокую полировку детали должны поступать с плоскостностью порядка 1 мкм. Плоскостность контролируется, например, с помощью интерферометра ПК-452, а качество микрорельефа поверхности контролируется визуально с помощью лупы 6<sup>x</sup>.

Таблица 5.13

Последовательность операций по методу глубокого шлифования  
и полирования

Операция и номер перехода	Зернистость микропорошка		Припуск на шлифование
	Вариант 1	Вариант 2	
Шлифование			
1-й переход	M20	M20	0,1 <sub>-0,03</sub>
2-й переход	M14	M10	0,05 <sub>-0,01</sub>
3-й переход	M10	M7	0,05 <sub>-0,01</sub>
Полирование (15–16 часов)	Полирит оптический		0,03 <sub>-0,005</sub>

Полировальный инструмент предварительно располировывают для размягчения и разогрева рабочей поверхности. Блок с деталями тщательно промывают водой с помощью щётки.

На оптическом предприятии методы глубокого шлифования и полирования регламентированы технологическими инструкциями (например, на заводе «Сфера» – ТИ-33-10 от 05.08.1974).

Другим альтернативным методом обработки является способ принудительного формообразования оптической поверхности, известный за рубежом как *технология «Синхроспид»* (Synchro Speed technology), применяемая, в частности, на СП «Цейсс-БелОМО». Согласно этой технологии каждая заготовка обрабатывается по отдельности и индивидуально фиксируется в вакуумном патроне (рис. 5.4 и 5.5).

Алмазный шлифовальный или полировальный инструмент закрепляется под определённым расчётным углом  $\alpha$  (EW) к вертикальной оси вращения заготовки, значение которого определяется из выражения

$$R = D_{\text{и}} \cdot 2 \sin \alpha ,$$

где  $R$  – радиус поверхности готовой детали, мм;

$D_{\text{и}}$  – диаметр инструмента, мм.

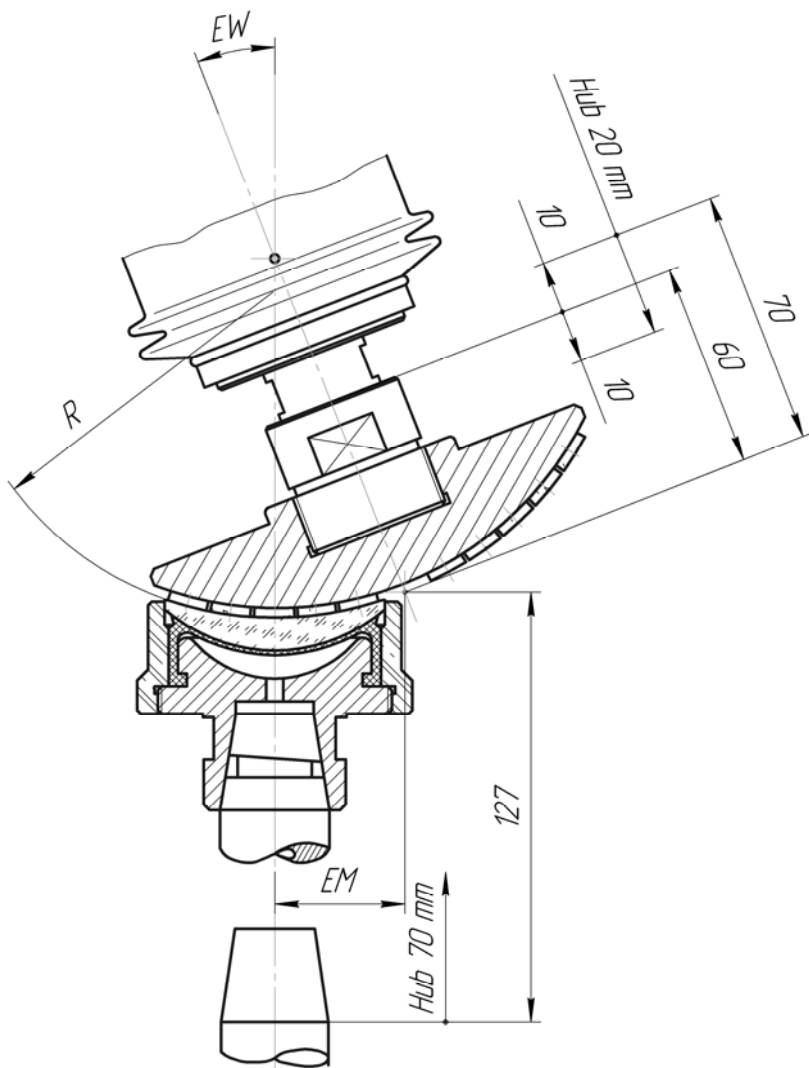


Рис. 5.4. Схема алмазного шлифования вогнуто-выпуклой линзы по технологии «Синхроспид»

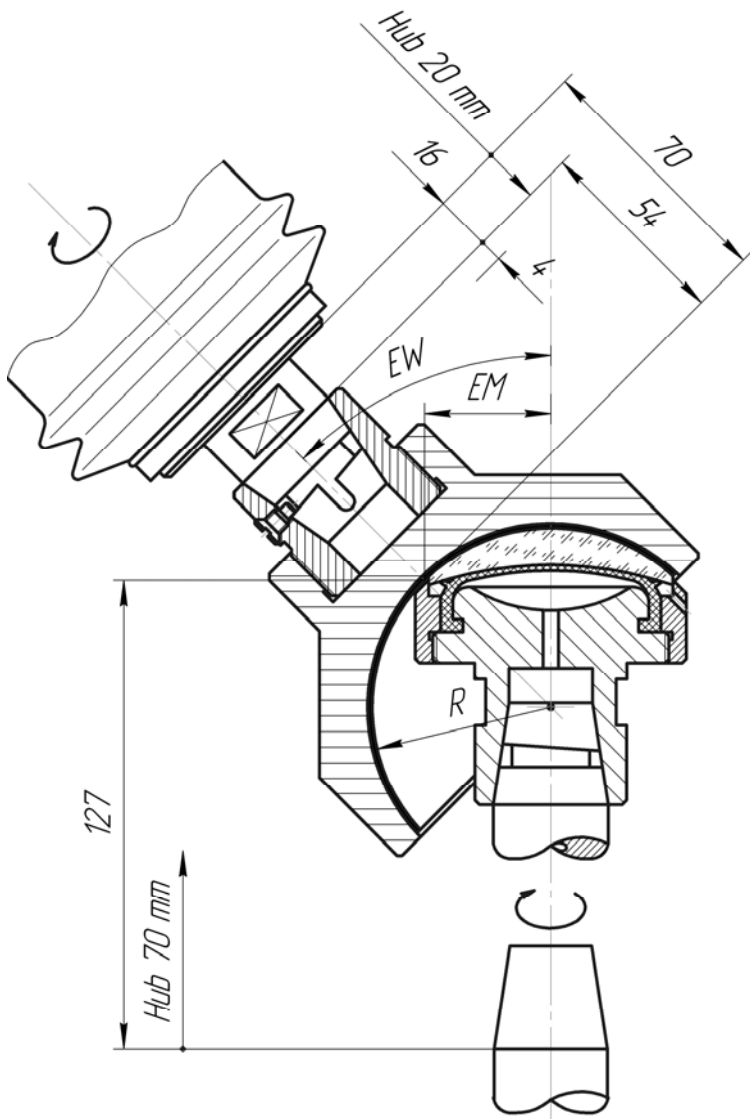


Рис. 5.5. Схема эластичного полирования вогнуто-выпуклой линзы по технологии «Синхроспид»



Скорости вращения инструмента и патрона с оптической заготовкой взаимосинхронизированы. В данном методе точность обработки оптической поверхности напрямую определяется точностью применяемого технологического оборудования.

В производственных условиях технология «Синхроспид» реализуется на оборудовании CNC digital machine, например SLC 301 (компания Schneider, Germany), (компания Meopta–optika, s.r.o. Czech Republic) или Synchro Speed Machine CM-2 SL (компания LOH, Optotech).

### ***5.2.10. Разновидности и правила оформления технологической документации***

Общие правила и положения по порядку разработки, комплектации, оформления и обращения технологической документации, применяемой на предприятии при изготовлении и ремонте изделий, регламентируются комплексом нормативных документов «Единая система технологической документации» (ЕСТД) (ГОСТ 3.1001–81). Полный перечень стандартов ЕСТД включает 40 стандартов группы 3.XXXX-XX. ЕСТД облегчает создание единой информационной базы на предприятии; обеспечивает рациональное использование технологического оборудования; способствует минимальному переформлению при передаче технологической документации с одного предприятия на другое; уменьшает трудоемкость инженерно-технических работ, выполняемых в сфере технологической подготовки производства и в управлении производством.

В соответствии с ГОСТ 3.1201–85 обязательному обозначению подлежат комплекты документов на типовые и групповые технологические процессы (операции) и технологические инструкции, а также на единичные технологические процессы, применяемые в среднесерийном, крупносерийном и массовом типах производства. Система обозначений технологической документации приведена на рис. 5.6. Комплектность технологических документов устанавливается на единичные (ЕТП) (ГОСТ 3.1119–83), типовые (ТПП) и групповые (ГТП) (ГОСТ 3.1121–84) технологические процессы и зависит от типа производства по ГОСТ 14.004–83; стадии разработки документов по ГОСТ 3.1102–81; степени детализации описания технологических процессов, установленных по ГОСТ 3.1109–82; применяемых технологических методов изготовления и ремонта изделий.

Код организации-разработчика***Вид документации***

01	Комплект технологической документации	47	Ведомость специфицированных норм расхода материалов
02	Комплект документов технологического процесса (операции)	48	Ведомость удельных норм расхода материалов
04	Комплект временных документов технологического процесса (операции)	50	<i>Карта технологического процесса</i>
05	Комплект проектной технологической документации	55	Карта типового (группового) технологического процесса
06	Комплект директивной технологической документации	57	Карта типовой (групповой) операции
07	Комплект документов технологического процесса (операции) информационного назначения	59	Карта технологической информации
09	Стандартный комплект документов технологического процесса (операции)	60	ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА
10	МАРШРУТНАЯ КАРТА	62	Карта наладки
20	КАРТА ЭСКИЗОВ	66	Карта расчета информации
25	Технологическая инструкция	67	Карта кодирования информации
30	Комплектовочная карта	70	Технологическая ведомость
40	Ведомость технологических документов	71	Ведомость применяемости
41	Ведомость технологических маршрутов	72	Ведомость операций
42	Ведомость оснастки	75	Технико-нормировочная карта
43	Ведомость материалов	77	Ведомость деталей, изготовленных из отходов
44	Ведомость деталей (сборочных единиц) к типовому (групповому) технологическому процессу (операции)	78	Ведомость дефектации
45	Ведомость сборки изделия	79	Ведомость стержней
46	Ведомость оборудования	80	Ведомость держателей подлинников

Рис. 5.6. Система обозначений технологической документации (начало)

<b>X</b>	<b>XX.</b>	<b>XXXXX</b>
<b>ПОРЯДКОВЫЙ РЕГИСТРАЦИОННЫЙ</b>		
<b><i>Вид технологического процесса по методу выполнения</i></b>		
00 – без указания 01 – общего назначения 02 – технический контроль механических величин 03 – технический контроль физических величин 04 – перемещение и складирование 06, 07 – испытания: (15 – на функциональность; 75 – на герметичность) 08 – консервация и упаковывание 10, 11 – литьё металлов и сплавов 21 – обработка давлением 40 – механическая обработка 41 – обработка резанием токарная, шлифовальная, зубообрабатывающая, строгальная, протяжная, долбежная, отделочная 42 – обработка резанием сверлильная, расточная, фрезерная, отрезная 44 – обработка на автоматах продольной подачи	45 – групповая наладка на многошпиндельных и одношпиндельных автоматах 46 – обработка на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) 50 – термическая обработка 51 – термическая обработка с нагревом ТВЧ 55 – фотохимико-физическая обработка 60, 61 – формообразование из полимерных материалов, керамики, стекла и резины 65 – порошковая металлургия 71 – получение покрытий (металлического и неметаллического неорганического) 72 – электрофизическая, электрохимическая и радиационная обработка 73, 74 – получение покрытий лакокрасочных (органических) 75 – фотолитография 80, 81 – пайка 85, 89 – электромонтаж 88 – сборка 90, 91 – сварка	
<b><i>Вид технологического процесса (операции) по организации</i></b>		
0 – без указания 1 – единичный процесс (операция) 2 – типовой процесс (операция) 3 – групповой процесс (операция)		

Рис. 5.6. Система обозначений технологической документации (окончание)

В соответствии с ГОСТ 3.1102–81 все технологические документы подразделяются на основные (табл. 5.14) и вспомогательные (рис. 5.7). В свою очередь группа основных документов классифицируются по двум направлениям – общего и специального назначения.

Таблица 5.14

Основные технологические документы

Вид документа, условное обозначение, нормативный документ	Назначение документа
1	2
<b>ДОКУМЕНТЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ</b>	
Титульный лист (ТЛ); формы 1, 2, 3, 4 ГОСТ 3.1105–84	Является первым листом комплекта технологических документов на технологические процессы изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия)
Карта эскизов (КЭ); формы 6, 6а, 7, 7а, 8, 8а ГОСТ 3.1105–84; ОСТ 3–3.1121–84 форма 11	Графический документ, содержащий эскизы, схемы и таблицы и предназначенный для пояснения выполнения технологического процесса, операции или перехода изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия), включая контроль и перемещения
Технологическая инструкция (ТИ); формы 5, 5а ГОСТ 3.1105–84	Документ предназначен для описания технологических процессов, методов и приемов, повторяющихся при изготовлении или ремонте изделий (составных частей изделий), правил эксплуатации средств технологического оснащения. Применяется в целях сокращения объема разрабатываемой технологической документации
Маршрутная карта (МК); ЕТД обработки: формы 1, 1а, 1б, 3, 5, 5а; ЕТД сборки: формы 1, 1б, 2, 3а, 3б, 4, 5а, 6 ТТП изготовления и ремонта: формы 1а, 1б, 2, 3а, 3б, 4, 5а, 6 ГОСТ 3.1118–82	Документ предназначен для маршрутного (крупносерийное и массовое производство) или маршрутно-операционного описания (мелкосерийное и единичное производство) технологического процесса с указанием последовательности обработки, сборки, контроля или перемещения с указанием данных об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах. МК является обязательным документом. Допускается применять МК совместно с соответствующей картой технологической информации (КТИ), взамен карты технологического процесса (КТП), с операционным описанием в МК всех операций и полным указанием необходимых технологических режимов в графе «Наименование и содержание операции». Допускается взамен МК использовать соответствующую карту технологического процесса (КТП)

1	2
<b>ДОКУМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b>	
Карта технологического процесса (КТП); форма 1, 1а, ГОСТ 3.1404–6; СТП-1040-2905–92 формы 7 и 7а	Документ предназначен для операционного описания технологического процесса изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия) в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта, с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах
Карта типового (группового) технологического процесса (КТТП)	По содержанию документ аналогичен рассмотренному выше и отличается только видом разрабатываемого изделия по типовому или групповому технологическому процессу. Применяется совместно с ведомостью деталей (сборочных единиц) к типовому (групповому) технологическому процессу ВТП
Операционная карта (ОК) ЕТП механической обработки: формы 1, 1а, 1б, 3, 3а, 3б, 5, 5а ГОСТ 3.1118–82; технического контроля: формы 1, 1а, 2, 2а ГОСТ 3.1502–85; ЕТП и ТТП сборки: формы 1а, 1б, 2, 3а, 3б, 4, 5а, 6 ГОСТ 3.1118–82	Документ предназначен для описания технологической операции с указанием последовательного выполнения переходов, данных о средствах технологического оснащения, режимах и трудовых затратах. Применяется при разработке единичных технологических процессов

В настоящее время процесс разработки технологической документации в большинстве случаев выполняется автоматизированным способом. Одним из таких программных продуктов является, например, подсистема «КОМПАС–автопроект–технология», разработанная компанией «Аскон» (Санкт-Петербург) [39].

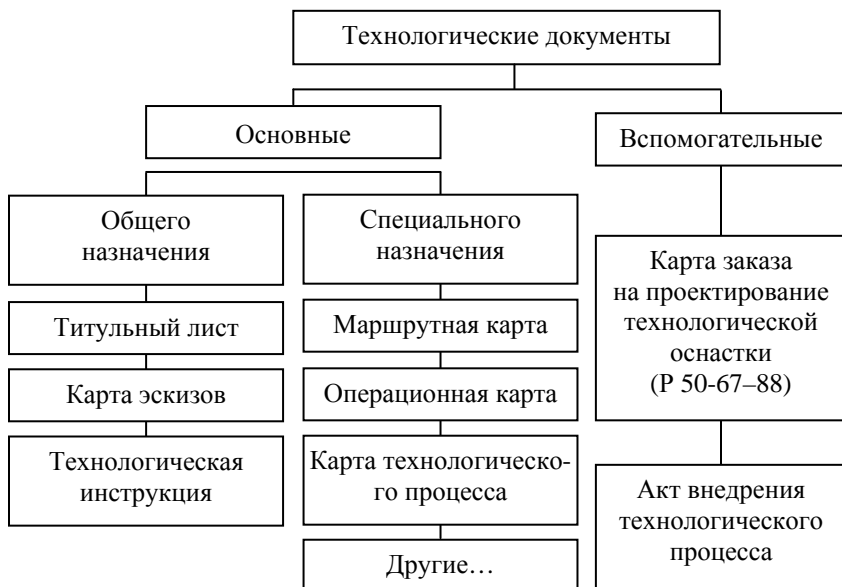


Рис. 5.7. Классификация технологической документации

Основные функциональные возможности подсистемы:

- автоматизированное проектирование технологических процессов основных видов производств;
- автоматическое формирование стандартного комплекта технологической документации и документов произвольной формы в горизонтальном и вертикальном исполнении в формате MS Excel;
- интеграция с КОМПАС-График v8 Plus для оперативного просмотра графики: чертежей деталей, инструментов, операционных эскизов, карт наладок и т. д. (совместная работа с подсистемой «КОМПАС–автопроект–спецификация»);
- интеграция с ЛОЦМАН: PLM, PartY Plus, TeamCenter, Baan;
- возможность разработки сквозного технологического процесса (рис. 5.8);
- автоматическая нумерация технологических операций и переходов;
- расчет режимов резания;
- трудовое нормирование технологических операций;
- возможность настройки образцов технологических документов;

- перевод технологий на иностранные языки;
- возможность разработки пользователем подсистем проектирования технологий для различных видов производств;
- автоматизированное формирование кода детали в соответствии с ЕСКД и ТКД.



Рис. 5.8. Рабочее окно программы «КОМПАС–автопроект–технология»

**Титульный лист** является первым листом комплекта технологических документов (прил. У). На ТЛ следует указывать:

на поле 1 – наименование министерства или ведомства, в систему которого входит организация (предприятие), разработавшая данный комплект документов, наименование организации-разработчика;

на поле 2 – в левой части – должность и подпись лица, согласовавшего комплект документов от заказчика, с указанием, при необходимости, наименования (обозначения) соответствующей организации, в правой части – должность и подпись лица, утвердившего комплект документов. Расположение грифов согласования и утверждения на поле 2 устанавливает разработчик документа;

на поле 3 – наименование комплекта документов или наименование вида документа;

на поле 4 – в левой части – должности и подписи лиц, подтвердившие согласование комплекта документов с подразделениями предприятия (организации), отвечающими за отдельные технологические методы, применяемые при изготовлении изделий или их составных частей, например главного оптика, главного специалиста и т. п.; в правой части поля – должности и подписи лиц, ответственных за разработку комплекта документов или отдельного вида документа. Справа от каждой подписи проставляют инициалы и фамилию лица, подписавшего документ, а ниже подписи – дату подписания. Запись данных на поле 4 допускается выполнять в одну или две строки.

*В целях исключения дублирования информации на поле 4 выносятся подписи ответственных лиц, не вошедшие в основную надпись основного документа, например при наличии в маршрутной карте подписи руководителя технологического бюро эту подпись на ТЛ выносить не следует!;*

на поле 5 – номер акта и дату внедрения технологического процесса (операции), свидетельствующего о внедрении комплекта документов в производство;

на поле 6 – отметку о соответствии комплекта документов на технологические процессы (операции) отдельным положениям или руководствам, действующих в отраслях промышленности.

Пример оформления ТЛ представлен в прил. У1.

**Маршрутная карта** в массовом производстве при операционном описании технологического процесса выполняет функцию сводного документа, в котором указывается адресная информация: номер цеха, операции, наименование операции, технологическое оборудование, трудозатраты.

В мелкосерийном и единичном производстве, когда не требуется заполнение ОК и КЭ, МК содержит подробное описание всех технологических операций с численным указанием выполняемых размеров и названием формируемых поверхностей.

Правила оформления МК приведены в ГОСТ 3.1118–82 и ГОСТ 3.1103–82.

Операции следует нумеровать арабскими цифрами: 005, 010 и т. д. Код операции определяется по классификатору и записывается над названием операции в верхней строке (прил. У2).



**МД** – масса детали по конструкторскому чертежу.

**КИМ** – коэффициент использования материала (МД/МЗ).

**Код заготовки** – определяется по классификатору ОКВЭД 27 «Металлургическое производство». Допускается указывать вид заготовки (отливки, прокат, поковка и т. п.).

**Профиль и размеры** исходной заготовки.

Например, материал обозначается в виде

Круг  $\frac{B50 \text{ ГОСТ } 2590-88}{30-2\text{-а ГОСТ } 1050-88}$

(горячекатаная круглая сталь марки 30 диаметром 50 мм обычной точности (В), высокой точности (А), повышенной точности (Б), 2-й категории подгруппы «а»); или

Пруток Д16ТКР50 × 1500 ГОСТ 21488–97

(пруток из сплава Д16 в закалённом и естественно состаренном состоянии нормальной прочности круглого сечения диаметром 50 мм, длиной 1500 мм, нормальной точности изготовления).

**КД** – количество деталей, изготавливаемых из одной заготовки.

**Уч.** – номер (код) участка, конвейера, поточной линии и т. п.

**РМ** – номер (код) рабочего места.

**Опер.** – номер операции в технологической последовательности изготовления или ремонта изделия (включая контроль и перемещение).

В графе «Код, наименование оборудования»:

**СМ** – степень механизации:

1 – обработка детали вручную,

2 – обработка детали на универсальном металлорежущем станке,

3 – обработка детали на металлорежущем станке с ЧПУ,

4 – обработка детали на агрегатном станке,

5 – обработка детали на автоматической линии.

**Проф.** – код профессии по классификатору «Профессии рабочих, должности служащих и тарифные разряды» ОКРБ 006–2009 (табл. А1) или ОК 016–94 (РФ). В качестве примера коды и наименование должностей служащих оптического производства представлены в табл. 5.15.

Таблица 5.15

## Коды и наименование должностей служащих

Код по ОКЗ	Код должности	Наименование должности служащего	Код выпуска ЕКСД
7311	18237	Сборщик приборов из стекла	41
7311	14966	Наладчик оборудования оптического производства	65
7311	16255	Оптик-механик	65
7311	13338	Лакировщик оптических деталей	65
7311	13007	Контролер оптических деталей и приборов	65
7311	19975	Юстировщик оптических приборов	65
7311	18424	Склеивщик оптических деталей	65
7311	19531	Центрировщик оптических деталей	65
7311	19576	Чистильщик оптики	65
7311	11748	Градуировщик оптических деталей	65
7311	11851	Доводчик деталей	27
7311	12416	Изготовитель светофильтров и поляроидов	65
7311	12496	Изготовитель шкал и сеток фотоспособом	65

**ЕКСД** – коды выпусков Единого квалификационного справочника должностей служащих.

**ОКЗ** – классификатор Республики Беларусь ОКРБ 006-2009 «Профессии рабочих и должности служащих» по основным группам соответствует Международной стандартной классификации занятий (МСКЗ).

**Р** – разряд работы, необходимой для выполнения операции; как правило 2–6, устанавливается в зависимости от сложности детали и вида производства (выше – в единичном и мелкосерийном производстве и ниже – в крупносерийном и массовом).

**УТ** – код условий труда; записывается дробью: в числителе «СП.Н» или «СП.В» – сдельно-премиальная оплата соответственно при нормальных или вредных условиях труда; в знаменателе – начальную букву вида нормы «Р», «О.С» или «Х» – соответственно расчётная, опытно-статистическая или хронометражная.

**КОИД** – количество одновременно изготавливаемых (обрабатываемых, ремонтируемых) деталей (сборочных единиц) при выполнении одной операции.

**КР** – количество исполнителей, занятых при выполнении операции;

**ОП** – объём производственной партии в штуках;

**$K_{шт}$**  – коэффициент штучного времени, зависит от количества станков, обслуживаемых одним рабочим (при многостаночном обслуживании); при одностаночном обслуживании  $K_{шт} = 1$ ;

**$T_{н.з}$**  – «подготовительно-заключительное время» заполняется только в случае работы без наладчика в серийном производстве;

**$T_{шт}$**  – норма штучного времени на операцию.

Информацию в МК вносят построчно. Каждому типу строки соответствует свой служебный символ (табл. 5.16).

Таблица 5.16

Служебные символы в МК и их информационное содержание

Обозначение служебного символа	Содержание информации вносимой в графы, расположенные на строке
1	2
А	Номер цеха, участка, рабочего места, где выполняется операция, номер операции, код и наименование операции, обозначение документов, применяемых при выполнении операции (применяется только для форм с горизонтальным расположением поля подшивки)
Б	Код, наименование оборудования и информация по трудозатратам (применяется только для форм с горизонтальным расположением поля подшивки)
В	Номер цеха, участка, рабочего места, где выполняется операция, номер операции, код и наименование операции (применяется только для форм с вертикальным расположением поля подшивки)
Г	Обозначение документов, применяемых при выполнении операции (применяется только для форм с вертикальным расположением поля подшивки)
Д	Код, наименование оборудования (применяется только для форм с вертикальным расположением поля подшивки)

1	2
Е	Информация по трудозатратам (применяется только для форм с вертикальным расположением поля подшивки)
К	Информация по комплектации изделия (сборочной единицы) составными частями с указанием <i>наименования деталей</i> , сборочных единиц, их обозначений, обозначения подразделений, откуда поступают комплектующие составные части, кода единицы величины, единицы нормирования, количества на изделие и нормы расхода (применяется только для форм с горизонтальным расположением поля подшивки)
М	Информация о применяемом основном материале и исходной заготовке, информация о применяемых вспомогательных и комплектующих материалах с указанием наименования и кода материала, обозначения подразделений, откуда поступают материалы, кода единицы величины, единицы нормирования, количества на изделие и нормы расхода
О	Содержание операции (перехода)
Т	Информация о применяемой при выполнении операции технологической оснастке
Л	Информация по комплектации изделия (сборочной единицы) составными частями с указанием наименования деталей, сборочных единиц (применяется только для форм с вертикальным расположением поля подшивки)
Н	Информация по комплектации изделия (сборочной единицы) составными частями с указанием <i>обозначения деталей</i> , сборочных единиц, обозначения подразделений, откуда поступают комплектующие составные части, кода единицы величины, единицы нормирования, количества на изделие и нормы расхода (применяется только для форм с вертикальным расположением поля подшивки)

При условии обеспечения требуемого качества изготовления и сборки изделия допускается не указывать в МК данные по стандартизованной технологической оснастке. Исключение составляет указание данных по специальной технологической оснастке, сборно-разборным приспособлениям, универсально-сборным приспособлениям и т. п.

**Операционную карту** для операций, связанных с обработкой резанием, заполняют по ГОСТ 3.1702–79, для слесарно-сборочных работ – по ГОСТ 3.1703–79; основные надписи – по ГОСТ 3.1103–82.

Наименование и номер операции выписывают из маршрутной карты. В соответствии с ГОСТ 3.1407–86 приняты следующие наименования (условные обозначения) граф (прил. У3):

**Обозначение документа** – документы, которые применяются при выполнении данной операции, например технологическая инструкция. Состав документов следует указывать через разделительный знак «;».

**MI** – масса изделия, кг, определяемая по конструкторскому документу (рабочему чертежу, в основной рамке) или приближённо по формуле

$$m = \rho V$$

(табл. 5.17). В случае, когда изделие имеет сложную конфигурацию, то при определении объёма  $V$  её контур необходимо заменить суммой простых геометрических фигур (цилиндра, кольца и т. д.).

Таблица 5.17

Плотность  $\rho$  наиболее часто употребляемых материалов  
в оптико-механических приборах

Материал	Марка материала	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Углеродистые качественные конструкционные стали	08, 10	7,83
	15, 20, 25, 30, 35, 55	7,82
	40, 45, 50	7,81
	60	7,80
	30ХГТ	7,86
Медные сплавы	Л96, Л62, ЛС59-1, ЛО70-1	8,45
	БрОФ6,5-0,15	8,80
Алюминиевые сплавы	АД0, АД1, АД	2,71
	АМц(М)	2,73
	АМг	2,68
	Д16(М)	2,78
	АЛ2	2,65
	АЛ9	2,66
Титан	ВТ1-0	4,32
Пластмассы	Капролон	1,15

**Код, наименование операции** – определяется по технологическому классификатору (табл. 5.18). При отсутствии информации код операции допускается не указывать.

Таблица 5.18

Коды технологических операций обработки резанием

4101	Агрегатная	4180	Протяжная
4108	Резьбонакатная	4181	Горизонтально-протяжная
4110	Токарная	4182	Вертикально-протяжная
4111	Токарно-револьверная	4190	Отделочная
4112	Автоматная токарная	4191	Полировальная
4114	Токарно-винторезная	4192	Хонинговальная
4120	Сверлильная	4193	Суперфинишная
4121	Вертикально-сверлильная	4194	Доводочная
4123	Радиально-сверлильная	4195	Притирочная
4124	Центровальная	4196	Виброобразивная
4130	Шлифовальная	4220	Расточная
4131	Круглошлифовальная	4221	Горизонтально-расточная
4132	Внутришлифовальная	4222	Вертикально-расточная
4133	Плоскошлифовальная	4224	Алмазно-расточная
4134	Бесцентровошлифовальная	4260	Фрезерная
4135	Резьбошлифовальная	4261	Вертикально-фрезерная
4150	Зубообрабатывающая	4262	Горизонтально-фрезерная
4151	Зубошлифовальная	4264	Карусельно-фрезерная
4152	Зубодолбежная	4265	Барбанно-фрезерная
4153	Зубофрезерная	4266	Универсально-фрезерная
4154	Зубострогальная	4267	Копировально-фрезерная
4155	Зубопротяжная	4268	Гравировально-фрезерная
4156	Зубозакругляющая	4269	Фрезерно-центровальная
4157	Зубошевинговальная	4271	Резьбофрезерная
4158	Зубопритирочная	4272	Специально-фрезерная
4159	Зубоприрабатывающая	4280	Отрезная
4161	Зубообкатывающая	4281	Ножовочно-отрезная
4175	Долбежная	4282	Ленточно-отрезная

**Код и наименование оборудования** – через разделительный знак «;» указывается код; краткое наименование оборудования; его ин-

вентарный номер. Допускается взамен краткого наименования обозначения указывать модель, не указывать инвентарный номер;

$T_v$  – вспомогательное время на операцию, мин, включает:

•  $T_{yc}$  – время на установку и снятие детали;

•  $T_{уп}$  – время на управление станком;

•  $T_{из}$  – время на измерение деталей;

$T_o$  – основное время на операцию – чистое время отводимое на выполнение всех технологических переходов, связанных с видоизменением изделия в целом и его составных элементов, мин.

Время может быть измерено непосредственно на рабочем месте при выполнении данной операции или назначено по нормативному справочнику [40];

**Наименование детали, сборочной единицы или материала** – наименование деталей, сборочных единиц, материалов, применяемых при выполнении данной операции. Допускается вносить в графу информацию о толщине материала;

**Код, обозначение** – обозначение (код) деталей, сборочных единиц по конструкторскому документу или материала по классификатору;

**ОПП** – обозначение подразделения (склада, кладовой и т. п.), откуда поступают комплектующие детали, сборочные единицы или материалы; при разработке – куда поступают;

**ЕВ** – код единицы величины (массы, длины и т. п.) детали, заготовки, материала по классификатору СОЕИ «Система обозначений единиц измерений» (1988–1994), далее по классификатору «Единицы измерения промышленной и сельскохозяйственной продукции» ОКРБ 007–2007 или ОКЕИ «Общероссийский классификатор единиц измерения» ОК 015–94. Допускается указывать единицы измерения величины;

**ЕН** – единица нормирования, на которую установлена норма расхода материала, например 1, 10, 100;

**КИ** – количество деталей, сборочных единиц, применяемых при сборке изделия; при разборке – получаемых;

**Н.рас** – норма расхода материала;

**Поз.** – номер позиции детали, сборочной единицы по эскизу или конструкторскому документу;

**$T_{в. пр}$**  – время вынужденного простоя в ожидании обслуживания за время обработки одной детали, мин;

$T_{\text{сум}}$  – суммарная норма времени на операцию, мин;

**Кол. за цикл** – количество сборочных единиц (изделий) за цикл;

$T_{\text{шт}}$  – норма штучного времени на операцию, мин;

**Произв** – расчетно-часовая производительность оборудования;

**Обозначение ИОТ** – обозначение инструкций по охране труда, требования которых необходимо соблюдать при выполнении операции;

**Наименование ТО** – наименование технологической оснастки. Информацию по применяемой на операции технологической оснастке записывают в следующей последовательности:

- приспособления,
- вспомогательный инструмент,
- режущий инструмент,
- слесарно-монтажный инструмент,
- специальный инструмент, применяемый при выполнении специфических технологических процессов (операций), например, при сварке, штамповке и т. п.,
- средства измерения.

Разделение информации по каждому средству технологической оснастки следует выполнять через знак «;». Количество одновременно применяемых единиц технологической оснастки следует указывать после кода (обозначения) оснастки, заключая в скобки, например, АБВГ ХХХХХХ.ХХХ (2) фреза дисковая;

**Код, обозначение ТО** – код (обозначение) технологической оснастки по классификатору МН 79–59 Группа 6;

**Кол** – количество единиц технологической оснастки одного обозначения, одновременно применяемой при выполнении перехода.

Твёрдость обрабатываемой заготовки указывается по Бринеллю (НВ). В графе «Оборудование» для универсальных станков достаточно указать модель станка. Для специальных станков, например агрегатных, указывается краткая характеристика: «Агрегатный, вертикальный с четырёхпозиционным столом».

Выбор марки оборудования (например, вертикально-сверлильный станок, горизонтальный сверлильно-фрезерно-расточной полуавтомат) определяется:



1) расположением режущего инструмента в рабочей зоне и, в частности, ориентацией (направлением) его хвостовой части относительно вертикальной и горизонтальной осей координат;

2) способом базирования (установки) заготовки в технологической оснастке (приспособлении), например, установка прутка в трёхкулачковый патрон для выполнения обычной токарной операции предопределяет выбор оборудования с горизонтальной компоновкой основных рабочих элементов (шпинделя, заднего центра и т. д.). Установка диска в самоцентрирующиеся призматические губки предопределяет выбор оборудования, например сверлильного (для получения четырёх отверстий) или фрезерного станка (для формирования сквозного паза) с вертикальным расположением шпинделя для установки инструмента.

В строке «Т» (технологическая оснастка) указывают «Приспособление» (ПР): его наименование и обозначение по государственному стандарту или стандарту предприятия, а для нестандартных приспособлений – «Специальное».

Строка «О» (операция) должна содержать: вид установки первоначальную А:, вторичную Б: и т. д. (при необходимости). Формулировки переходов в графе «Содержание перехода» для сборочных операций должны соответствовать ГОСТ 3.1703–79.

После записи содержания перехода в новой строке с обозначением «Т» указывается также шифр и название вспомогательного инструмента (ВИ); шифр, название, марка материала и стандарта на режущий инструмент (РИ); шифр, название и обозначение средств измерения (СИ).

В графе «Инструмент» записывают его обозначение по стандарту или указывают, что он специальный, с краткой характеристикой, например «Резец фасонный спец., Т15К6».

В графе «Диаметр, ширина» приводится наибольший диаметр, по которому рассчитывается скорость резания.

Графы «Режимы обработки» заполняются в соответствии с результатами расчётов и по нормативам [40]. Основное время определяется расчётным путём, а вспомогательное время – по нормативам.

**Карты эскизов** разрабатываются на бланках (ГОСТ 3.1105–84) и предназначены для отображения следующей графической информации (ГОСТ 3.1128–93):

- эскизы на изделия (их составные части), разрабатываемые в рамках технологических процессов и операций с указанием всех необходимых параметров;
- эскизы на технологические установки и позиции;
- эскизы к картам наладки средств технологического оснащения;
- таблицы для указания исходных данных;
- схемы (в том числе сборки);
- графики и диаграммы, относящиеся к настройке оборудования, указанию режимов термической обработки, выполнению действий при испытании изделий и т. п.

При разработке документов на стадиях предварительного проекта (литера «П») и опытного образца (литеры «О», «О<sub>1</sub>», «О<sub>2</sub>») допускаются графические изображения к документам не выполнять, а вместо них применять соответствующие конструкторские документы.

Эскиз, являющийся общим к технологическому процессу или группе операций, следует помещать на первом и последующих листах соответствующих форм КЭ (прил. У4). В комплекте документов КЭ располагается перед или за описанием операции, в которой она впервые применяется, с указанием обозначения в маршрутной карте (МК), карте технологического процесса (КТП) и т. п.

Нередко в отечественных и зарубежных оптических производственных организациях используют свои формы карт технологического процесса для записи последовательности выполнения операций (прил. У5 и У6), которые составляют в соответствии со стандартами предприятия (СТП).

В комплекте документов на типовые и групповые операции (ТО, ГО) КЭ следует располагать за картами типовых операций (КТО) перед ведомостью деталей к типовой операции (ВТО) или перед картами технологической информации (КТИ).

В графе 8 основной надписи по ГОСТ 3.1103 в форме первого листа следует ставить прочерк.

На эскизах изображения заготовок, деталей или сборочных единиц должны быть представлены:

- в их рабочем положении;
- в том виде, какой она приобретает после выполнения данной операции;

- с соблюдением или без соблюдения масштаба, но с примерным выдерживанием пропорций графических элементов и составных частей;

- совместно с эскизом должна быть представлена следующая информация:

- размеры и их предельные отклонения: верхнее и нижнее (только в численном виде, поля допусков указывать запрещается);

- обозначение шероховатости (допускается ужесточение значений по сравнению с указанными на чертеже на основании требований к технологическому процессу сборки изделия);

- обозначения опор, зажимов и установочных устройств;

- допуски формы и расположения поверхностей;

- таблицы (шаг строки должен быть равен 8,5 мм);

- технические требования (при необходимости), которые располагают в правой или нижней части поля;

- обозначения позиций составных частей изделия (для процессов и операций сборки, разборки).

Порядковый номер размера или конструктивного элемента обрабатываемой поверхности следует проставлять арабскими цифрами в окружности диаметром 6–8 мм и соединять с размерной или выносной линией (на одном уровне). Простановку номеров целесообразно выполнять по часовой стрелке, начиная с левой верхней части эскиза. Допускается сквозная нумерация размеров или конструктивных элементов. Указанные номера в последующем упоминаются в текстовых документах (ОК, МК, КТП и т. д.).

Поверхности, обрабатываемые в сборе, а также границы сопряжений деталей на операциях пайки и склеивания выделяются жирной линией с простановкой выдерживаемых размеров. При наличии таблиц технические требования следует располагать над ними. Для сложных и крупногабаритных изделий на КЭ допускается показывать только сборочный фрагмент, отделённый линиями обрыва от остального изображения.

Для паяных и клеевых соединений запрещается ссылаться на стандарт, в котором детально прописаны технические требования сборки. Характеристики шва и их графическое изображение должны быть приведены непосредственно на КЭ.

На КЭ сборочной операции указывают условное обозначение опор, зажимов и установочных устройств по ГОСТ 3.1107–81.

Схемы разрабатывают в следующих случаях:

- при проектировании процессов сборки, испытаний, наладки и настройки изделий, их ремонте и т. п. (осуществляют на формах КЭ);
- разработке технологических инструкций на наладку и обслуживание средств технологического оснащения и т. п. (осуществляют на формах ТИ или последующих листах форм КЭ).

В соответствии с ГОСТ 3.1121–84 для сокращения объема разрабатываемой документации допускается на рабочих местах взамен КЭ применять конструкторские документы (чертежи). В этом случае в чертеже над основными надписями необходимо сделать отметку «технологический экземпляр», а в сводном документе на процесс или ТИ (МК, КТП и т. п.) сделать соответствующую ссылку на обозначение конструкторского документа к той операции, где он впервые должен быть применен.

**Операционная карта технического контроля.** В соответствии с ГОСТ 3.1502–85 для ведомости операций (ВОП) и операционных карт (ОК) должен осуществляться технический контроль.

Данные по применяемым средствам измерений следует записывать всегда с новой строки.

Краткая форма записи применяется только при проверке контролируемых размеров и других данных, выраженных числовыми значениями. В этом случае текстовую запись применять не следует, а необходимо указать только соответствующие параметры, например,  $\varnothing 47^{+0,039}$ ;  $U = 100^{+5}$  В.

Данные по применяемым средствам технологического оснащения следует записывать к каждому контролируемому размеру (параметру) или к группе контролируемых размеров (параметров).

Эскиз контролируемой детали располагают на поле карты в верхнем левом углу. Если на этом поле эскиз не помещается из-за больших габаритов детали, используется отдельная КЭ той же формы, что и для эскизов механической обработки по ГОСТ 3.1105–84. На эскизе указывают все размеры, подлежащие контролю, технические условия, а также требования к качеству поверхностей и их нулевую мерцацию.

В графе «Содержание перехода» выполняемое действие записывается в повелительном наклонении, например «Проверить размер 1».

В графах «Приспособление» и «Измерительный инструмент» указывается стандарт или шифр оснастки, если она специальная.

Доля контролируемых деталей устанавливается в зависимости от типа производства, принятого способа настройки инструмента на размер и точности обработки по нормативам.

При разработке операционного технологического процесса в МК нужно указывать обозначение инструкции по технике безопасности (ТБ). В ОК указываются средства защиты работающих (ГОСТ12.3.002–75; ГОСТ3.1120–83 и РТМ23.4.412–79).

При разработке маршрутно-операционного технологического процесса ссылка на инструкцию по ТБ должна быть сделана в графе «Наименование и содержание операции» перед названием операции.

В МК, КТП, КТТП, ОК, КТО, ВОП следует указывать средства индивидуальной защиты (спецодежда, спецобувь, защитные очки и др.) или обозначения (номера) комплектов средств индивидуальной защиты в соответствии с порядком, установленным на предприятии, средства коллективной защиты работающих, используемые непосредственно на рабочих местах (ограждения, защитные экраны, вентиляционные устройства и др.), а также средства технологического оснащения, обеспечивающие безопасность труда (пинцеты и щипцы для удаления деталей из зоны обработки, крючки для отвода и удаления стружки и др.), которые не являются составной частью используемого оборудования или технологической оснастки, но применяются совместно с этими средствами технологического оснащения, если они не указаны конкретно в ИОТ.

Запись кодов (обозначений) средств защиты и их наименований следует выполнять в соответствующих графах (строках), предназначенных для указания технологической оснастки, после указания кодов (обозначений), наименований технологической оснастки.

Полный *комплект технологических карт* (прил. У) на изготовление оптических деталей или сборку оптического прибора (узла) *оформляется в виде отдельного приложения к ПЗ* дипломного проекта.

В качестве графического материала *на плакатах формата А1* в соответствии с технологической блок-схемой последовательности обработки или сборки изделия на форматах А4–А3 (с основной надписью по ГОСТ 2.104–68) по группам *формируются операционные эскизы* (рис. 5.9–5.11).

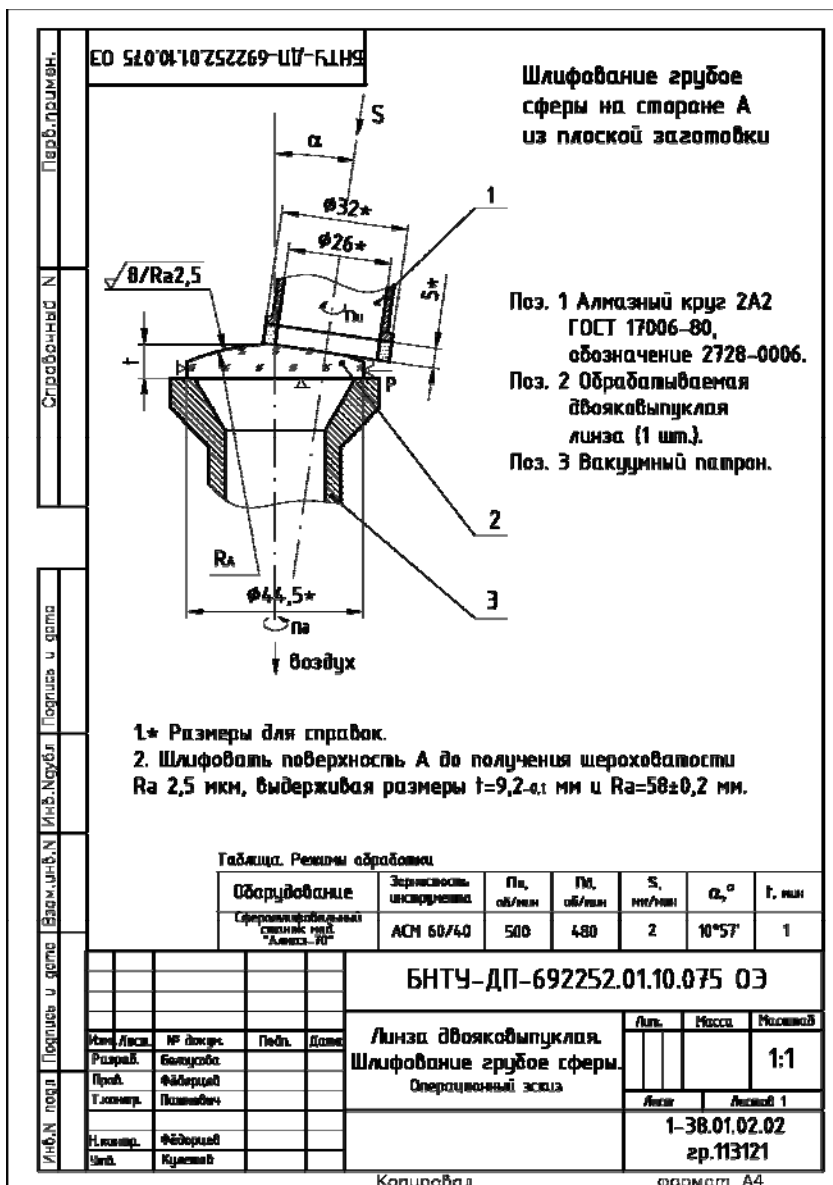


Рис. 5.9. Операционный эскиз грубого шлифования сферической поверхности двояковыпуклой линзы



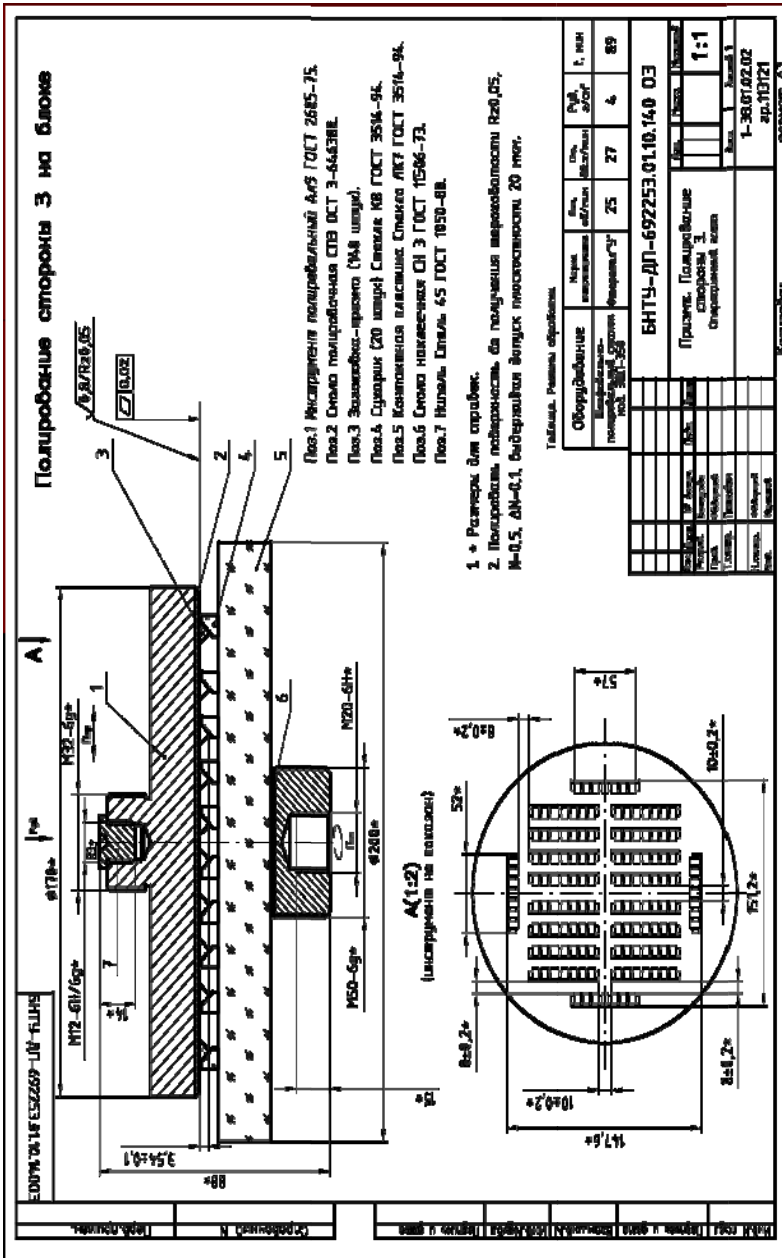


Рис. 5.11. Операционный эскиз полирования плоской поверхности призмы



Операционные эскизы представляют собой подробно оформленные карты эскизов (КЭ), на которых дополнительно изображаются:

- обрабатывающий инструмент в рабочем положении с направлением его вращения или перемещения в процессе обработки;

- вспомогательный инструмент (приспособление) для установки или контроля параметров изделия;

- таблица с основными режимами обработки (по переходам или для всей операции);

а также приводится:

- наименование технологической операции (или перехода);

- кодовое обозначение применяемого инструмента;

- содержание технологического перехода с буквенным обозначением обрабатываемой поверхности и указанием численных значений выдерживаемых параметров (шероховатости, размеров).

При изготовлении таких оптических деталей, как призмы или линзы, ряд технологических операций, например шлифования или полирования, для одной формируемой рабочей поверхности может многократно повторяться. Операционные эскизы в этом случае будут практически одинаковыми по взаимному расположению инструмента и заготовки, а также по модели применяемого технологического оборудования. Отличие может состоять только в используемой зернистости абразивного порошка или инструмента, а также в заданных режимах обработки.

Для исключения однообразия представляемого на плакатах материала следует выбирать такие операционные эскизы, которые отличаются по типу используемого инструмента (например: трубчатый, чашечный, гриб) или приспособления (наклеечное, вакуумное, для оптического контакта), а также показывают другое расположение заготовки по обрабатываемой поверхности.

Верхнем левом углу листа формата А1 показывают эскизы заготовительных операций, в нижнем правом – основные окончательные технологические операции. Допускается показывать операционные эскизы технического контроля с изображением оптической схемы прибора и контролируемого изделия.

Если технологические процессы разрабатываются для нескольких оптических деталей, то операционные эскизы следует стремиться группировать в пределах одного листа формата А1.

### **5.2.11. Контроль оптических и геометрических параметров ИП «Белтекс оптик» оптической детали**

В общем случае операции технического контроля оформляются на операционных картах (ОК, форма 2) по ГОСТ 3.1502–85 или маршрутно-операционных картах (МК/ОК, форма 2) по ГОСТ 3.1118–82. Кроме того, на ряде оптических предприятий, например ИП «Белтекс оптик», для выполнения электромонтажных работ плат управления оптического прибора используют операционные карты (ОК, формы 1 и 1а) по ГОСТ 3.1407–86. Для контрольных операций составляют **специальные карты контроля** (КК), которые помещают в тех местах технологического процесса, где группа ранее выполненных операций должна подвергаться проверке. Порядок контроля и предусмотренные для этого измерительные инструменты указывают в соответствующих графах карты.

При контроле оптических деталей наряду со стандартизованными средствами измерений линейных и угловых величин применяются специальные оптические приборы, принцип действия которых основан на явлениях интерференции, дифракции, поляризации и автоколлимации.

#### ***Инструменты для контроля геометрических размеров***

Контроль геометрических размеров предусматривает определение толщины, диаметра, длины, ширины детали, а также радиусов кривизны, децентричности, клиновидности (для пластин), стрелок прогиба (для линз), углов (для призм), ширины фасок и скосов, глубины и ширины канавок и т. п.

На заготовительных операциях (резании, распиливании, раскалывании) и при шлифовании преимущественно применяются контактные средства измерений. Допустимые отклонения габаритных размеров деталей на этих операциях могут колебаться до  $\pm 2$  мм. После операций фрезерования и шлифования допуски размеров обычно находятся в пределах 0,5–0,05 мм. Операции полирования обеспечивают отклонения размеров в пределах 0,1–0,01 мм.

В качестве измерительного инструмента применяют:

– *линейки* с одной или двумя шкалами, с ценой деления 0,5 и 1,0 мм и длиной 150, 300, 500 и 1000 мм (ГОСТ 427–75);

– *рулетки* с ценой деления 1 или 10 мм, в закрытом корпусе (РЗ) длиной 2, 5, 10, 20 и 50 м, самосвёртывающиеся (РС) и желобчатые (РЖ) (ГОСТ 7502–98);

– *штангенциркули*: ШЦ-I (ШТЦ-I) с ценой деления 0,1 мм и диапазоном измерения от 0 до 125 мм, ШЦ-II с ценой деления 0,05 или 0,1 мм и диапазоном измерения от 0 до 320 мм, ШЦ-III с ценой деления 0,05 или 0,1 мм и общим диапазоном измерения от 0 до 4000 мм (по семь ступеней) (ГОСТ 166–89);

– *штангенглубиномеры*: с ценой деления 0,05 или 0,1 мм и диапазоном измерения от 0 до 500 мм (ГОСТ 162–90);

– *микрометры*: гладкие (МК) с диапазонами измерения: 0–15 (эксклюзивные) 0–25; 25–50; 50–75 и т. д. до 300 мм; 300–400; 400–500 и 500–600 мм; листовые (МЛ) с диапазонами измерения 0–25 мм и др. (ГОСТ 6507–90);

– *скобы* с диапазоном измерения от 0,1 до 3150 мм (ГОСТ 2216–84, ГОСТ 18355–73, ГОСТ 16775–93);

– *предельные калибры* для проверки глубины и высоты уступов (ГОСТ 2534–77);

– *индикаторы часового типа*: с перемещением измерительного стержня параллельно плоскости шкалы (ИЧ) с диапазоном измерения 0–10 мкм и перпендикулярно к плоскости шкалы (ИТ) с диапазоном измерения 0–2 мкм (ГОСТ 577–68);

– *длиномеры*: ДВО (с окулярным отсчётом) и ДВЭ (с экранным отсчётом);

– *оптиметры*: вертикальный проекционный ИКВ-3 [41]; ИКГ-3 [42], МИКРОТЕХ [43];

– *шаблоны* для контроля внутренних и наружных радиусов кривизны;

– *сферометры*: кольцевые контактные настольные (ИЗС-7 и ИЗС-11) и накладные (ИЗС-8 и ИЗС-9) (ГОСТ 8.089–73).

Схему контроля геометрических параметров изделия на различных стадиях его обработки также оформляют в виде отдельного операционного эскиза. На рис. 5.12 показана схема контроля толщины двояковыпуклой линзы после операции грубого шлифования посредством индикатора часового типа ИЧ-10.

На операционном эскизе условно изображают средство измерения, оптическую деталь в рабочем положении, дополнительные опоры и приспособления, контролируемые размеры, а также записывают содержание технологического перехода.

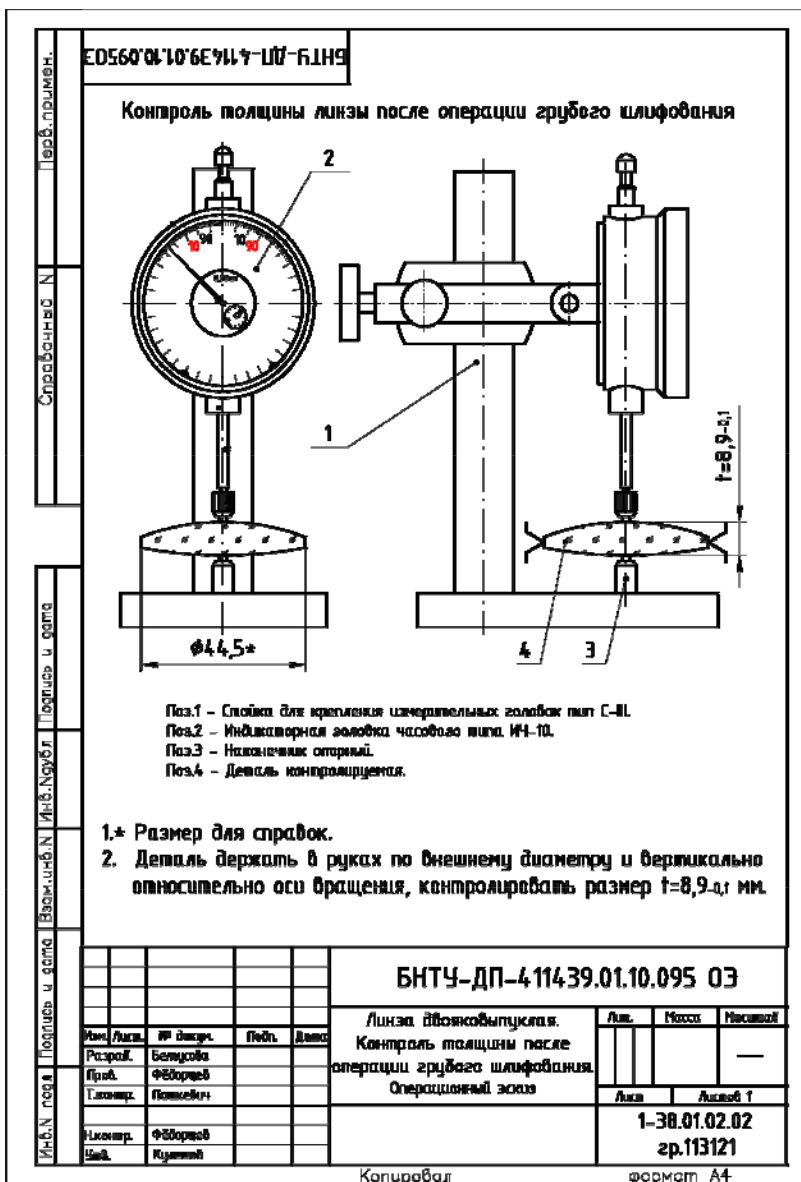


Рис. 5.12. Операционный эскиз контроля толщины двояковыпуклой линзы микрометром после операции грубого шлифования

## *Контроль формы поверхности*

В зависимости от конфигурации детали различают контроль плоских, сферических и асферических поверхностей.

На стадии шлифования оптических поверхностей контроль плоскостности или сферичности осуществляют на рабочем месте визуально «на просвет» по воздушному зазору, возникающему при наложении на поверхность металлической (стеклянной) поверочной лекальной линейки со шкалой высокой точности. В соответствии с ГОСТ 8026–92 существует несколько вариантов исполнения лекальных линеек: с двусторонним скосом кромки (ЛД), трёхгранных (ЛТ) и четырёхгранных (ЛЧ).

Более дорогим, но в то же время и универсальным является метод оценки допусков формы и взаимного расположения поверхностей (DIN ISO 1101) посредством лазерных сканирующих приборов, например Mar Form серии MMQ 100 Plus или MMQ 400 компании Mahr (Германия) (рис. 5.13). Данная установка снабжена цифровыми кодирующими устройствами по осям X/Z и щупом T20W. Обработка данных по круглости, концентricности, осевому и радиальному биению, соосности, плоскостности, прямолинейности, параллельности и перпендикулярности осуществляется программой Easy Form PC.

При расчёте ОС радиусы сферических поверхностей оптических деталей рекомендуется выбирать в соответствии с рядами числовых значений по ГОСТ 1807–75.



Рис. 5.13. Внешний вид лазерного сканирующего прибора MMQ 400

На стадии полирования контроль плоскостности или сферичности осуществляют либо на рабочем месте, визуально наложением рабочего пробного стекла (РПС) ГОСТ 2786–82 и измерением числа интерференционных колец/полос Ньютона ( $N$ ) или в оптической лаборатории с применением интерферометров.

РПС используют при выпуске единичных изделий, выборочном промежуточном контроле ОД, настройке технологического оборудования и инструмента. Для определения знака кривизны поверхности («бугор»–«яма») осуществляют лёгкий нажим на край ОД. При контроле в белом отражённом свете ( $\lambda = 0,55$  мкм) максимально возможное измеренное значение  $N$  составит 0,0275 мкм.

Оптические приборы применяют при 100%-м выходном окончательном контроле всей партии запуска ОД. Бесконтактный способ измерения кривизны поверхности посредством интерферометров считается более эффективным, поскольку позволяет избежать случайного нанесения на поверхность ОД ласин и царапин. Принципиальная оптическая схема наиболее распространённого интерферометра Физо представлена на рис. 5.14.

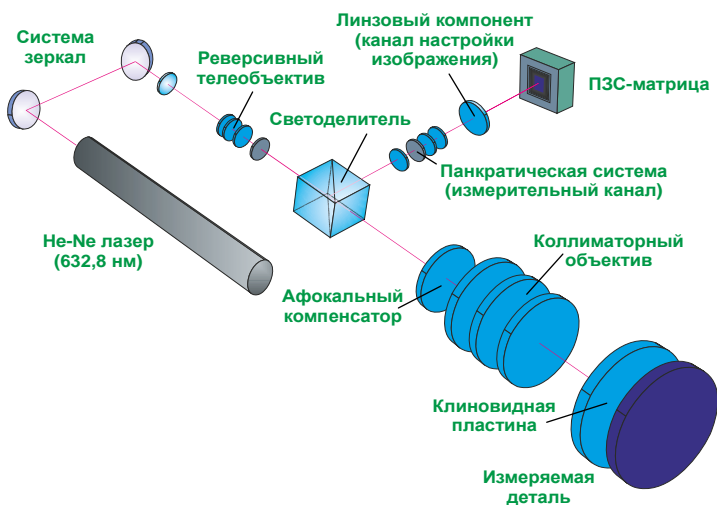


Рис. 5.14. Функциональная оптическая схема интерферометра Физо

В табл. 5.19–5.20 представлены наиболее популярные применяемые в производстве модели интерферометров для контроля плоских и сферических поверхностей. Для контроля асферических поверхностей используют интерферометры следующих моделей: ИМ-120; ИТ-148; ИТ-183; ИКП-1; АГ-2; АГ-4; ЮС-51.

Таблица 5.19

Технические характеристики интерферометров для контроля плоских поверхностей

Наименование параметра	ИТ-100 (Россия)	ИТ-200 (Россия)	ПК-452 (Россия)	VeriFire PE (ZYGO)	VeriFire MST (ZYGO)	PTI 250F, PTI 250RS (ZYGO)
Конструктивное исполнение	Вертикальный	Вертикальный		Горизонтальный	Горизонтальный	Вертикальный
Тип объектива	Линзовый	Линзовый	Зеркальный	Линзовый	Линзовый	
Источник подсветки	Ртутная лампа	Ртутная лампа		He-Ne лазер (class II) 632,8 нм	DFB лазер (температурно стабилизированный) 1550 нм	Лазерный диод (class I) 655 нм
Диаметр эталонной поверхности, мм	100	200	280	102 – 152	102–108	6–25
Погрешность наведения на полосы, доли полосы	0,05–0,01	0,05	0,01	0,06 ( $\lambda/10000$ )	0,06 ( $\lambda/10000$ )	0,06 ( $\lambda/2000$ )
Увеличение прибора, крат	0,85 : 2,0	0,6	0,6	1–6	1–4	
Способ наблюдения и измерения	Визуальный, фотографический	Визуальный, фотографический	Визуальный	Монитор РС	Монитор РС	Монитор РС

Таблица 5.20

**Технические характеристики интерферометров для контроля  
сферических поверхностей**

Наименование параметра	КЮ-210	КЮ-211	ИТ-148	ИТ-154	Иммерсионный	ИКД-110
Изменяемые значения радиусов кривизны, мм	12–335 (выпуклые)	–80...–340 (вогнутые)	–12...–50 (вогнутые)	13–60 (выпуклые)	–8...–50 (вогнутые)	–20000...–3 (вогнутые), 3...1950 (выпуклые)
Источник подсветки						Лазер
Диаметр измеряемой поверхности ОД, мм						
Погрешность эталонной сферической поверхности, число полос	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,02–0,04
Увеличение прибора, крат	0,8	0,8	0,3	1,3–0,4	0,4	2,0–3,0
Угол охвата поверяемого за один приём участка поверхности, градус	54–12	80–15	140	140	180	
Способ наблюдения и измерения	Визуальный (окуляр с сеткой)	Визуальный (окуляр с сеткой)	Визуальный фотографический	Визуальный фотографический	Визуальный (окуляр с сеткой)	Монитор РС

***Контроль шероховатости поверхности***

Параметры шероховатости поверхности регламентируются ГОСТ 2789–73, в соответствии с которым при обработке чаще всего осуществляется оценка двух наиболее важных показателей:



– высоты неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$  (сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины  $l$ );

– среднего арифметического отклонения  $Ra$  профиля (абсолютные значения отклонение профиля, определяемые расстоянием между любой точкой профиля и средней линией в пределах базовой длины  $l$ ).

Численные значения данных параметров имеют стандартный ряд и предпочтительные значения (табл. 5.21 и 5.22), которые указываются в рабочей конструкторской документации.

Таблица 5.21

Стандартный ряд высоты неровностей профиля  $Rz$  и наибольшей высоты  $R_{max}$ , мкм

1600	320	63	<b>12,5</b>	2,5	0,50	<b>0,100</b>
1250	250	<b>50</b>	10,0	2,0	<b>0,40</b>	0,080
1000	<b>200</b>	40	8,0	<b>1,60</b>	0,32	0,063
800	160	32	<b>6,3</b>	1,25	0,25	<b>0,050</b>
630	125	<b>25,0</b>	5,0	1,00	<b>0,20</b>	0,040
500	<b>100</b>	20,0	4,0	<b>0,80</b>	0,160	0,032
<b>400</b>	80	16,0	<b>3,2</b>	0,63	0,125	<b>0,025</b>

*Примечание. Предпочтительные значения параметров выделены.*

Таблица 5.22

Стандартный ряд среднее арифметических отклонений профиля  $Ra$ , мкм

<b>100</b>	20	4,0	<b>0,80</b>	0,160	0,032
80	16,0	<b>3,2</b>	0,63	0,125	<b>0,025</b>
63	<b>12,5</b>	2,5	0,50	<b>0,100</b>	0,020
<b>50</b>	10,0	2,0	<b>0,40</b>	0,080	0,016
40	8,0	<b>1,60</b>	0,32	0,063	<b>0,012</b>
32	<b>6,3</b>	1,25	0,25	<b>0,050</b>	0,010
<b>25</b>	5,0	1,00	<b>0,20</b>	0,040	0,008

*Примечание. Предпочтительные значения параметров выделены.*

Для аттестации параметров шероховатости используют следующие методы контроля и приборы для их реализации (табл. 5.23):

- *контактные механические* (профилографы-профилометры на основе индуктивного датчика) (рис. 5.15);
- *бесконтактные оптические* (приборы светового и теневого свечения, интерференционные) (рис. 5.16);
- *рефлектометры* (интегральное определение шероховатости поверхности посредством измерения интенсивности светового потока, отраженного от исследуемого изделия) (рис. 5.17);
- *бесконтактные лазерные* (ультраточный лазерный PSD датчик перемещений) (рис. 5.18);
- *бесконтактные межатомного взаимодействия* (сканирующая зондовая микроскопия: атомные силовые и туннельные микроскопы) (рис. 5.19).

Таблица 5.23

Основные технические характеристики приборов для измерения шероховатости

Наименование и модель прибора	Измеряемый параметр	Пределы измерения
1	2	3
Профилограф-профилометр 201	<i>Ra</i> <i>Rz</i>	20,0–0,008 мкм 100,0–0,025 мкм
Профилограф-профилометр 252	<i>Ra</i> <i>Rz</i>	100,0–0,02 мкм 250,0–0,02 мкм
Переносный прибор Дозор-КТ	<i>Ra</i>	1,0–0,02 мкм
Профилометр MarSurf PS1 (Mahr GmbH, Германия)	<i>Ra, Rz</i>	От –200 мкм До +150 мкм
Профилометр TR-200 (TIME Group Inc. Китай)	<i>Ra</i> <i>Rz</i>	40,0–0,01 мкм 160,0–0,02 мкм
Профилометр Surftest SJ-201 P (Япония)	<i>Ra</i>	100,0–0,01 мкм
	<i>Rz</i>	350,0–0,02 мкм
Микроинтерферометр МИИ-4	<i>Rz</i>	0,8–0,1 мкм
Растровый микроскоп ОРИМ-1	<i>Rz</i>	40,0–0,4 мкм
Прибор светового сечения ПСС-2	<i>Rz</i>	40,0–0,8 мкм
Микроскоп двойной МИС-11	<i>Rz</i>	62,5–0,8 мкм
Прибор теневого свечения ПТС-1	<i>Rz</i>	320,0–40,0 мкм

1	2	3
Микроскоп теневого сечения поверхности ТСП-4М	$R_z$	1600,0–63,0 мкм
Рефлектометр ПКШ-1 (ЛОМО, Россия)	$R_a$	0,001–0,02 мкм
Series Laser Displacement Sensor Keyence LK-011...LK-081 (Германия)	$R_z$	20,0–0,1 мкм
Атомный силовой микроскоп (АСМ)	$R_{\max}$	10–0,1 нм
АСМ NT-206 SurfaceScan (Беларусь)	Поле сканирования	20 × 20 × 3 мкм
АСМ Solver P47H-PRO		12 × 12 × 1,5 мкм
АСМ Stand Alone SMENA		50 × 50 × 2,5 мкм
АСМ NTEGRA Prima (ЗАО «НТ-МДТ», Россия)		80 × 80 × 3,5 мкм
Оптический профилометр Wyko NT 1100 (Veeco Instruments, США)	$R_a, R_z$	1 мм–0,1 нм

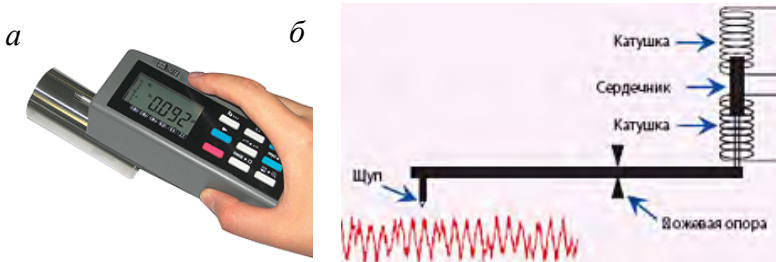


Рис. 5.15. Механический метод. Индуктивный контактный датчик:  
*a* – внешний вид прибора; *б* – функциональная схема измерения

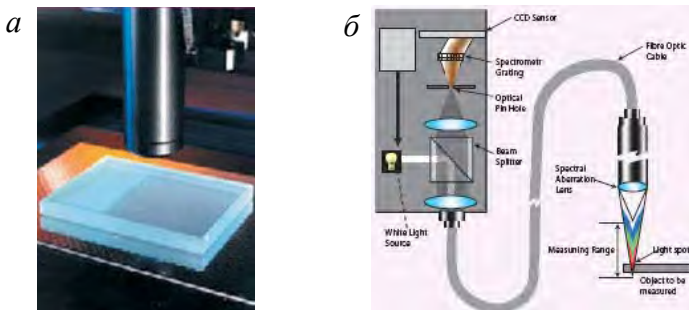


Рис. 5.16. Оптический метод. CLM конфокальный бесконтактный датчик:  
*a* – внешний вид рабочей зоны; *б* – оптическая схема измерения

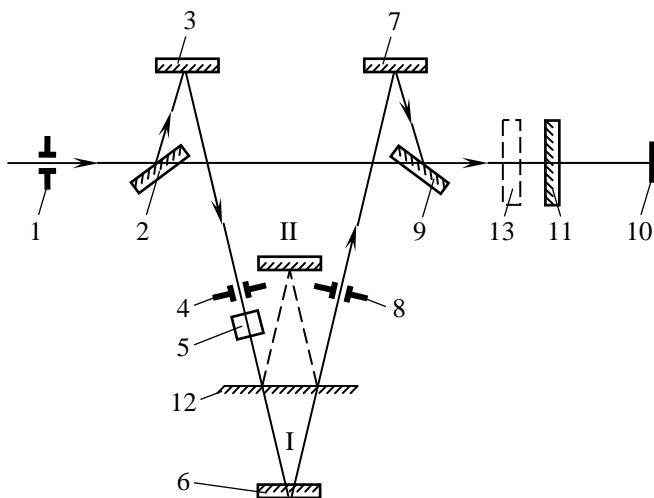


Рис. 5.17. Оптическая схема приставки ПЗО-2  
(схема V-W рефлексометра Д. Стронга):

1 – щель монохроматора; 2, 9 – плоские зеркала; 3, 6, 7 – сферические зеркала; 4, 8 – щель; 5 – цилиндрическая линза; 10 – фотоприемник; 11 – кварцевая пластина; 12 – испытуемый образец; 13 – матированное кварцевое стекло МС13; I и II – варианты положения зеркал соответственно по схеме V и W

*a*



*б*

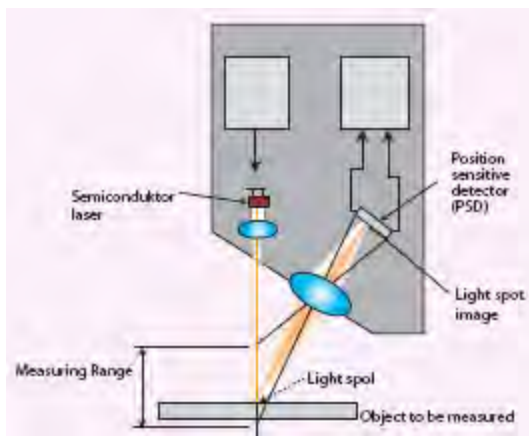


Рис. 5.18. Метод измерения шероховатости посредством лазерного датчика:  
*a* – внешний вид прибора Кеуенсе мод. LK-H025; *б* – схема бесконтактного измерения



Перечисленные выше модели приборов указываются в контрольных (маршрутно-операционных) картах технологического процесса обработки изделия как средства измерения (СИ) для соответствующих переходов и операций. Схемы контроля с изображением оптической детали могут быть приведены на картах эскиза или вынесены на плакат для пояснения принципа измерения.

### ***Контроль чистоты поверхности***

Параметры чистоты (Р) поверхности и методы их контроля регламентируются ГОСТ 11141–84, проверяются в зоне светового диаметра ОД и распространяются на поверхности с шероховатостью  $Rz < 0,1$  мкм. Контролируется наличие следующих дефектов: точек, царапин, заколов и выколов и прочих, устанавливаемых в технических требованиях чертежей ОД по ГОСТ 2.412–81.

Для поверхностей деталей, расположенных в плоскости действительного изображения или в плоскости предметов ОС, предусматриваются следующие классы чистоты (соответствующие среднему значению фокусного расстояния (мм) и увеличению в крат.):

0–10; 0–20 – сетки и коллективы, шкалы и лимбы, подложки дифракционных решёток;

0–40 – вышеперечисленные детали, а также подложки растров и детали фотоэлектрических систем для инфракрасной области спектра.

Для поверхностей деталей, находящихся вне плоскости действительного изображения или вне плоскости предметов ОС, а также волоконных изделий:

I – первая линза широкоугольных окуляров или первые линзы микрообъективов с  $\Gamma > 10^{\times}$ ;

II – призмы, коллективы, ОД вблизи плоскости действительного изображения, линзы микрообъективов;

III – линзы окуляров телескопических приборов, окулярные призмы, линзы окуляров микроскопов, линзы объективов для ИК области, плоскопараллельные пластины;

IV – призмы, линзы окуляров, объективов и оборачивающих систем телескопических приборов, лупы, линзы конденсоров и объективов ИК области, подложки светофильтров;

V – линзы и зеркала фотографических, киносъёмочных и линзы проекционных объективов (диаметром 20–50 мм), активные элементы лазеров;

VI – линзы объективов и оборачивающих систем телескопических приборов линзы и зеркала фотографических, киносъёмочных и линзы проекционных объективов (диаметром 50–100 мм);

VII – линзы и зеркала фотографических, киносъёмочных и астрономических объективов (диаметром 100–300 мм);

VIII и IX – линзы и зеркала фотографических и астрономических объективов (диаметром 300–500 мм);

VIIIa и IXa – линзы и зеркала фотографических и астрономических объективов (диаметром более 500 мм).

В зависимости от стадии изготовления оптических деталей различают два вида контроля чистоты:

промежуточный – посредством визуального осмотра обработанных (матовых) поверхностей на предмет выявления неустраняемых дефектов на ранней стадии;

окончательный – посредством контрольно-измерительных приборов обработанных (полированных) поверхностей [22].

Для класса чистоты 0–10 контроль производят посредством отсчётного микроскопа с увеличением  $25\times$  (например, МПБ-2 или МИР-2, штифтового микроскопа серии 2050 или Peak 2036–25).

Для класса чистоты 0–20 контроль осуществляют посредством лупы с увеличением  $10\text{--}12\times$ .

Для класса чистоты 0–40, I–III контроль осуществляют посредством лупы ЛИ-3-10 (ГОСТ 25706–83) с увеличением  $6\times$ .

Для классов чистоты IV–IX контроль осуществляют без применения увеличительного прибора.

Для эффективной оценки чистоты всей площади обработанной поверхности ОД необходимо разместить на фоне черного экрана (бархата) и вращать в косонаправленных лучах (угол падения  $45^\circ$ ) проходящего или отражённого света, исходящего от лампы накаливания мощностью 60–100 Вт с прозрачной колбой.

### **5.3. Технологические процессы сборки и юстировки оптических приборов в целом и отдельных составных узлов**

Согласно ГОСТ 3.1109–82 сборка – это образование соединений составных частей изделия. Сборка является наиболее трудоемкой стадией производства. В среднем трудоемкость сборки механических приборов составляет 40–50 % от общей трудоемкости изготовления прибора, оптических приборов – 45–55 %, электромеханических – 60–70 %, приборов электронной техники 70–80 %.

В соответствии с ГОСТ 23887–79 сборочная технологическая операция – это операция установки и образования соединений составных частей заготовки или изделия.

Перед началом организации процесса сборки необходимо провести анализ технологичности собираемого изделия, а также определить, какое сочетание видов сборки будет наиболее оптимальным для данного случая. Обоснование выбора каждого вида сборки необходимо описать в разделе пояснительной записки к дипломному проекту.

#### *Этапы проектирования технологического процесса сборки*

Последовательность выполнения этапов по разработке технологического процесса предусматривает выполнение следующих действий:

1. Изучение исходной КД на изделие (сборочных чертежей, технических требований, РЭ, ТУ и пр.).
2. Отработка изделия на технологичность.
3. Определение вида технологического процесса сборки.
4. Построение технологической схемы сборки (определение базовой детали, разбиение изделия на узлы примерно одинаковой сложности и трудоемкости сборки).
5. Установление методов сборки.
6. Разработка маршрутной и операционной технологии (составление технологических карт).
7. Выбор оборудования.
8. Определение технологических режимов.
9. Выбор или проектирование оснастки.
10. Разработка технических условий на сборку.
11. Выбор методов и средств контроля.
12. Нормирование трудоёмкости операций.



13. Определение способов транспортирования и вида тары.

14. Составление требований по технике безопасности и охране окружающей среды.

15. Оформление технологической документации.

**Обработка** собираемого **изделия на технологичность** предусматривает проведение следующих действий:

1. Рациональная разбивка на сборочные единицы, что особенно важно в условиях параллельной сборки узлов изделия.

2. Создание конструкции с наименьшим числом соединений, с короткими размерными цепями.

3. Создание таких конструкторских баз, которые в процессе обработки заготовок могут совпадать с измерительными и технологическими базами.

4. Максимальное применение стандартных и унифицированных деталей и сборочных единиц и создание несложных конструкций оригинальных деталей.

5. Обеспечение возможности применения механизации и автоматизации сборочных операций в серийном и массовом производстве.

6. Удобный доступ для контроля и регулировки при эксплуатации и для разборки при ремонте.

7. Выбор наиболее рационального для конкретных производственных условий метода сборки, обеспечивающего точность сборки и наименьшую трудоемкость.

Существует следующая классификация видов сборки [44]:

*по объекту сборки:* узловая или общая;

*по последовательности сборки:* последовательная, параллельная или последовательно-параллельная;

*по стадиям сборки:* предварительная, промежуточная или окончательная;

*по подвижности объекта сборки:*

- подвижная с непрерывным перемещением,
- подвижная с периодическим перемещением,
- неподвижная (стационарная);

*по организации производства:*

- типовая, поточная с использованием транспортных средств,
- типовая, поточная без использования транспортных средств,
- групповая, поточная с использованием транспортных средств,
- групповая, поточная без использования транспортных средств,

- групповая, не поточная,
- единичная;

*по степени механизации и автоматизации:*

- автоматическая,
- автоматизированная,
- механизированная,
- ручная;

*по методу обеспечения точности сборки:*

- с полной взаимозаменяемостью,
- селективная,
- с неполной взаимозаменяемостью,
- с пригонкой,
- с компенсационными механизмами,
- с компенсационными материалами.

Метод сборки определяется степенью взаимозаменяемости входящих в сборочную единицу элементов, т. е. геометрической точностью выполнения их размеров. Всего применяется шесть методов сборки.

***Сборка методом полной взаимозаменяемости.*** Сборка данного вида является признаком наиболее высокой технологичности конструкции. Процесс сборки сводится к соединению деталей без дополнительной обработки. Упрощается организация сборочных потоков (конвейеров) и легко решается проблема запасных деталей и узлов. Однако полная взаимозаменяемость требует высокой точности изготовления отдельных деталей, что значительно повышает их себестоимость.

***Селективная сборка.*** Сущность метода заключается в том, что детали изготавливают с расширенными полями допусков. Далее перед сборкой детали сортируются на группы по заранее установленным градациям размеров. После этого сборку деталей производят только в пределах одноименных групп, т. е. только в тех сочетаниях, которые обеспечивают заданную (зауженную) по чертежу точность сборочного размера. Метод является экономически эффективным, однако требует осуществления 100%-го контроля деталей по соединяемому параметру.

***Сборка с пригонкой.*** Точность сборки деталей достигается путем снятия слоя материала с поверхности детали, которая заранее определяется конструктором. Метод применяется в серийном и

мелкосерийном производстве. Достоинства: высокая точность сборки при низкой точности изготовления деталей. Недостатки: постоянный контроль звеньев сборочной размерной цепи, большой объём промежуточных измерений и дополнительных слесарных работ.

**Сборка с применением компенсационных звеньев.** Сущность метода заключается в том, что требуемая точность собираемого изделия достигается конструктивным введением компенсирующего звена (детали) без снятия с него слоя материала. В процессе сборки указанной детали придают некоторое линейное перемещение или поворот относительно оси. Примеры таких решений – применение регулировочных винтов, винтов с эксцентриситетом, шайб, кинематических устройств и т. п.

**Сборка с применением компенсационных материалов.** В качестве компенсационных материалов применяются: жесткая резина, мягкая пластмасса, тонкие прокладки из металла, фольги или картона и пр.

#### ***Перечень работ, выполняемых при сборке***

##### **1. Соединение деталей и узлов.**

Подгонка деталей и их совместная обработка в процессе сборки. Подгонка осуществляется путем притирки, обкатки и приработки деталей друг к другу. Применяются также шабрение и токарно-пригоночные работы.

**2. Электромонтажные работы.** *Электрическим монтажом* называется совокупность рабочих приёмов, при помощи которых осуществляется электрическое соединение функциональных элементов, входящих в состав узлов, блоков прибора, в соответствии с принципиальной электрической или электромонтажной схемой. На электромонтажной схеме, выполняемой в виде конструкторской разработки, графически представлено действительное расположение электрических элементов и монтажных проводов и даны все необходимые указания по производству электромонтажа.

**3. Регулировка механизмов прибора** производится для обеспечения заданной точности их работы (устранение «мертвых ходов» в зубчатых зацеплениях, смещения начала отсчета; установка щётки потенциометра на нуль в исходных положениях узлов и деталей механизмов и т. д.). Регулировка сопровождается контролем точности взаимодействия механизмов и отсчетных устройств приборов.

##### **5. Контрольно-юстировочные операции.**

**6. Вспомогательные операции:** чистка оптики, чистка деталей, промывка электрических контактов, смазка, герметизация и т. д.

В связи с различными требованиями в отношении чистоты поверхности при сборке механических и оптических узлов указанные виды сборочных операций территориально разделяют на механическую и оптическую, последняя предусматривает соединение оптических деталей и узлов с механическими и их установку в прибор.

Так как оптические детали прибора предназначены для прохождения светового потока через прибор, то недопустимо загрязнение поверхности оптических деталей, поскольку оно уменьшает количество проходящей через прибор световой энергии. Особенно недопустимо загрязнение поверхностей, вблизи которых образуется промежуточное изображение. Поэтому в технологию сборочных работ обязательно вводят процесс чистки оптики.

Таким образом, *сборка оптико-электронного прибора*, как правило, проводится в такой последовательности: механическая сборка–пригонка–электромонтаж–регулировка–оптическая сборка–юстировка–чистка оптики.

После сборки осуществляется контроль выходных параметров и характеристик прибора. Для проверки эксплуатационной надежности проводятся испытания приборов в условиях, имитирующих условия эксплуатации.

### ***5.3.1. Соединение оптических деталей посредством клея или оптического контакта***

Выбор марки оптического клея, технологии склеивания и дополнительной термической обработки соединения определяются размерами и материалом склеиваемых деталей, качеством сопрягаемых поверхностей, техническими требованиями чертежа, физико-механическими и химическими свойствами клеящего вещества в соответствии с ГОСТ 14887–80, ОСТ 3-6894–97 [22] и для соединения других (не оптических) деталей [45].

Современные оптические клеи – это синтетические полимерные органические материалы (за исключением бальзамина), которые подразделяются на несколько классов: карбинольные бальзамины (М, М2); эпоксидные (ОК-50П, ОК-72ФТ5, ОК-72ФТ15); акриловые (ММА) и акрилатные (АКС); полиэфирные (ОК-90М); кремнийорганические (УФ-215М – для ультрафиолетовой и ИК-1М, ТКС-1 – для инфракрасной области спектра). Назначение и область применения основных марок оптических клеев приведены в табл. 5.24.

Назначение и область применения оптических клеев

Наименование и марка клея	Назначение и область применения
1	2
Бальзам	Склеивание ОД из силикатных стекол всех марок, точная центрировка которых обеспечивается за счет индивидуального крепления и фиксации в оправках, для склеивания шкал и сеток с фотослоем; не рекомендуются для склеивания тройных линз
Бальзамин	Склеивание ОД из силикатных стекол всех марок. Ограниченно применим для склеивания деталей со светоделительными покрытиями и светофильтров. Детали приборов с повышенными требованиями к качеству изображения бальзамин не склеивают
Бальзамин М	Склеивание ОД из силикатных стекол различных марок, деталей со светоделительными покрытиями, светофильтров и поляроидов, а также крупногабаритных деталей
Акриловый клей	Склеивание линз, призм и других ОД из силикатных стекол всех марок размером до 30 мм для приборов, не допускающих люминесценции; поляризационных призм из кальцита, поляроидов, фильтров и клиньев с желатиновыми и поливиниловыми пленками; деталей из квасцов для зеркальных объективов и силикатного стекла с металлами
Клей ОК-50П	Склеивание ОД из силикатных стекол при повышенных требованиях к механической прочности склейки, кон-сольно подвешенных деталей, стекол с металлами за исключением олова, хрома, инвара, ковара
Клей ОК-72ФТ <sub>5</sub>	Склеивание ОД приборов, к которым предъявляются повышенные требования по прочности склеивания, влагостойкости, а также вибро- и ударопрочности, работающих в условиях влажных тропиков. При разности коэффициентов линейного расширения склеенных материалов до $30 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Рабочий диапазон температур от +60 °С до -60 °С
Клей ОК-72ФТ <sub>15</sub>	Склеивание тонких ОД (отношение толщины к диаметру порядка 1:10 и менее) приборов, работающих в условиях влажных тропиков; для герметизации межфасочного пространства деталей, склеенных бальзамом и бальзаминном, с последующей установкой и закаткой их в оправу на клее ОК-72ФТ <sub>15</sub> . Рабочий диапазон температур от +80 до -60 °С

1	2
Клей ММА	Склеивание ОД диаметром до 250 мм из силикатных стекол. Не вызывает деформации склеенных деталей после нагревания при 80 °С в течение 5 ч. Детали, склеенные клеем ММА <sub>1</sub> , устойчивы в условиях влажного тропического климата. Клей ММА <sub>2</sub> отличается повышенной жизнеспособностью, но менее влагостоек
Клей ОК-90М	Склеивание линз
Клей УФ-215М	Склеивание деталей из кварца, флюорита, фтористого лития и других материалов, прозрачных в ультрафиолетовой области спектра

В оптическом производстве применяются бальзамы различной твердости, отличающиеся содержанием льняного масла. Твердость характеризуется числом пенетрации по ГОСТ 2250–76. Твердые бальзамы обеспечивают более теплостойкую, мягкие – более морозостойкую склейку. Акриловый клей и бальзам хорошо растворяются в эфире, спирте и ацетоне, имеют неограниченную по времени жизнеспособность при температуре близкой к 20 °С. В настоящее время бальзамы в значительной степени вытеснены синтетическими клеями.

В большинстве случаев показатель преломления клея зависит от его марки и составляет от 1,48 до 1,65. Пропускаемая рабочая длина волны 0,22–3,2 мкм.

При выполнении операции склеивания оптических деталей необходимо учитывать назначение оптического прибора и условия его эксплуатации, а также обеспечить соблюдение следующих эксплуатационных и технологических требований [22]:

- высокую прозрачность и бесцветность клея в заданной области спектра;

- близкие показатели преломления склеиваемых материалов и клея после его отвердевания (желательно средний между показателями преломления двух ОД);

- чистоту поверхностей склейки (отсутствие механических включений, воздушных пузырьков, царапин, сколов и других видимых дефектов) в соответствии с ОСТ 3-2989–93 и ГОСТ 11141–84;

– при совмещении плоские поверхности круглых оптических деталей (прицельных и измерительных сеток, а также линз) должны быть ортогональны главной оптической оси (в качестве основной базы выбирается внешний посадочный диаметр ОД);

– центры кривизны вогнутых и выпуклых сферических поверхностей линз также должны быть совмещены с главной оптической осью (на сборочном чертеже задаётся через позиционный допуск);

– сохранять собственную прочность (когезия) и механическую прочность сцепления со склеиваемыми материалами (адгезия) при возникновении вибраций, случайных ударов, знакопеременных нагрузок и т. п.;

– сохранять высокую эластичность и обеспечивать устойчивость соединения к перепадам температур, изменению влажности, воздействию лазерного излучения и УФ-облучения;

– нетоксичность материала клея.

При разработке маршрута технологического процесса сборки перечисленные выше требования предусматривают введение дополнительных операций и переходов.

1. Комплектация ОД по толщинам. Для оптических систем высокой точности разность между вогнутой и выпуклой сферической поверхностью линз должна составлять не более  $N = 3-5$  интерференционных колец (общая «яма»), а для систем низкой точности – не более 10. Комплектация линз снижает суммарную погрешность толщины сборки и тем самым обеспечивает получение заданных значений фокусных отрезков.

2. Промывка склеиваемых поверхностей органическими растворителями. Чистку поверхностей ОД производят батистовыми салфетками, смоченными смесью этилового спирта и петролейного эфира (процентное соотношение 1 : 9).

3. Подготовка клея. Перед склеиванием некоторые марки клеев предварительно подогреваются в пробирках на электроплитке (водяная баня) до следующих температур: бальзамы до 130 °С; бальзамины до 70–80 °С; ОК\*\* до 30–40 °С. Синтетические клеи, состоящие из нескольких компонентов, тщательно смешивают в пробирке с помощью механического смесителя. Частичная полимеризация клея (бальзамина) до требуемой вязкости может проводиться также в термостате при 50–60 °С при освещении электролампой мощностью 150 Вт.

Склеивание ОД следует производить после нанесения просветляющих покрытий и до нанесения защитных покрытий.

4. Нанесение клея осуществляется с помощью стеклянной палочки или капельницы на верхнюю вогнутую поверхность нижней линзы. Затем накладывается верхняя линза и деревянной рукояткой с замшей или пробковой шайбой. Плавно, круговыми движениями она притирается к нижней ОД. Пузырьки воздуха выдавливаются вместе с избытком клея. Оптимальная толщина слоя клея составляет 10–20 мкм. Избыток клея удаляется салфеткой, смоченной органическими растворителями. Призмы склеивают посредством их установки в специальное приспособление с опорами. Крупногабаритные ОД: защитные люки, фильтры, а также пластины поляризаторов склеивают под давлением.

5. Далее производится центрирование склеенного блока (совмещение оптической и геометрической осей) с использованием микроскопов-коллиматоров, а также других контрольно-юстировочных приборов моделей СТ-41М, ПК-893, КЮ-129 (рис. 5.20). Требования по выполнению промежуточного контроля склеенного соединения регламентированы ОСТ 3-6187–95.

6. Выдержка склеенных деталей в заданных лабораторных условиях производится в специальных термостатах при температуре +50...+80 °С или в помещениях, оснащённых электроламповыми нагревателями мощностью 150 Вт.

На СП «Цейсс-БелОМО» в качестве основных и вспомогательных склеивающих материалов применяют клеи Kitt ОК 2272, Kitt ОК 2274, Harz ОК 2008, Harz ОК 2066F, Harz ОК 2405, а также средства для сшивки клея Vernetzer В 30/F и отвердители для клея Harter ОК 2405 Harter 980.

Последовательность выполнения операций при разработке технологического процесса склейки ОД представляется на плакате в виде блок-схемы (рис. 5.21 и 5.22).



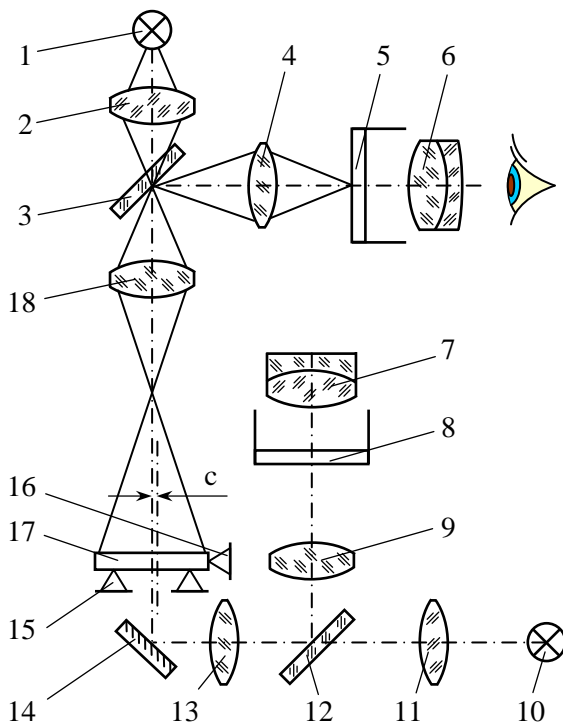


Рис. 5.20. Контроль качества и точности склейки ОД объектива:  
 1, 10 – источник света; 2, 11 – конденсор; 3, 12 – зеркало с перекрестием;  
 4, 9 – вспомогательный объектив; 5, 8 – экран с прозрачной шкалой;  
 6, 7 – окуляр; 15, 16 – нижние и боковые упорные призмы;  
 13, 18 – объективы; 14 – зеркало; 17 – проверяемая склейка

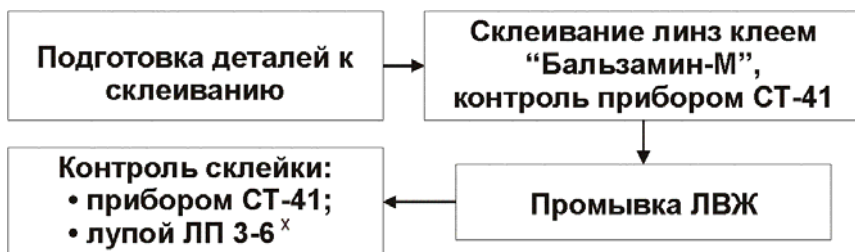


Рис. 5.21. Технологический процесс склеивания линз



Рис. 5.22. Технологический процесс склеивания линз с призмой

В качестве временного варианта крепления ОД на различных стадиях их обработки используют простой и глубокий оптический контакт, основанный на действии сил молекулярного сцепления. Этот метод применяют также для соединения ОД в узлы, когда необходимо исключить влияние клеящего слоя на оптические характеристики системы, например, не допустить деформацию элементов сборки при высыхании клея или свести к минимуму коэффициент отражения от сопрягаемых поверхностей (достигаемый коэффициент отражения  $\rho = 10^{-7}$ ).

Глубокий оптический контакт предусматривает дополнительное нанесение на сопрягаемые поверхности тонкой плёнки оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) с последующим подогревом соединения до температуры  $250^\circ\text{C}$ .

Соединяемые поверхности должны удовлетворять следующим требованиям:

- шероховатость поверхности  $Ra < 0,05$  мкм (ГОСТ 2789–73);
- чистота III класс (ГОСТ 11141–84);
- точность формы  $N = 0,2–0,5$  (для размеров 10–250 мм);
- погрешность формы  $\Delta N = 0,1$ .

Данным методом соединяют детали из силикатного и кварцевого стекла, ситаллов, некоторых кристаллов (Si, Ge и др.).

### 5.3.2. Составление схемы общей или узловой сборки

Схема сборки изделия (ССИ) – это условное графическое изображение всех деталей (Д) и сборочных единиц (СЕ) в порядке их установки в собираемое изделие – общую сборку (ОС). Норматив-

ных документов, строго определяющих внешнюю форму построения ССИ, на сегодняшний день не существует, однако имеется ряд общих требований, которых рекомендуется придерживаться при её выполнении.

Схема параллельной сборки может иметь несколько ступеней вхождения, например три, как показано на рис. 5.23, *а* (вертикальное исполнение).

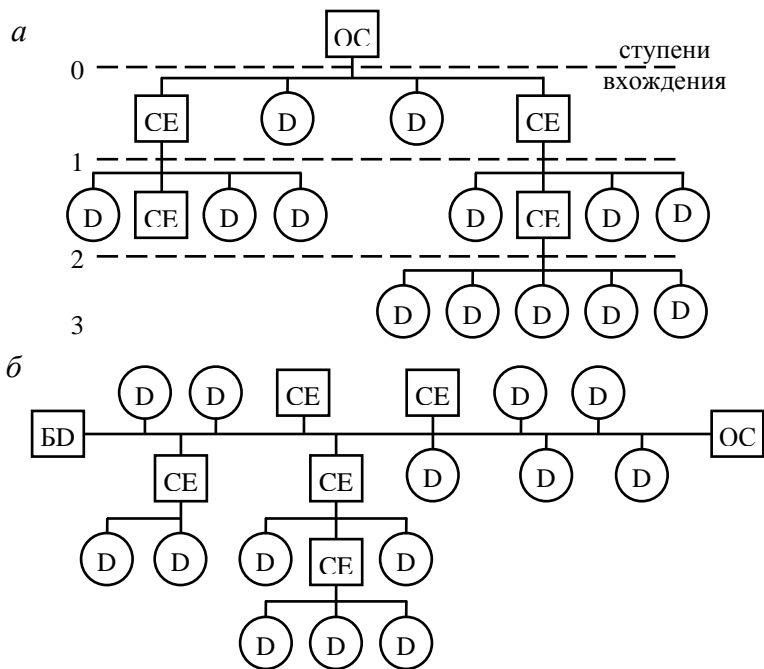


Рис. 5.23. Варианты построения схем сборки изделия: параллельная, верного типа (*а*); последовательная, от базовой детали (*б*)

Последовательная сборка обычно выполняется в линейной форме и начинается с базовой детали (БД) (горизонтальное исполнение) (рис. 5.23, *б*).

Схема сборки может также быть преобразована в технологическую схему сборки. Для этого на неё дополнительно наносят технологическую информацию по сборке: обозначения рабочих мест, штучное время, разряд работы и т. п. [44].

При веерной вертикальной схеме сборки построение дерева начинается последовательно снизу вверх (↑) от отдельных деталей (Д) к промежуточным сборочным единицам (СЕ) до готового изделия – общей сборки (ОС). Каждая Д или СЕ оформляется в виде отдельного блока-таблички, который включает четыре ячейки: номер позиции на сборочном чертеже, наименование детали в спецификации, буквенно-цифровой десятичный номер её обозначения, количество данных деталей в сборочной единице.

Для стандартных деталей, например винтов, болтов, гаек, дополнительно указываются кодовое обозначение метрической резьбы, поле допуска, длина, размер «под ключ»; для шариков, штифтов, шайб – диаметр, длина или толщина; для пружин и подшипников – номер по каталогу. В конце записывается соответствующий ГОСТ, ОСТ или ISO.

Для оригинальных деталей при выборе наименования на первом месте всегда должно стоять существительное, а в качестве дополнения или введения различий при большом числе элементов можно использовать прилагательное, поясняющее назначение или конфигурацию детали, например «винт регулировочный» или «пружина плоская» и т. п. При записи призмы указывается её кодовое обозначение, например AP-90°.

Перед обозначением сборочной единицы ставится её порядковый номер, например № 1 СБ. При соединении двух деталей, требующих применения дополнительного слесарно-сборочного инструмента, в точке их сопряжения на выносных линиях-полках со стрелкой курсивом указывается тип соединения. Например: «запрессовать» (штифт в основание), «притереть, выдержав зазор 0,1 мм» (ось к втулке подшипника скольжения) или «приклеить, Герметик УТ-34 ГОСТ 24285–80» (прокладку к крышке) и т. д.

В качестве базовой детали (БД), как правило, выбирается наиболее крупный несущий элемент конструкции: корпус прибора, основание, платформа, плато и т. п., в который последовательно устанавливаются остальные, более мелкие, сборочные единицы, а также оригинальные и стандартные детали. Все стандартные детали располагаются слева от основного «ствола дерева» сборки, а оригинальные – справа [23]. Данные правила характерны как при построении общей, так и узловой сборки механизма крепления и юстировки оптической детали.

После составления общей схемы технологической сборки необходимо ещё раз самостоятельно с карандашом проверить по сборочному чертежу последовательность установки отдельных деталей и места сопряжения их блок-табличек со стволом и отдельными ветвями дерева сборки, а также основных номеров на предмет принадлежности к соответствующим сборочным единицам и возможности обеспечения собираемости изделия.

Правила и последовательность составления технологической схемы сборки подробно изложены в источнике [46]. Вариант исполнения общей и узловой схемы сборки применительно к части оптического прибора – в источнике [23]. На рис. 5.24 приведен пример выполнения плаката с изображением комбинированной схемы сборки дублёра телевизионного танкового прицела.

ССИ разрабатывается конструктором и представляется в комплекте конструкторской документации.

На основании ССИ осуществляется *разработка маршрутной и операционной технологии сборки* изделия, а также определяется вид её организации в качестве *группового или типового технологического процесса*.

*Типовой технологический процесс сборки* включает:

- комплектовочную операцию, на которой подбирается комплект деталей по спецификации;
- расконсервационную операцию, на которой все детали промываются в водно-щелочных растворах;
- сборочную операцию, на которой для каждого изделия осуществляется непосредственно соединение деталей (в зависимости от типа производства разрабатывается своя маршрутная и операционная технология);
- настройку, регулировку и испытания изделия;
- контрольную операцию;
- упаковочную операцию.

*Групповой технологический процесс сборки*, как и типовой технологический процесс, является способом унификации технологических решений. Данный процесс позволяет увеличить серийность сборочных операций и в мелкосерийном производстве приносить более высокопроизводительное оборудование.

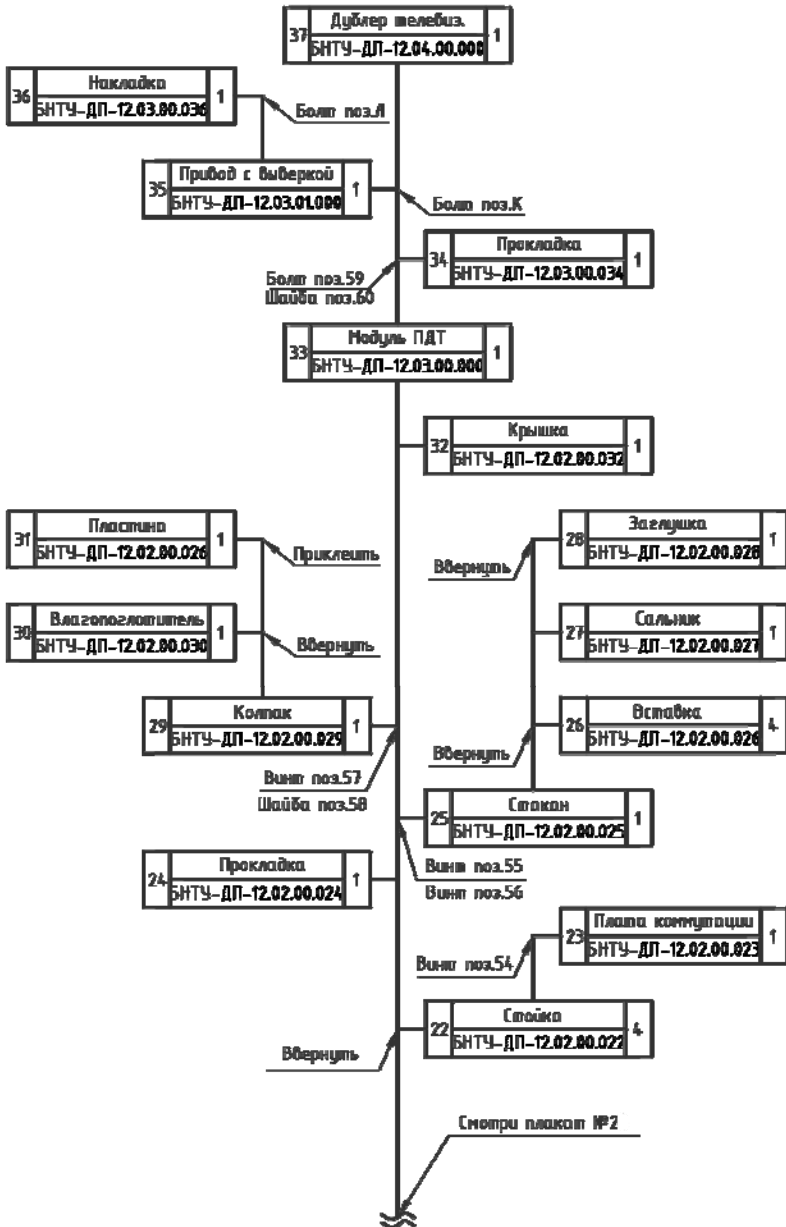


Рис. 5.24. Схема сборки дублира телевизионного танкового прицеда (лист 1)

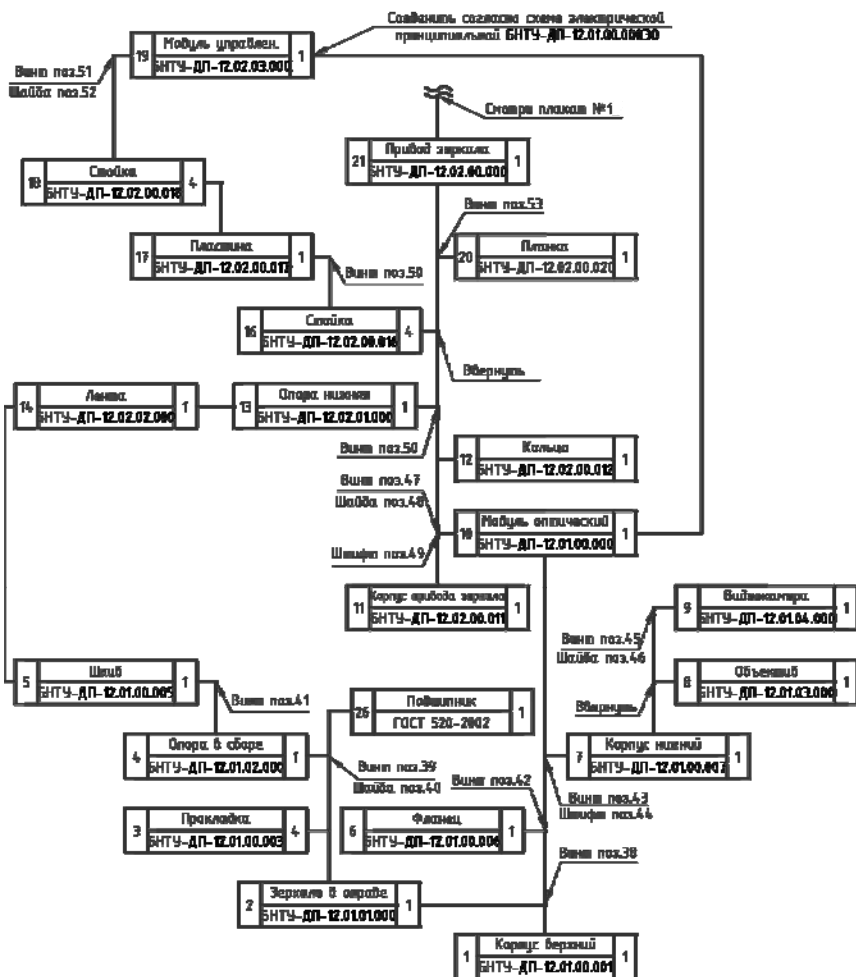


Рис. 5.24. Схема сборки дублёра телевизионного танкового прицела (лист 2)

## **6. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ**

Научно-исследовательские работы обычно составляют 20 % от общего объёма выполняемого дипломного проектирования на кафедре. К числу государственных организаций, в которых выполняются такие дипломные работы, относятся НИЦ «Оптические материалы и технологии» БНТУ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, ОАО «Пеленг» или частные предприятия, такие как ООО «Изовак», ЗАО «Солар ЛС» и др.

Темой исследовательской дипломной работы может являться:

- изучение новых материалов для лазерной техники и лазеров на их основе;
- усовершенствование методик анализа и измерений характеристик веществ с использованием оптических методов;
- исследование оптических свойств интерференционных покрытий с высокой лучевой прочностью и др.

Выполнение исследовательской дипломной работы сопряжено с глубокой проработкой поставленной научной проблемы с использованием литературных источников (в большинстве случаев – периодических научных журналов), проведении под руководством консультанта от предприятия серии научных экспериментов с последующей обработкой экспериментальных данных с помощью математического программного обеспечения и оценкой результатов экспериментов и их сопоставлением с литературными данными.

### **6.1. Разработка технического задания**

Техническое задание на выполнение научно-исследовательской работы (НИР) является исходным документом, определяющим необходимые и достаточные требования к создаваемой в процессе выполнения НИР научно-технической продукции [47]. Разработку ТЗ, как правило, осуществляет исполнитель НИР (студент совместно с консультантом) на основе требований заказчика, анализа состояния перспектив развития науки и техники в данной области с учетом прогнозируемых показателей научно-технического уровня и требований рынка.

Техническое задание на выполнение НИР в общем случае содержит следующие разделы: наименование НИР; основание для



выполнения НИР; сроки выполнения НИР; цель и задачи НИР; этапы НИР; требования к результатам НИР; перечень документации, предъявляемой по окончании НИР; порядок рассмотрения, сдачи и приемки НИР.

В разделе «**Основание для выполнения НИР**» указывается полное наименование документов, на основании которых проводится работа, организация, утвердившая документ, и дата утверждения. *Например:* Задание на дипломную научно-исследовательскую работу, выданное кафедрой «Лазерная техника и технология», утвержденное 16 февраля 2012 г. заведующим кафедрой Кулешовым Н.В.

В разделе «**Сроки выполнения НИР**» указываются даты начала и окончания выполнения НИР.

В разделе «**Цель и задачи НИР**» формулируются цель работы и задачи, которые необходимо решить для ее достижения. Не следует формулировать цель как «Исследование...», «Изучение...», так как эти слова указывают на процесс достижения цели, а не на саму цель, *например:*

*первый вариант:* «Целью работы является разработка пассивного затвора на основе кристалла  $\text{Co: MgAl}_2\text{O}_4$  для твердотельных лазеров с диодной накачкой, излучающих в спектральной области 1,5–1,6 мкм». Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач: исследование спектров поглощения и времени жизни возбужденного состояния  $^4\text{T}_2$  ионов  $\text{Co}^{2+}$  в кристалле  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , исследование насыщения поглощения из основного состояния ионов  $\text{Co}^{2+}$  в кристалле  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , проведение экспериментов по получению лазерной генерации в спектральной области 1,5–1,6 мкм с использованием кристалла  $\text{Co: MgAl}_2\text{O}_4$  в качестве пассивного затвора;

*второй вариант:* «Целью работы является создание многослойного интерференционного диэлектрического покрытия с высокой лазерной прочностью на основе  $\text{ZrO}_2\text{--SiO}_2$  и оптимизация технологического процесса его нанесения».

В разделе «**Этапы НИР**» перечисляются этапы исследования, а также перечень документов, подлежащих разработке, и сроки их выполнения, *например:*

*первый вариант:*

1. Анализ текущего состояния научной проблемы и литературный обзор (01.07.2012–30.08.2012).

2. Разработка ТЗ (01.09.2012–10.09.2012).
3. Проведение измерений спектров поглощения и времени жизни возбужденных состояний (11.09.2012–25.09.2012).
4. Расчет резонатора для лазерных экспериментов (26.09.2012–10.10.2012).
5. Проведение экспериментов по получению лазерной генерации (11.10.2012–30.10.2012).
6. Оформление пояснительной записки (01.11.2012–20.11.2012).  
*второй вариант:*
  1. Анализ текущего состояния научной проблемы и литературный обзор (16.02.2012–2.03.2012).
  2. Разработка ТЗ (5.03.2012–9.03.2012).
  3. Конструирование покрытий на основе равнотолщинных слоев  $ZrO_2 - SiO_2$  (12.03.2012–14.03.2012).
  4. Оптимизация технологического процесса нанесения многослойных интерференционных диэлектрических зеркал на установке Ortus (15.03.2012–23.03.2012).
  5. Получение диэлектрических зеркал на основе равнотолщинных слоев  $ZrO_2 - SiO_2$  (26.03.2012–29.03.2012).
  6. Проведение экспериментов по определению порога лазерного разрушения полученных зеркал (2.04.2012–4.04.2012).
  7. Анализ полученных результатов и определение степени выполнения исходных задач (5.04.2012–13.04.2012).
  8. Оформление пояснительной записки (16.04.2012–02.05.2012).

В разделе «**Требования к результатам НИР**» содержатся требования, которым должна соответствовать продукция, являющаяся результатом НИР, *например*: «В рамках НИР должны быть определены основные спектроскопические характеристики кристалла  $Co: MgAl_2O_4$  и реализован лазер с диодной накачкой и модуляцией добротности на основе вышеуказанного кристалла с длительностью импульсов не более 50 нс и средней выходной мощностью не менее 100 мВт» или «В рамках НИР должны быть определены основные свойства многослойных диэлектрических покрытий с высокой лазерной прочностью и определен оптимальный технологический процесс, обеспечивающий получение зеркал на основе равнотолщинных слоев  $ZrO_2-SiO_2$  с порогом лазерного разрушения не менее 5 Дж/см<sup>2</sup>».

В разделе «**Перечень документации, предъявляемой по окончании НИР**» приводят список документов, предъявляемых заказчику для рассмотрения при приемке НИР, *например*:

1. Задание по дипломному проектированию.
2. Техническое задание на проведение НИР.
3. Пояснительная записка к дипломной работе.
4. Отзыв руководителя дипломной работы.
5. Рецензия независимого эксперта.

В разделе «**Порядок рассмотрения, сдачи и приемки НИР**» указывают основные этапы рассмотрения дипломной работы (см. «Введение») на заседании рабочей комиссии (предзащите), последующем рецензировании НИР в сторонней организации, защите дипломного проекта в ГЭК и окончательной сдаче с описью материалов ДР заведующему учебной лаборатории кафедры «Лазерная техника и технология» Драгуну Ю.В.

## **6.2. Литературный обзор**

Литературный обзор является важнейшей частью исследовательской дипломной работы и требует глубокой проработки. В данном разделе должно приводиться описание основных этапов развития научных представлений по рассматриваемой проблеме. Если речь идет о разработке нового материала для лазерной техники, обзор должен включать сравнительное описание свойств материалов, ранее применявшихся для данных целей. Если темой дипломной работы является разработка новой измерительной методики, то в обзоре дается подробная характеристика существующих методов измерений. Литературный обзор обязательно должен раскрывать недостатки существующих материалов или измерительных методов и показывать необходимость разработки новых решений. Итогом написания раздела является обоснование целей и задач дипломной работы и определение их места в проведении данных научных исследований.

## **6.3. Методика, аппаратура и объекты исследования**

В данном разделе приводятся свойства объектов исследования, характеристика основных подходов к решению поставленных задач, излагаются используемые теоретические и (или) эксперименталь-

ные методы исследований, описывается применяемая аппаратура. Целесообразно также провести оценку погрешности измерений.

В случае когда объектом исследования является новый материал для лазерной техники, необходимо перечислить его оптические и физические постоянные, охарактеризовать методику роста кристалла, привести параметры кристаллической решетки, указать диапазон концентраций легирующих ионов, отметить прочие особенности.

При описании методики вычислений приводится основная расчетная формула, дается расшифровка использованных обозначений, необходимые пояснения и ссылка на литературные источники с подробным описанием метода.

При описании методики измерений приводится структурная схема измерительной установки с подробным описанием принципа ее работы и расшифровкой всех ее элементов. Для основных измерительных приборов рекомендуется указать наименование модели и ключевые характеристики. Выделяются спектральный, температурный, временной и другие диапазоны измерений. В случае если результаты измерений подлежат дальнейшей обработке, приводятся соответствующие расчетные формулы. Рекомендуется оценка общей погрешности измерений на основании погрешностей отдельных элементов измерительной установки.

Далее в качестве примера рассмотрим два варианта выполнения дипломных научных работ: первое направление касается исследований в области лазерных резонаторов и кристаллов (п. 6.3–6.5.3) и второе направление касается проектирования многослойного интерференционного покрытия (п. 6.6.1–6.6.8).

### ***Определение спектров сечений поглощения и стимулированного испускания***

Поглощение активного материала в общем случае может быть охарактеризовано тремя спектрами поглощения, зарегистрированными в поляризованном свете, так чтобы направления поляризации были параллельны одной из осей эллипсоида показателей преломления. Тогда сечения поглощения вычисляются согласно соотношению

$$\sigma_{\text{изл}}(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{N}, \quad (6.1)$$

где  $\alpha(\lambda)$  – коэффициент поглощения материала на длине волны  $\lambda$ ,  $\text{см}^{-1}$ ;

$N$  – концентрация ионов примесных центров в матрице,  $\text{см}^{-3}$ .

Спектры сечений стимулированного испускания могут быть определены либо методом соответствия (МС), либо методом Фюхтбауэра–Ладенбурга (ФЛ) (по формуле). Методы соответствия применимы для квазитрехуровневых активных материалов и основаны на том, что между спектрами сечений поглощения и стимулированного испускания при переходах между подуровнями нижнего и верхнего мультиплетов можно установить связь (соответствие). Рассмотрим схему энергетических уровней квазитрехуровневого активного материала (рис. 6.1) [48].

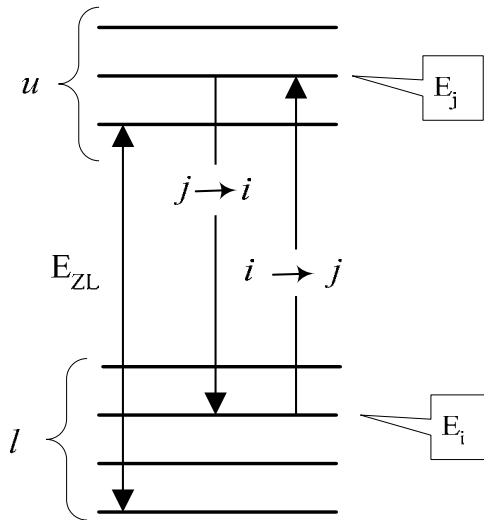


Рис. 6.1. Схема энергетических уровней квазитрехуровневого материала:  
 $u$  – верхний мультиплет;  $l$  – нижний мультиплет

Подуровни верхнего мультиплета будем обозначать индексами  $j$ , нижнего –  $i$ , энергетическое расстояние между нижними подуров-

нями каждого мультиплета –  $E_{ZL}$ . Эффективное сечение поглощения света на частоте  $\nu$  при переходе с подуровня  $i$  нижнего мультиплета на подуровень  $j$  верхнего мультиплета можно записать в виде

$$\sigma_{\text{погл}}^{ij}(\nu) = \frac{g_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right)}{Z_{l(u)}} \sigma_{ij}(\nu) g_{ix},$$

где  $g_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right)$  – вероятность заселения  $i$  подуровня, понимаемая в обычном смысле;

$\sigma_{ij}(\nu)$  – сечение перехода  $i \rightarrow j$ ;

$g_x$  ( $x = i, j$ ) – спектроскопическое вырождение подуровня с индексом  $x$ ;

$Z_{l(u)} = \sum_m g_m \exp\left(\frac{-E_m}{kT}\right)$  – статистическая сумма нижнего (верхнего) мультиплета, здесь суммирование производится по подуровням нижнего (верхнего) мультиплета.

Суммирование по всем парам подуровней обоих мультиплетов даст полное сечение поглощения на частоте  $\nu$ :

$$\sigma_{\text{погл}}(\nu) = \frac{1}{Z_l} \sum_{i,j} g_i g_j \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \sigma_{ij}(\nu). \quad (6.2)$$

Аналогичное выражение можно записать для сечения стимулированного испускания на частоте  $\nu$  при переходах с верхнего на нижний мультиплет:

$$\sigma_{\text{исп}}(\nu) = \frac{1}{Z_u} \sum_{i,j} g_j g_i \exp\left(-\frac{E_j}{kT}\right) \sigma_{ij}(\nu). \quad (6.3)$$

После деления (6.3) на (6.2) с учетом того, что  $\sigma_{ij}(v) = \sigma_{ji}(v)$  и  $hv = E_{ZL} + E_j - E_i$  получим следующую формулу, которая и представляет собой математическое выражение метода соответствия:

$$\sigma_{\text{исп}}(v) = \sigma_{\text{погл}}(v) \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left(\frac{E_{ZL} - hv}{kT}\right). \quad (6.4)$$

На практике удобнее пользоваться не частотой, а длиной волны, тогда (6.4) запишется в виде

$$\sigma_{\text{исп}}(\lambda) = \sigma_{\text{погл}}(\lambda) \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left(\frac{E_{ZL} - hc/\lambda}{kT}\right).$$

Для анизотропных сред следует в общем случае определять три спектра сечений поглощения и соответственно три спектра сечений стимулированного испускания. Таким образом, для того чтобы определить сечения стимулированного испускания методом соответствия, нужно знать:

- в общем случае – три спектра сечений поглощения;
- структуру энергетических уровней мультиплетов;
- температуру активной среды.

При определении спектров сечений стимулированного испускания по интегральному методу соответствия нет необходимости знать структуру энергетических уровней. Расчет спектров стимулированного испускания производится на основе спектров сечений поглощения, показателя преломления, радиационного времени жизни примесного центра на верхнем мультиплете  $\tau_{\text{изл}}$ . Последнюю величину можно во многих случаях достаточно просто определить экспериментально по времени затухания люминесценции. Для анизотропных сред под величиной показателя преломления понимают среднее значение трех главных показателей преломления кристалла.

$$\sigma_{\text{исп}}^{\alpha}(v) = \frac{3c^2 \exp(-hv/(kT))}{8\pi n^2 \tau_{\text{изл}} \sum_{\beta} \int \sigma_{\text{погл}}^{\beta}(v) v^2 \exp(-hv/(kT)) dv} \sigma_{\text{погл}}^{\alpha}(v) \quad (6.5)$$

или в длинах волн

$$\sigma_{\text{исп}}^{\alpha}(\lambda) = \frac{3 \exp(-hc/(kT\lambda))}{8\pi n^2 \tau_{\text{изл}} c \sum_{\beta} \int \lambda^{-4} \sigma_{\text{погл}}^{\beta}(\lambda) \exp(-hc/(kT\lambda)) d\lambda} \sigma_{\text{погл}}^{\alpha}(\lambda), \quad (6.6)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – индексы, обозначающие поляризацию света.

Таким образом, для нахождения спектров сечений стимулированного испускания по интегральному методу соответствия необходимо знать:

- в общем случае – три спектра сечений поглощения;
- радиационное время жизни;
- показатель преломления;
- температуру активной среды.

Этим методом удобно пользоваться при исследовании характеристик новых лазерных материалов, для которых структура энергетических уровней неизвестна.

И, наконец, спектры сечений стимулированного испускания могут быть рассчитаны по спектрам люминесценции по формуле Фюхтбауэра–Ладенбурга. В зависимости от типа используемого фотоприемника спектр люминесценции регистрируется в единицах «фотон/(м·с)» либо «Вт/м», и соответственно этому спектр сечений рассчитывается по формулам:

$$\sigma_{\text{исп}}^{\alpha}(\lambda) = \frac{\lambda^4}{8\pi n^2 \tau_{\text{изл}} c} \frac{3I_{21}^{\alpha}(\lambda)}{\sum_{\beta} \int I_{21}^{\beta}(\lambda) d\lambda},$$

$$\sigma_{\text{исп}}^{\alpha}(\lambda) = \frac{\lambda^5}{8\pi n^2 \tau_{\text{изл}} c} \frac{3W_{21}^{\alpha}(\lambda)}{\sum_{\beta} \int \lambda W_{21}^{\beta}(\lambda) d\lambda}.$$

Итак, для того чтобы рассчитать спектры сечений стимулированного испускания, необходимо знать:

- в общем случае – три спектра люминесценции;
- радиационное время жизни;
- показатель преломления среды.



## 6.4. Расчетная часть

В данном разделе приводятся расчёты устойчивости лазерного резонатора или распределения электромагнитного поля в нем, расчеты концентраций ионов-активаторов и т. д.

Например, расчет резонатора лазера в исследовательской дипломной работе производится матричным ABCD-методом. Записываются матрицы, соответствующие распространению излучения через каждый из элементов резонатора, а также полная матрица обхода резонатора. На основании условия образования в резонаторе стоячей волны комплексный параметр распространения пучка в произвольной точке резонатора приравняется к самому себе после обхода резонатора. Решение этого уравнения позволяет найти комплексный параметр пучка в произвольной точке резонатора. Строится график распределения электромагнитного поля внутри резонатора, определяются размеры и положение перетяжки. После этого подбираются такие расстояния между зеркалами и радиусы кривизны зеркал, которые обеспечивают необходимые величину и положение перетяжки.

### 6.4.1. Расчёт четырёхзеркального резонатора лазера

Исходными данными для расчета являются:

- размер активного кристалла –  $t$ ;
- показатель преломления активного кристалла –  $n$ ;
- радиусы сферических зеркал –  $R_1$  и  $R_2$ ;
- размер перетяжки излучения накачки на кристалле –  $2\omega_{\text{онак}}$ ;
- длина волны генерации –  $\lambda_{\text{ген}}$ .

Необходимо рассчитать конфигурацию резонатора, показанную на рис. 6.2.

Для расчета используется ABCD-метод. При расчете ABCD-матрицы резонатора использовалась следующая эквивалентная схема (рис. 6.3).

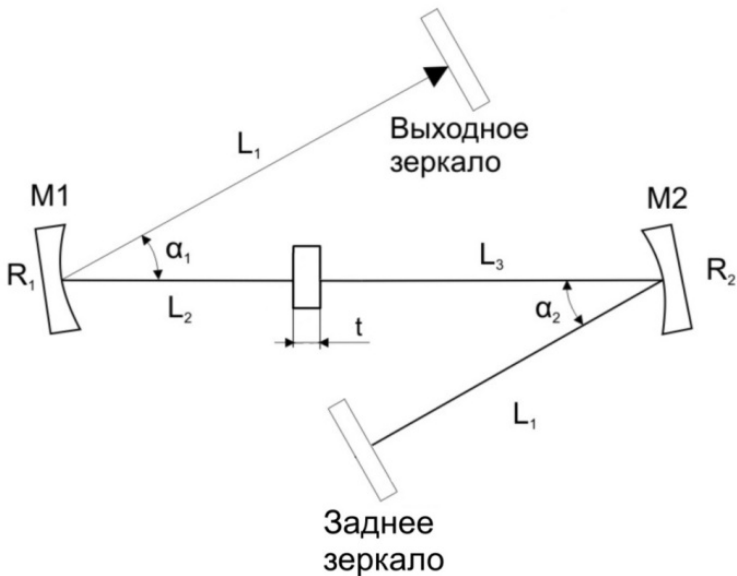


Рис. 6.2. Схема для расчёта четырёхзеркального резонатора лазера

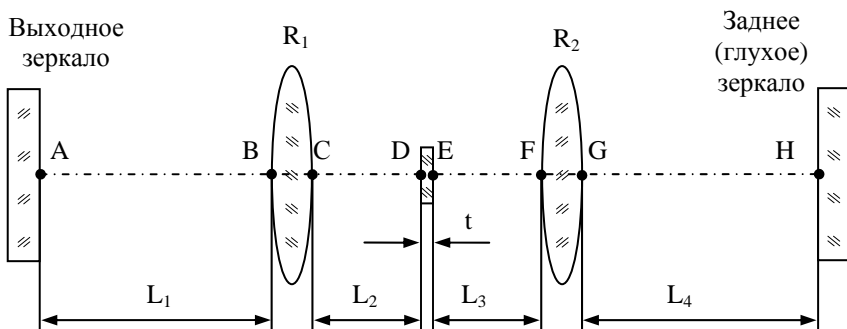


Рис. 6.3. Эквивалентная схема резонатора, используемая при расчёте

Если считать, что излучение распространяется из точки  $A$ , то матрица за полный обход резонатора принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
M' = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \frac{t}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\
&\times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{pmatrix} \times \\
&\times \begin{pmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \frac{t}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6.7)
\end{aligned}$$

Матрица произведения не приведена по причине громоздкости выражения.

Для того чтобы резонатор был устойчивым, необходимо выполнение условия

$$0 \leq \frac{A + D + 2}{4} \leq 1. \quad (6.8)$$

Расчет производится при помощи комплексного параметра пучка  $q(z)$ , имеющего связь с радиусом волнового фронта пучка  $R(z)$  и радиусом пучка  $\omega(z)$ , при помощи выражения

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - \frac{i\lambda_{\text{ген}}}{\pi\omega(z)^2}. \quad (6.9)$$

Зная величину комплексного параметра в некоторой точке  $q_1$ , можно найти параметр пучка в другой точке на пути распространения излучения  $q_2$ , используя ABCD-закон распространения гауссова пучка:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}. \quad (6.10)$$

Расчет начинается с того, что комплексный параметр пучка  $q$  в точке  $A$  до и после прохождения излучением резонатора приравниваются, причем элементы матрицы берутся из матрицы полного обхода резонатора (6.7):

$$q = \frac{A'q + B'}{C'q + D'}. \quad (6.11)$$

Решение (6.11) при  $q = q_1$  принималось за параметр пучка излучения в резонаторе в точке  $A$  и использовалось как начальное условие для дальнейшего расчета.

Для определения параметра  $q$  в точке  $B$  (см. рис. 6.3) используется известная  $ABCD$ -матрица свободного пространства длиной  $L_1$ :

$$M_{L_1} = \begin{pmatrix} A_{L_1} & B_{L_1} \\ C_{L_1} & D_{L_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6.12)$$

Таким образом, из выражений (6.10), (6.12) и решения (6.11) получается величина параметра пучка  $q = q_2$  в точке  $B$ :

$$q_2 = \frac{A_{L_1}q_1 + B_{L_1}}{C_{L_1}q_1 + D_{L_1}}. \quad (6.13)$$

Матрица отражения от сферического зеркала  $M_1$  радиусом  $R_1$  имеет следующий вид:

$$M_{M_1} = \begin{pmatrix} A_{M_1} & B_{M_1} \\ C_{M_1} & D_{M_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{pmatrix}. \quad (6.14)$$

Таким образом, с использованием вычисленной через выражение (6.13) величины  $q_2$  и выражения (6.14) получается параметр пучка  $q = q_3$  в точке  $C$ :

$$q_3 = \frac{A_{M1}q_2 + B_{M1}}{C_{M1}q_2 + D_{M1}}.$$

Аналогичным образом, используя выражение (6.10) и известные матрицы прохождения свободного пространства и отражения от сферического зеркала, вычислили параметр  $q$  в других точках резонатора:  $D - H$ .

Зная величину параметра  $q$ , из соотношения (6.9) получили зависимость для определения радиуса пучка в каждой точке:

$$\omega(z) = \sqrt{\frac{-\lambda}{\pi \cdot \operatorname{Im}\left(\frac{1}{q(z)}\right)}},$$

где  $\operatorname{Im}\left(\frac{1}{q(z)}\right)$  – мнимая часть комплексного числа  $1/q(z)$ .

Определение радиуса моды на протяжении всего резонатора осуществляется в программе «MathCAD» путём дискретизации расстояний  $L_i$  и  $t$  с некоторым шагом и вычисления параметра пучка в каждой точке.

Подбирая величины расстояний  $L_i$ ,  $I = 1-4$ , находят такие их значения, при которых выполняется условие (6.8).

#### **6.4.2. Расчёт термической линзы в активном элементе**

В процессе работы лазера активный элемент поглощает световую энергию, часть которой преобразуется в тепловую, в то время как его поверхность интенсивно охлаждается. Эти два процесса приводят к неоднородному распределению температуры в активном элементе. Конкретный вид температурного распределения зависит от типа кристаллической матрицы активного элемента, его размеров и формы, оптической схемы осветителя и мощности излучения накачки. Изменения показателя преломления имеют следующие составляющие:

- температурную;
- связанную с тепловыми напряжениями в кристалле:

$$n(r) = n_0 - \Delta n(r)_T + \Delta n(r)_\varepsilon, \quad (6.15)$$

где  $n(r)$  – показатель преломления в точке  $r$ ;

$n_0$  – показатель преломления на оси стержня;

$\Delta n(r)_T$  и  $\Delta n(r)_\varepsilon$  обусловлены температурой и тепловыми напряжениями.

Для активного элемента в виде длинного круглого стержня температурное распределение обладает радиальной симметрией и определяется как разность между показателями преломления на оси элемента и на поверхности цилиндра радиуса  $r$  ( $r \leq r_0$ ) (рис. 6.4, а):

$$\Delta n(r) = n(r) - n(0) = \frac{dn}{dT} [T(r) - T(0)],$$

где  $\frac{dn}{dT}$  – термооптический коэффициент.

Для активного элемента цилиндрической формы зависимость температуры кристалла от его центра до расстояния  $r$  меняется по параболическому закону (рис. 6.4, б):

$$T(r) = T(a) + (P_a / 4\eta V_a)(a^2 - r^2), \quad (6.16)$$

где  $T(a)$  – температура кристалла на его боковой поверхности;

$P_a$  – полная мощность тепловыделения в кристалле;

$\eta$  – теплопроводность кристалла;

$V_a$  – объём кристалла;

С учётом формулы (6.16) температурная составляющая изменения показателя преломления примет следующий вид:

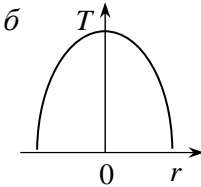
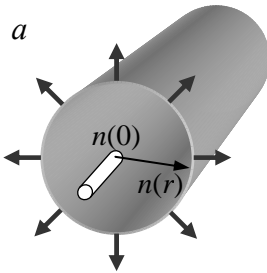


Рис. 6.4. Термическая линза: изменение показателя преломления (а); график распределения температуры (б)

$$\Delta n(r)_T = \frac{Q}{4\eta} \frac{dn}{dT} r^2.$$

Для составляющей, обусловленной тепловыми напряжениями:

$$\Delta n(r)_\varepsilon = -\frac{1}{2} \frac{Q}{\eta} n_0^3 \alpha C_{r,\varphi} r^2,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения;

$C_{r,\varphi}$  – коэффициент фотоупругости.

Согласно формуле (6.15) получается следующее выражение:

$$n(r) = n_0 \left[ 1 - \frac{Q}{2\eta} \left( \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\varphi} \right) r^2 \right]. \quad (6.17)$$

Квадратичная зависимость  $n$  от радиуса эквивалентна сферической линзе, для которой  $n$  меняется по закону

$$n(r) = n_0 \left[ 1 - \frac{2r^2}{q^2} \right]. \quad (6.18)$$

Фокусное расстояние такой линзы определяется выражением

$$f \cong \frac{q^2}{4n_0 l}. \quad (6.19)$$

Сравнивая выражения (6.17) и (6.18), получаем выражение для фокусного расстояния:

$$f' = \frac{\eta}{Ql} \left( \frac{1}{2n} \frac{dn}{dT} + n_0^3 \alpha C_{r,\varphi} \right)^{-1}.$$

Фокусное расстояние  $f'$  отсчитывается от торца стержня.

Вклад в образование термической линзы вносит также удлинение стержня с ростом температуры  $T$ , которое нужно учитывать только для концевых участков стержня. Удлинение стержня по сечению активного элемента различно и зависит от расстояния  $r$  от оси:

$$l(r) = \alpha l_0 (T(r) - T(0)),$$

где  $l_0$  – длина концевого участка стержня.

Для  $l_0 = a$  (Nd : YAG) удлинение стержня вычисляется по следующему соотношению:

$$l(r) = -\alpha a \frac{Qr^2}{4\eta}.$$

Фокусное расстояние, обусловленное неравномерным удлинением, определяется выражением для толстой линзы:

$$f'' = \frac{R}{2(n_0 - 1)}, \quad (6.20)$$

где  $R$  – радиус кривизны торца стержня:

$$R = -\left(\frac{d^2 l}{dr^2}\right)^{-1} = \frac{2\eta}{\alpha Q a}. \quad (6.21)$$

При подстановке выражения (6.21) в (6.20) формула для вычисления фокусного расстояния примет следующий вид:

$$f'' = \frac{\eta}{\alpha Q a (n_0 - 1)}.$$



Для суммарного действия всех трёх факторов (температуры, тепловых механических напряжений и удлинения концов стержня) фокусное расстояние составляет

$$f = \frac{\eta A}{P_a} \left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\varphi} n_0^3 + \frac{\alpha a (n_0 - 1)}{l} \right)^{-1}, \quad (6.22)$$

где  $A$  – поперечное сечение стержня;

$P_a$  – мощность тепловыделения в активном элементе.

Вклад различных факторов для Nd:YAG:

–  $\frac{dn}{dT}$  – даёт основной вклад – около 70 %;

– тепловые напряжения – около 24 %;

– удлинение – около 6 %.

## 6.5. Результаты исследований и вычислений

В данном разделе излагаются результаты проведенных в рамках дипломной работы исследований и вычислений. При описании собственного исследования студент должен выделить то новое, что он вносит в разработку проблемы (задачи) или развитие конкретных направлений в соответствующей отрасли науки. Студент должен оценить достоверность полученных результатов, сравнить их с аналогичными результатами отечественных и иностранных исследователей. В данном разделе следует избегать общих слов и рассуждений, бездоказательных утверждений. Результаты исследований необходимо излагать сжато, логично и аргументированно.

В случае когда темой дипломной работы является разработка нового лазерного материала, в данном разделе, как правило, приводят оптические спектры этого материала, значения времени жизни возбужденных состояний, кривые насыщения поглощения (для пассивных затворов), результаты экспериментов по получению лазерной генерации.

К результатам лазерных экспериментов обычно относятся:

для непрерывного режима генерации – зависимость выходной мощности лазера от поглощенной либо падающей мощности излучения накачки и спектр излучения лазера;

режима модуляции добротности – зависимости средней выходной мощности генерации, энергии и частоты следования лазерных импульсов от мощности накачки, осциллограмма одиночного импульса и последовательности лазерных импульсов;

режима пассивной синхронизации мод – автокорреляционная функция, спектр излучения лазера и осциллограмма последовательности лазерных импульсов. Кроме того, основные параметры генерации необходимо представить в виде сводной таблицы.

### **6.5.1. Результаты вычислений спектров сечений поглощения и стимулированного испускания**

Рассмотрим пример расчёта спектров сечений поглощения и стимулированного испускания кристалла Yb (1,62 %):YVO<sub>4</sub>. Методика расчёта подробно описана в п. 6.3.

Измеренные спектры поглощения для  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций кристалла Yb : YVO<sub>4</sub> представлены на рис. 6.5.

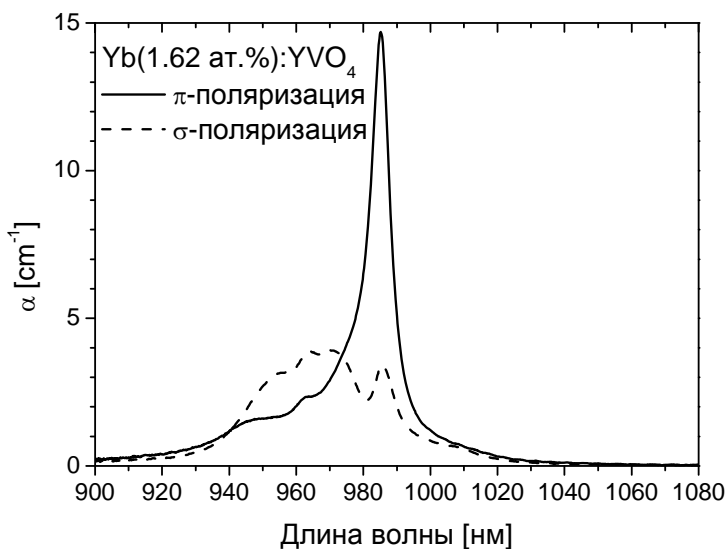


Рис. 6.5. Поляризованные спектры поглощения кристалла Yb : YVO<sub>4</sub>

Для вычисления спектра сечения поглощения необходимо рассчитать концентрацию ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в кристалле  $\text{YVO}_4$ . Она определяется по формуле

$$n = \frac{\text{at \%}}{100} \cdot \frac{\rho \cdot N_A}{\mu_{CR}},$$

где *at %* – содержание Yb в кристалле  $\text{YVO}_4$ , %;

$\rho$  – плотность кристаллической матрицы,  $\text{г/см}^3$ ;

$N_A$  – число Авогадро:  $N_A = 6,02214129(27) \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ ;

$\mu_{CR}$  – молярная масса кристаллической матрицы.

Концентрация ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в кристалле составляет  $2 \cdot 10^{20}$   $\text{см}^{-3}$ .

С помощью выражения (6.1) вычисляется спектр сечения поглощения кристалла Yb (1,62 %): $\text{YVO}_4$  для  $\pi$  (E||c) и  $\sigma$  (E⊥c) поляризаций (рис. 6.6). На длине волны 985,4 нм для  $\pi$ -поляризации сечение поглощения составило  $7,4 \cdot 10^{-20}$   $\text{см}^2$ .

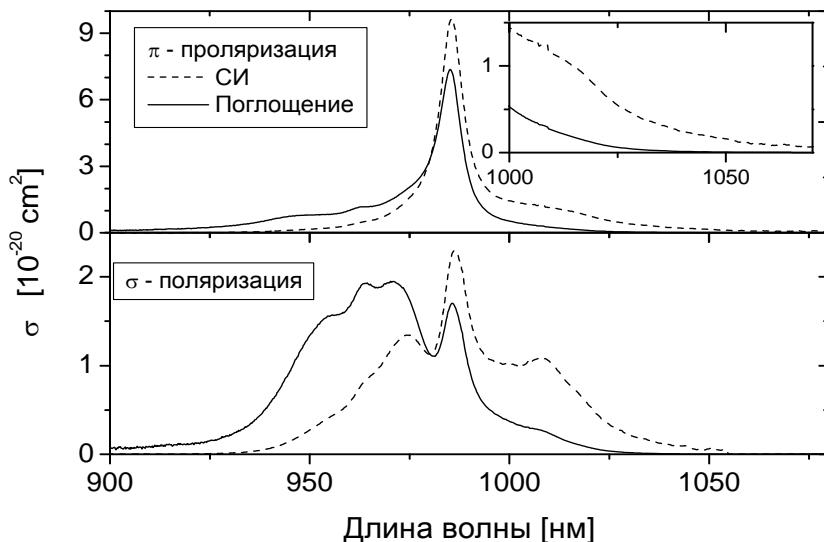


Рис. 6.6. Спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания кристалла Yb:  $\text{YVO}_4$ ; СИ – стимулированное (вынужденное) испускание

По соотношению (6.6) вычисляется спектр сечения стимулированного испускания (вынужденного излучения), также представленный на рис. 6.6. На длине волны 1008 нм для  $\pi$ - и  $\sigma$ - поляризаций значения сечений стимулированного испускания соответственно равны  $1,25 \cdot 10^{-20}$  и  $1,1 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup>.

Как видно из рис. 6.6, наиболее предпочтительной для получения лазерной генерации ориентацией активного кристалла является такая, которая соответствует  $\pi$ -поляризации.

### ***6.5.2. Результаты расчёта четырёхзеркального резонатора лазера***

Рассмотрим пример выполнения расчёта четырёхзеркального резонатора лазера, схема которого приведена на рис. 6.2. Методика расчёта подробно описана в п. 6.4.1. Расчет резонатора проводится на РС в компьютерной программе «MathCAD».

Путем подбора определяются расстояния между элементами резонатора, значения которых удовлетворяют выражению (6.8). Эти расстояния составляют (см. рис. 6.3):  $L_1 = 115$  мм,  $L_2 = 51,5$  мм,  $L_3 = 51,5$  мм,  $L_4 = 115$  мм.

Тогда длина резонатора в целом

$$L = L_1 + L_2 + t + L_3 + L_4 + tn = 335,5 \text{ мм.}$$

При этом матрица полного обхода резонатора (6.7) следующая:

$$M = \begin{pmatrix} 0,62 & 0,22 \\ -2,79 & 0,62 \end{pmatrix}.$$

Соотношение (6.8) для данной матрицы имеет вид

$$\frac{A + D + 2}{4} = 0,81,$$

что свидетельствует об устойчивости резонатора.

График зависимости радиуса лазерного пучка от положения в резонаторе представлен на рис. 6.7.

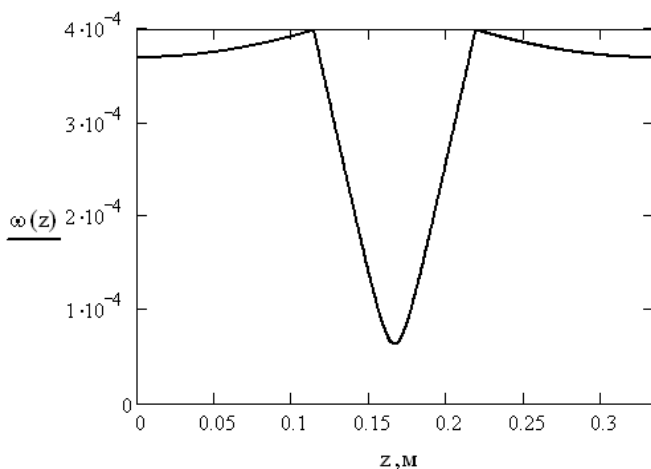


Рис. 6.7. График зависимости радиуса лазерного пучка от положения в резонаторе

Для расчета лазерных резонаторов различных типов (обычных, кольцевых и т. п.), а также однопроходных оптических систем (например, трактов накачки) в настоящее время разработана целая группа программ, например: «reZonator 1.6.0 (278)» [49], «WinLase Professional 4.3.6.10» [50].

Большинство из указанных программ поддерживают все основные оптические элементы – линзы, сферические зеркала, кристаллы, расстояния между ними позволяют создать произвольную оптическую систему из предлагаемого набора элементов, поддерживают вычисление диаграммы устойчивости в зависимости от значения одного или двух параметров (одномерная и двумерная диаграмма), задание произвольного количества линий уровня для двумерного графика, вычисление границ областей устойчивости системы. Построение каустики (графиков размера пучка и радиуса кривизны волнового фронта) по одному или нескольким элементам, обеспечивает возможность вычисления размера пучка в любой точке системы, вычисление характерных точек каустики – размер перетяжки, конфокальный параметр и т. п. и другие функции анализа резонато-

ра. При этом программы автоматически генерируют наглядное изображение оптической системы (эскиз). Рассмотрим на примере программы reZonator 1.5.0 (рис. 6.8–6.12).



Рис. 6.8. Калькулятор пучка

Исходные параметры:

$\lambda$  – длина волны излучения;

$W_0$  – радиус перетяжки;

$Z_0$  – конфокальный параметр;

$V_s$  – угол расходимости в дальней зоне;

$M^2$  – показатель качества пучка (параметр расходимости);

$Z$  – расстояние от перетяжки до точки, в которой вычисляется/задается волновой фронт;

$W$  – радиус пучка на расстоянии  $Z$  от перетяжки;

$R$  – радиус кривизны волнового фронта пучка на расстоянии  $Z$  от перетяжки;

$Re(q)$ ,  $Im(q)$  – реальная и мнимая части комплексного параметра кривизны пучка на расстоянии  $Z$  от перетяжки;

$Re(1/q)$ ,  $Im(1/q)$  – реальная и мнимая части обратного комплексного параметра кривизны пучка на расстоянии  $Z$  от перетяжки.

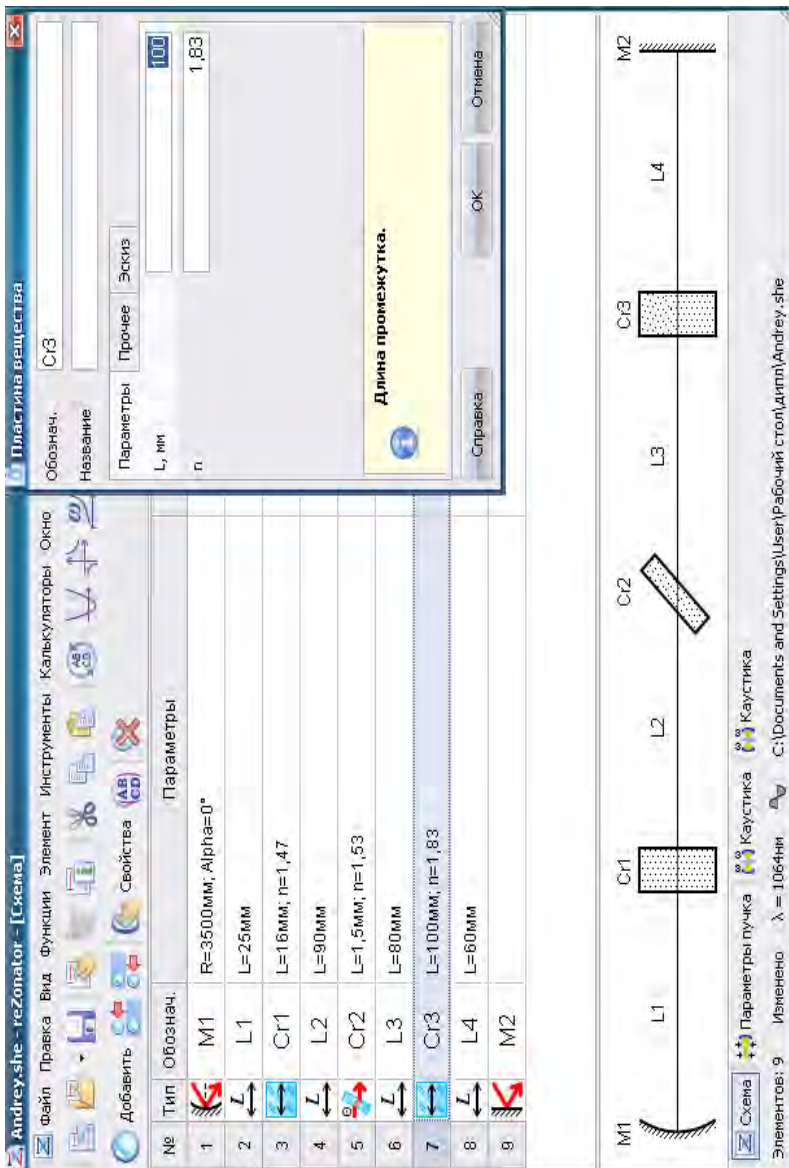


Рис. 6.9. Окно ввода параметров системы

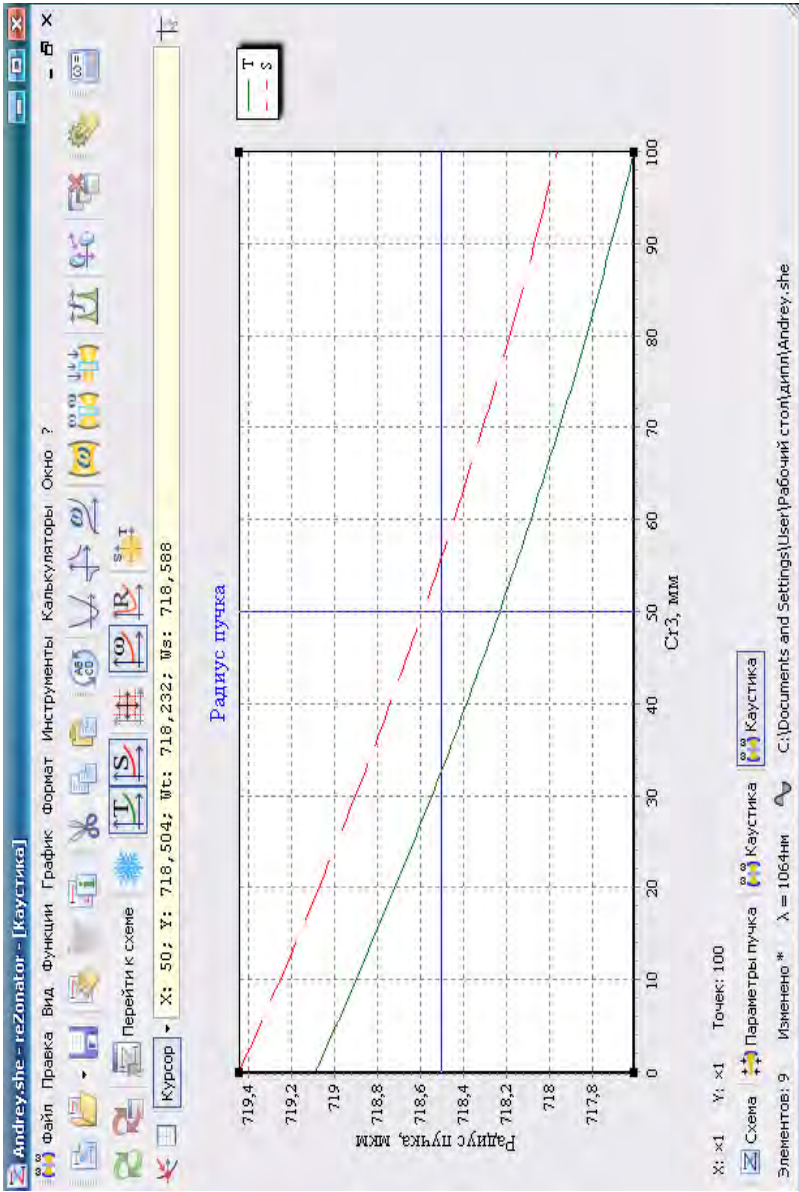


Рис. 6.10. Размер пучка по активному элементу



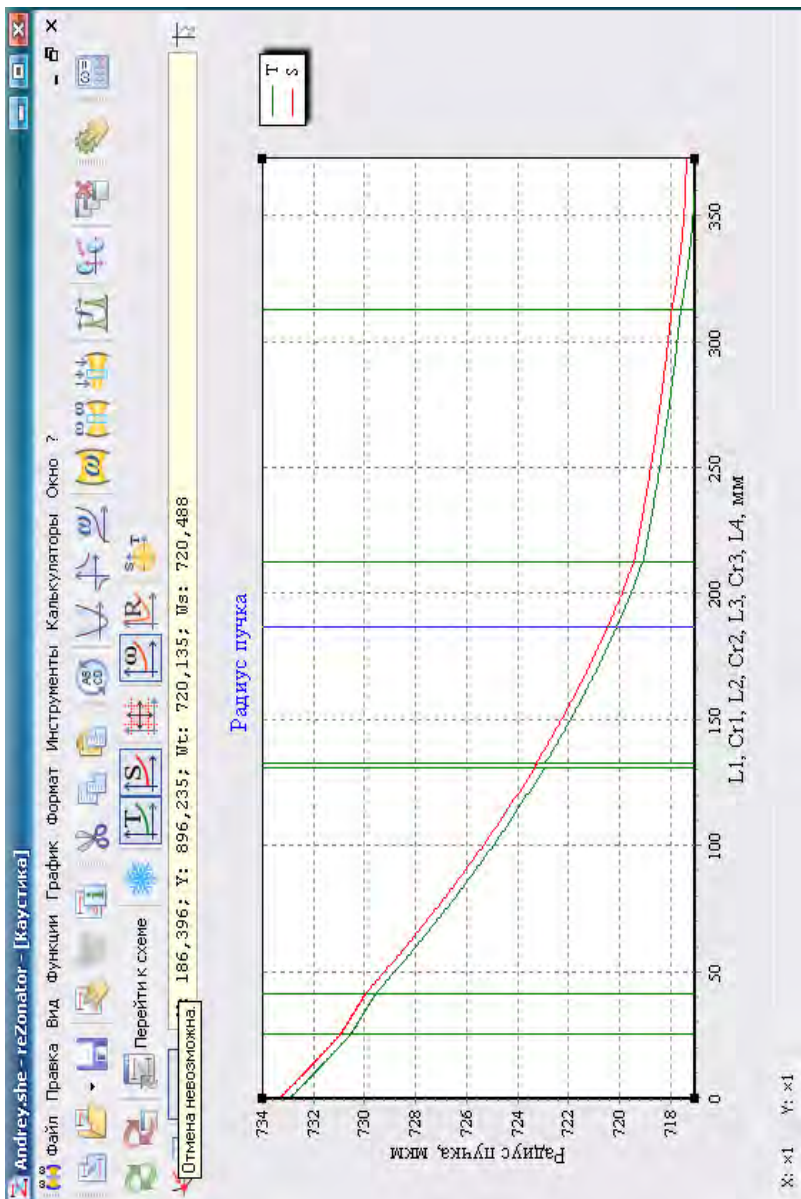


Рис. 6.11. Каустика лазерного излучения в генераторе

Andrey.she - rezonator - [Параметры пучка]

Перейти к схеме

	$Wt \times Ws$ , мм	$Rt \times Rs$ , мм	$Vt \times Vs$
M1	732,904 x 733,304	-7500 x -7500	0,027° x 0,027°
C11	730,553 x 730,951	-8081,272 x -8079,844	0,027° x 0,027°
C11	730,553 x 730,951	-11879,469 x -11877,371	0,018° x 0,018°
C11	729,586 x 729,984	-12300,313 x -12297,072	0,018° x 0,018°
C11	729,586 x 729,984	-8367,56 x -8365,355	0,027° x 0,027°
C12	722,947 x 723,336	-12005,131 x -11988,833	0,027° x 0,027°
C12	1106,109 x 723,336	-42997,3 x -18342,914	0,012° x 0,018°
C12	1106,063 x 723,266	-43104,236 x -18449,693	0,012° x 0,018°
C12	722,917 x 723,266	-12034,988 x -12058,623	0,027° x 0,027°
C13	719,089 x 719,443	-20217,267 x -20257,395	0,027° x 0,027°
C13	719,089 x 719,443	-36997,598 x -37071,033	0,015° x 0,015°
C13	717,607 x 717,964	-70401,969 x -70542,284	0,015° x 0,015°
C13	717,607 x 717,964	-38471,021 x -38547,696	0,027° x 0,027°
M2	717,047 x 717,405	inf x inf	0,027° x 0,027°

Рис. 6.12. Параметры пучка на элементах:  $Wt \times Ws$  – радиусы пучка на элементе;  $Rt \times Rs$  – радиус кривизны волнового фронта пучка на элементе;  $Vt \times Vs$  – половина асимптотического угла расходимости в дальней зоне

### 6.5.3. Результаты расчёта термической линзы кристалла

Рассмотрим пример выполнения расчёта термической линзы в кристалле  $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ . Расчёт производится согласно методике, описанной в п. 6.4.2. Для проведения данных расчетов необходимо знать основные характеристики активной среды, которые приведены в табл. 6.1 [51].

Таблица 6.1

Свойства кристалла алюмоиттриевого граната с неодимом

Наименование параметра	Численное значение
Теплопроводность $\eta$ , Вт/м·К	13
Показатель преломления $n_a$	1,82
Коэффициент термического расширения $\frac{\partial l}{\partial T} \cdot 10^{-6}$ , $\text{K}^{-1}$	6,96
Температурное изменение показателя преломления $\frac{\partial n}{\partial T} \cdot 10^{-6}$ , $\text{K}^{-1}$	9,86
Коэффициенты фотоупругости	$C_r = 0,017$ $C_o = -0,0025$
Длина, см	11
Диаметр, см	0,8

Средняя электрическая мощность, потребляемая лампой накачки, составляет  $P_{EL}^{cp} = 50\text{--}2500$  Вт. Полная мощность тепловыделения в кристалле

$$P_a = P_{EL}^{cp} \cdot \eta, \quad (6.23)$$

где  $\eta$  – коэффициент, который определяет, какая часть мощности, потребляемой лампой накачки, выделится в виде тепла в активном элементе (для  $\text{Nd}:\text{YAG}$   $\eta = 5\%$ ).

Полная мощность тепловыделения при работе лазера, согласно (6.23) изменяется в пределах  $P_a = 2,5\text{--}125$  Вт.

В соответствии с выражением (6.22) строятся зависимости оптической силы термической линзы  $D = 1/f$  от полной мощности тепловыделения в кристалле  $P_a$  для двух поляризаций падающего излучения (радиальной и тангенциальной компонент) (рис. 6.13).

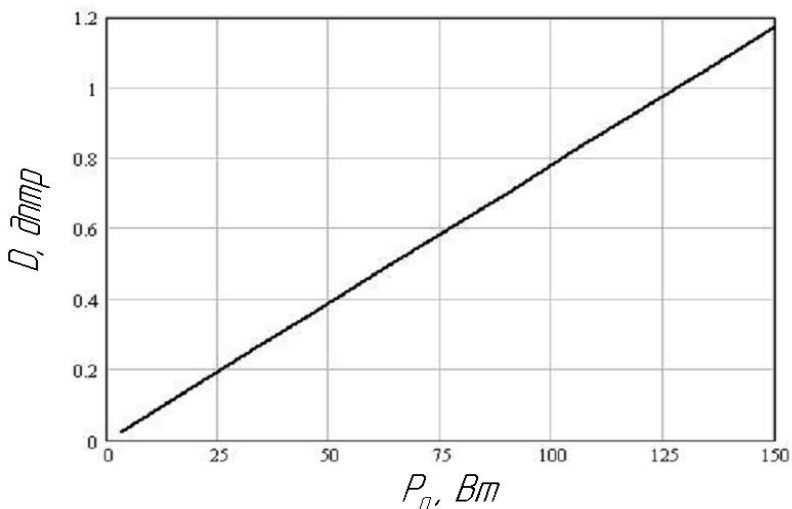


Рис. 6.13. Зависимость оптической силы термической линзы от полной мощности тепловыделения в кристалле Nd : YAG для двух поляризаций

Основной вклад в тепловую линзу кристалла Nd : YAG дает температурное изменение коэффициента преломления.

В данном диапазоне изменения мощности накачки оптическая сила термической линзы изменяется в пределах  $D = 0,04\text{--}1,2$  дптр. Можно сделать вывод, что это незначительная величина и термическая линза не будет оказывать существенного влияния на работу лазера.

Рассмотренные выше результаты исследований по указанной тематике могут быть представлены в виде графического материала, например, следующим образом:

**Плакат 1. Непрерывный эрбиевый лазер, излучающий в области 1,5–1,6 мкм** (цель работы; классификация лазерных источников; область применения).

**Плакат 2. Лазеры на ионах  $\text{Er}^{3+}$**  (схемы уровней и перенос энергии между ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ ; сравнительная таблица свойств стёкол и кристаллов активных элементов, легированных  $\text{Er}^{3+}$ : время жизни, выходная мощность, КПД, теплопроводность и т. п.).

**Плакат 3. Спектры поперечных сечений поглощения и вынужденного излучения кристалла  $\text{Er, Yb:YAl}_3(\text{BO}_3)_4$**  (графики зависимости  $\sigma_{\text{изл}}$  от длины волны для  $\sigma$  и  $\pi$ -поляризации; формула для расчёта спектра вынужденного излучения).

**Плакат 4. Кинетические измерения в кристаллах  $\text{YAB}$ , легированных ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$**  (расчётные формулы и график зависимости интенсивности люминесценции от времени).

**Плакат 5. Расчётная часть** (оптическая схема экспериментальной установки; матрица обхода резонатора; график размеров моды резонатора, таблица геометрических параметров  $L_i, R_i$ ).

**Плакат 6. Выходные характеристики  $\text{Er, Yb:YAB}$  лазера** (графики зависимости  $P_{\text{вых}}$  от  $P_{\text{погл}}$  для непрерывного CW и квазинепрерывного QCW режимов генерации; фотография макета, таблица с результатами экспериментов:  $\lambda_{\text{ген}}, P_{\text{пор. погл}}, \eta_{\text{дифф}}, \eta_{\text{опт}}, P_{\text{вых макс}}$ ).

## 6.6. Проектирование многослойного интерференционного покрытия

Современные многослойные тонкопленочные системы, нанесённые на преломляющие и отражающие грани оптических элементов, позволяют формировать требуемые спектральные кривые общего пропускания или отражения, которые могут быть получены благодаря уникальным свойствам интерференционных систем. Незначительная масса и относительная простота реализации (например, путём термического или электронно-лучевого испарения вещества в вакууме) позволяют широко применять интерференционные покрытия в оптической промышленности.

В зависимости от конструкции многослойного интерференционного покрытия и его рабочего оптического диапазона для создания слоев выбираются самые различные материалы и методы их нане-

сения. Специфика работы будущего покрытия и методы его формирования обуславливают ряд требований, предъявляемых к физико-механическим свойствам оптических пленочных материалов: *прозрачность; оптимальный показатель преломления; оптическая однородность; относительная плотность; высокие адгезия и твердость, низкие механические напряжения; высокие эксплуатационные химические свойства (растворимость, реактивность); стабильность поведения в условиях среды эксплуатации.*

### **6.6.1. Объекты и аппаратура для испытаний покрытий**

Объектом испытаний являются опытные и серийно производимые оптические детали с диэлектрическими покрытиями. Основными нормативными документами, определяющими методику измерений, средства контроля и порядок аттестации оптических деталей на лазерную прочность и стойкость соответственно, являются два международных стандарта ISO [52, 53].

Для контроля оптических деталей допускается использовать образцы-свидетели при выполнении следующих условий:

- контролируемая деталь и свидетель изготовлены из одного материала и имеют одинаковое качество обработки поверхности;
- покрытие на деталь и образец-свидетель наносилось в одном технологическом процессе;
- образец-свидетель и оптическая деталь хранились в одинаковых условиях.

В нашем случае, например, в качестве образцов-свидетелей использовались детали размером  $\varnothing 20 \times 4$  мм из стекла марки К8 (две штуки) и кристалл  $\text{SiO}_2$  (одна штука).

Для аттестации оптических покрытий на лучевую стойкость и прочность в качестве излучателя использовался многоволновой лазерный комплекс «LOTIS ТП» Laser LS-2132 У, содержащий следующие составные части:

- блок излучателя LH-2204У ЛОТ 3.000М;
- блок питания PS-2225 ЛОТ 2.087.018;
- систему охлаждения СР-1115 ЛОТ 18.500;
- пульт дистанционного управления RC-5 ЛОТ 5.139.023.

Основные технические характеристики указанного лазерного комплекса приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Технические характеристики лазерного комплекса LS-2132 У

Наименование параметра	Численное значение
Длина волны генерируемого излучения, нм	1064; 532
Энергия импульса излучения (на длине волны), мДж	От 180 (1064 нм) От 100 (532 нм)
Частота повторения импульсов, Гц	До 15
Длительность импульса по уровню 0,5 $\tau_{0,5}$ , нс	До 15
Диаметр пучка лазерного излучения, мм	До 5
Энергетическая расходимость лазерного излучения по уровню 0,5 $\Theta_{0,86}$ , мрад	До 2,5
Электрическая энергия импульса накачки $E_{п}$ , Дж	До 35
Средняя мощность накачки, Вт	До 500
Потребляемая лазером мощность, Вт	До 750
Поляризация	Линейная (плоскость поляризации ВГ горизонтальная)

В качестве приёмника использовался измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н, основные технические характеристики которого приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Технические характеристики измерителя ИМО-2Н

Наименование параметра	Численное значение
1	2
Диапазон измерения средней мощности, Вт	0,0003–1
Диапазон измерения энергии импульсов, Дж	0,003–10
Спектральный диапазон работы, мкм	0,4–10,6
Диапазон диаметров пучка измеряемого лазерного излучения, мм	4–12

1	2
Время установления рабочего режима, мин	20
Минимальный интервал времени между измерениями, мин	5
Источник питания, В (Гц)	220 (50)
Габаритные размеры (Д × Ш × В), мм блока регистрации головки измерительной	385 × 250 × 140 140 × 184 × 315
Масса, не более, кг	20

### **6.6.2. Проведение измерений лазерной прочности и стойкости покрытий**

Измерение **лазерной прочности** проводят в следующем порядке:

1. Оптическая деталь закрепляется на координатном столике так, чтобы фокус линзы (фокусирующей системы) находился на испытуемой поверхности детали.

2. Произвольно выбранная точка на поверхности детали подвергается однократному воздействию лазерного излучения. Меняя плотность энергии лазерного излучения с шагом 10–20 % от максимального значения плотности энергии, с помощью нейтральных фильтров определяют зависимость вероятности повреждения детали при данной энергии импульса. Для каждого уровня энергии производят испытания не менее 10 точек. За критерий повреждения принимают появление высокотемпературного свечения или необратимых изменений поверхности покрытия детали, наблюдаемых невооруженным взглядом. Искру высокотемпературного свечения наблюдают визуально или с помощью запоминающего осциллографа.

3. Перемещение детали проводят в плоскости, перпендикулярной лазерному лучу, на расстояние, превышающее удвоенный диаметр пучка лазерного излучения.

Измерение **лазерной стойкости** осуществляется в следующей последовательности:

1. Определяется порог повреждения.

2. Многократно облучают участок поверхности детали и определяют, на каком импульсе происходит повреждение поверхности покрытия детали. Плотность энергии (мощности) должна быть на 10 % ниже порога повреждения.



3. С помощью ослабителей энергии постепенно уменьшают плотность энергии (мощность) лазерного излучения с шагом не менее 10 % и, фиксируя число импульсов, получают зависимость порога повреждения от числа импульсов воздействия.

### ***6.6.3. Обработка результатов измерений***

1. Лазерная прочность в соответствии с ISO/DIS 11254-1/2-1 определяется порогом повреждения, который вычисляется путем линейной экстраполяции зависимости вероятности повреждения от плотности энергии (мощности) лазерного импульса к значению вероятности, равному 0.

Значение лазерной прочности обычно указывают с длительностью импульса, диаметром пучка лазерного излучения и длиной волны.

2. Статистически подтвержденное значение лазерной стойкости определяют по графикам кривых, характеризующих зависимость порога повреждения от числа импульсов.

### ***6.6.4. Создание покрытий с высокой лучевой прочностью***

С появлением мощных лазерных систем, способных генерировать импульсы высокой и сверхвысокой мощности, появилась актуальная проблема создания диэлектрических покрытий, способных выдерживать экстремальные концентрации энергии. Проектирование таких диэлектрических покрытий требует решения следующих задач:

1. Выбор наилучших материалов покрытий.

2. Обеспечение высокого качества подготовки поверхности подложки.

3. Применение оптимальной технологии нанесения, обеспечивающей получение бездефектного непоглощающего покрытия.

В свою очередь, технология изготовления таких диэлектрических покрытий – это сложный физико-химический процесс, функционирование которого определяется многими факторами:

1) давлением остаточных газов в вакуумной камере;

2) температурой подложки;

3) скоростью нанесения слоя;

4) качеством пленкообразующих материалов.

Первые три условия зависят от качества работы вакуумного оборудования, и при достаточной стабильности работы этого оборудования (например, в условиях промышленного производства) на первое место выходит фактор состава и качества пленкообразующих материалов.

Ведущее место среди веществ, используемых в тонкопленочной технологии, занимают оксиды металлов, так как они не поглощают излучение в широком спектральном диапазоне, обладают высоким показателем преломления, имеют высокую лучевую прочность, повышенную адгезию к подложке, значительную механическую и химическую стойкость. Как показывают проведенные исследования, наибольшей лучевой прочностью обладают покрытия на основе систем из  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ .

На рис. 6.14 представлены графики изменения значения коэффициента отражения диэлектрического зеркала для  $\lambda_0 = 632 \text{ нм}$  при угле падения  $45^\circ$ .

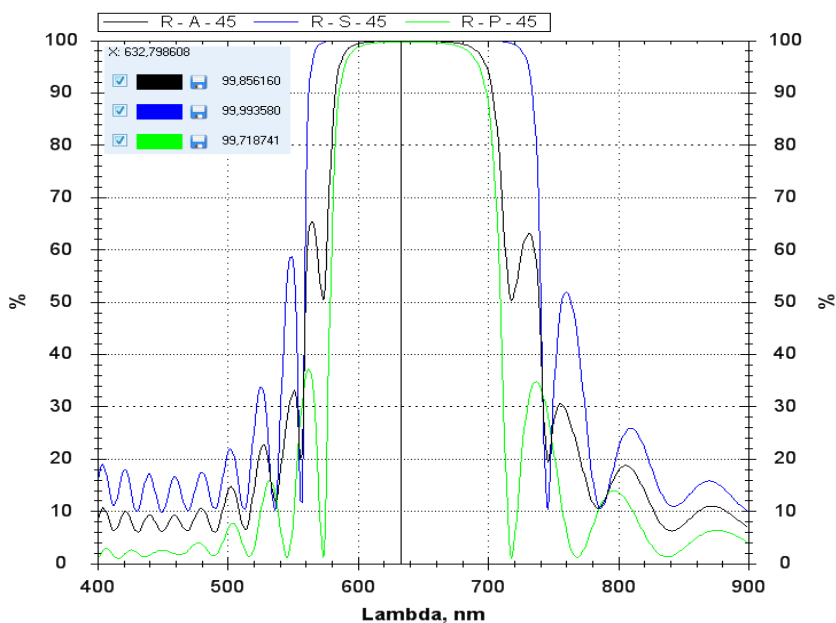


Рис. 6.14. Графики зависимости коэффициента отражения от длины волны для первого варианта зеркала

Покрытие состоит из нечетного числа чередующихся слоев оксида циркония и оксида кремния. Последний слой оксида кремния имеет двойную толщину и несет защитную функцию для всего покрытия в целом. Вследствие относительной малости коэффициента преломления  $ZrO_2$ , при общем числе слоев покрытия  $m = 25$  коэффициент отражения  $R = 99,8 \%$ . На рис. 6.15 приведен скриншот компьютерной программы, иллюстрирующий конструктивные параметры спроектированного покрытия.

Слой					
#	Физическая толщина нм	Оптическая толщина	QWDT	Материал	n
1	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
2	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
3	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
4	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
5	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
6	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
7	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
8	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
9	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
10	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
11	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
12	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
13	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
14	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
15	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
16	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
17	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
18	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
19	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
20	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
21	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
22	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
23	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
24	118,403248	175	1	L	(1,478, 1E-06)
25	84,223698	175	1	Zg	(2,0778, 0)
26	236,806495	350	2	L	(1,478, 1E-06)

Рис. 6.15. Первый вариант конструкции зеркала для длины волны 632 нм

Применение лазерного зеркала с чередующимися слоями диэлектрика переменной толщины позволяет повысить лучевую стойкость лазерного зеркала за счет улучшения теплового режима работы отражающего многослойного диэлектрического покрытия.

На рис. 6.16 показан график изменения коэффициента отражения зеркала, в котором три первых слоя оксида кремния выполнены с толщиной  $5\lambda/4$ , а три последующих слоя – с толщиной  $3\lambda/4$ .

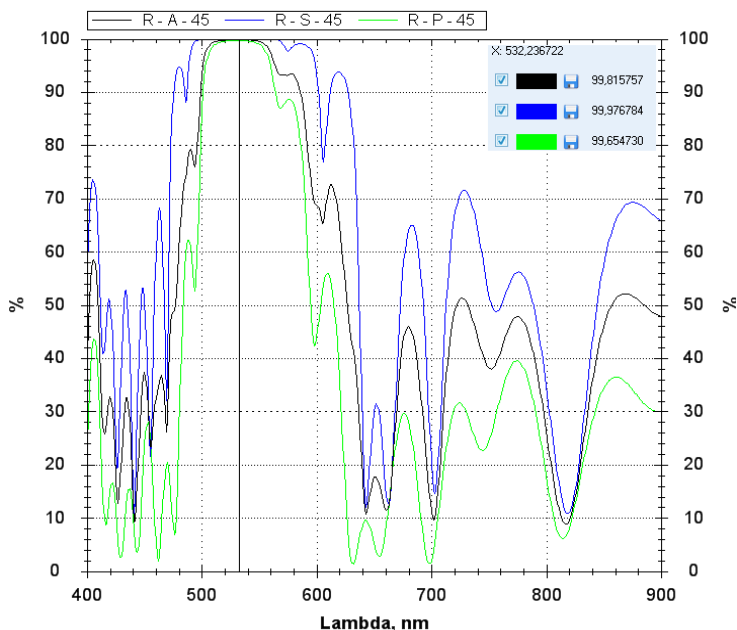


Рис. 6.16. Графики зависимости коэффициента отражения от длины волны для второго варианта зеркала

### 6.6.5. Технологический процесс получения зеркала

Технологический процесс получения интерференционного диэлектрического зеркала включает в себя следующие операции:

1. Предварительная очистка деталей.
2. Окончательная очистка деталей.
3. Установка деталей в приспособление для напыления.
4. Загрузка деталей в вакуумную камеру.
5. Выставление технологических параметров оборудования.
6. Откачка воздуха из вакуумной камеры до давления  $5 \cdot 10^{-3}$  Па.
7. Включение привода вращения подложек.

8. Нагрев вакуумной камеры до температуры  $T = 250$  °С.
9. Ионная очистка поверхности деталей.
10. Напыление интерференционного покрытия.
11. Охлаждение вакуумной камеры до температуры  $T = 80$  °С.
12. Напуск воздуха в вакуумную камеру.
13. Демонтаж приспособления с деталями из вакуумной камеры.
14. Извлечение деталей.
15. Контроль оптических характеристик полученных покрытий.

### **6.6.6. Оценка качества поверхности подложек**

Коэффициент рассеяния, влияющий на качество получаемого зеркального покрытия, зависит от шероховатости поверхности подложки перед напылением, дефектов и загрязнений внутри пленки, механических напряжений формируемого покрытия.

В свою очередь, шероховатость поверхности подложки зависит от выбранной технологии полирования рабочих поверхностей подложек из стекла К8. На рис. 6.17 показаны топограммы поверхностей подложек, полученные с помощью атомного силового микроскопа модели NT-MDT [54] и обработанные посредством сопутствующего программного обеспечения «Nova» [55].

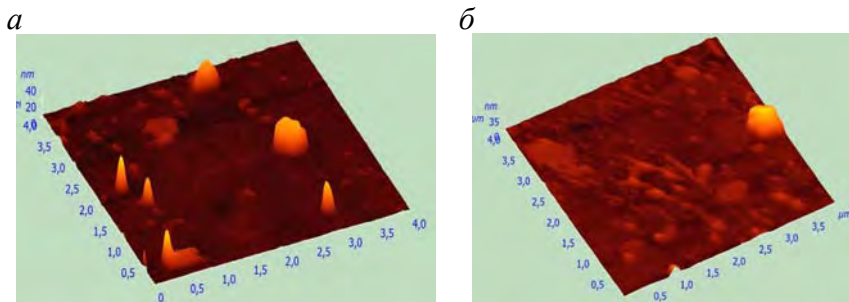


Рис. 6.17. Топограммы рабочей поверхности подложки из стекла К8: образец № 1 (а) и образец № 2 (б)

В табл. 6.4 приведены некоторые макрогеометрические параметры, рассчитанные на основе полученных выше данных.

Таблица 6.4

Параметры шероховатости подложки

Показатель	Подложка (max/min)	
$S_y$ – размах высот, нм	41,07	37,67
$S_a$ – средняя арифметическая шероховатость, нм	1,43	1,26
$S_q$ – средняя квадратическая шероховатость, нм	3,37	3,00

**6.6.7. Измерение параметров рассеяния и лазерной прочности зеркал**

В табл. 6.5 приведены результаты исследования рассеяния полуженных зеркал для двух длин волн.

Таблица 6.5

Рассеяние зеркал

Зеркало	Коэффициент пропускания $T$ , %	Коэффициент интегрального рассеяния $\sigma \cdot 10^{-3}$	Поглощение на зеркале
$\lambda = 700$ нм	0,013	0,122–0,184	0,02
$\lambda = 600$ нм	0,01	0,105–0,135	0,02

Измерения показали, что рассеяние зеркал превышает допустимое значение рассеяния  $\sigma = 0,1 \cdot 10^{-3}$ , однако результаты, полученные на зеркале  $\lambda_0 = 600$  нм, близки к заявленным. Это объясняется низкой дефектностью полученного покрытия.

Измерения порога лазерного разрушения проводились на измерительном стенде, собранном в НИЦ ОМТ БНТУ, внешний вид которого показан на рис. 6.18.

Стенд состоит из источника излучения – Nd:YAG-лазера 1, генерирующего излучение на длине волны 532 нм. Режимы работы и исходные технологические параметры лазера задаются с помощью пульта управления 2. Параллельный лазерный пучок попадает на юстировочную стойку с собирающей линзой 3 и далее фокусируется на рабочей поверхности исследуемого образца, установленного на координатном столике 4. Прошедшее через образец излучение попадает на приёмную площадку измерительной головки 6 ИМО-2Н и далее поступает в блок регистрации 5 ИМО-2Н.

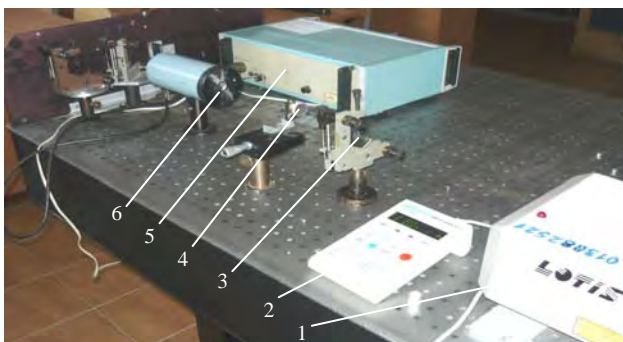


Рис. 6.18. Внешний вид измерительного стенда:

1 – лазер LS-2132 У; 2 – пульт управления лазером; 3 – стойка юстировочная с фокусирующей линзой; 4 – координатный столик с исследуемым образцом; 5 – блок регистрации ИМО-2Н; 6 – головка измерительная ИМО-2Н

Полученный с измерителя ИМО-2Н выходной сигнал поступает на персональный компьютер (на рис. 6.18 не показан), на котором осуществляется его дальнейшая обработка и анализ результатов измерений.

Результаты измерений сведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

#### Результаты измерений на лазерную прочность

Образцы	Порог лазерного разрушения	Примечание
$\lambda = 700$ нм, подложка К8	1 Дж/см <sup>2</sup>	Измерение только при угле падения излучения 0°
$\lambda = 600$ нм, подложка К8	1 Дж/см <sup>2</sup>	При падении излучения под углом 45° наблюдалось повышение порога лазерного разрушения до 1,5 Дж/см <sup>2</sup>
$\lambda = 600$ нм, подложка SiO <sub>2</sub>	1,8 Дж/см <sup>2</sup>	Измерение проводилось только для угла 45°

На установке ВТО «Ортус-700» (ООО «Изовак», Беларусь) были получены многослойные диэлектрические лазерные зеркала, рабочая длина волны которых 632 и 532 нм соответственно. Первое зер-

кало состоит из чередующихся слоев  $ZrO_2$  и  $SiO_2$ . Второе представляет собой покрытие, содержащие утолщенные внешние слои  $SiO_2$ , выполняющие функцию теплоотвода нагруженных соседних слоев  $ZrO_2$ .

Оба типа зеркал были исследованы на лазерную прочность в НИЦ ОМТ БНТУ. Для зеркала 632 нм порог лазерного разрушения составил  $1 \text{ Дж/см}^2$ , а для зеркала 532 нм –  $1,5 \text{ Дж/см}^2$ . Следовательно, увеличение толщины слоев кварца позволяет эффективно отводить тепло от более поглощающих слоев оксида циркония.

Анализ результатов измерений показывает, что наиболее вероятными причинами низкой лазерной прочности полученных образцов покрытий являются:

- недостаточно высокое качество подготовки поверхности подложек;
- необходимость оптимизации работы вакуумного оборудования (в частности, источника ассистирования);
- высокая степень загрязнения покрытий в процессе нанесения продуктами, конденсированными на поверхностях внутрикамерной оснастки.

Дальнейшая работа предусматривает повышение качества подготовки поверхности подложек; оптимизацию работы оборудования (в частности, источника ассистирования); снижение загрязнения покрытий, получаемых в процессе нанесения, продуктами, конденсирующимися на поверхностях внутрикамерной оснастки. Этот комплекс мер позволит повысить пороговое значение лазерной прочности покрытий и улучшить их оптические характеристики.



## 7. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА (РАБОТЫ)

### 7.1. Оформление пояснительной записки

Рекомендуемый объём пояснительной записки (ПЗ) – не более 100–110 страниц, оформленных на компьютере в текстовом редакторе «Microsoft Word».

Пояснительная записка должна иметь следующую структуру:

1. Глава;
- 1.1. Раздел;
- 1.1.1. Подраздел;
- 1.1.1.1. Пункт.

В процессе написания и компьютерной вёрстки пояснительной записки необходимо придерживаться следующих правил и требований:

- печать текста осуществляется на листах формата А4 с одной стороны;
- поля – левое 2,5 см, правое – 1,5 см, верхнее – 2,0 см, нижнее – 2,0 см;
- колонтитулы – 1,5 см;
- **нумерация страниц**: положение – *вверху* страницы, выравнивание *по правому краю* – 14 пт. (нумерация страниц начинается с содержания и *включает все страницы приложений*);
- межстрочный интервал – множитель 1,2;
- красная строка (абзац) – 1,0 см;
- размер основного текста – 14 пт;
- размер подрисуночных надписей, обозначения, названия и текст внутри таблиц – 12 пт;
- шрифт – Times New Roman;
- содержание пояснительной записки оформляется в виде таблицы из двух столбцов (первый – заголовки; второй – номер страницы) при отключённом режиме «внешние и внутренние границы»;
- заголовки глав печатаются прописными буквами с выравниванием по центру, без красной строки и переносов;
- заголовки разделов и подразделов печатаются строчными буквами с выравниванием по центру, без красной строки;
- название глав, разделов и подразделов пишутся жирным шрифтом и отделяются от основного текста вниз и вверх – 12 пт.;

- каждая глава начинается с новой страницы;
- допускается расстановка переносов по тексту пояснительной записки;
  - выравнивание основного текста по ширине;
  - запрещается вставлять формулы как графические объекты;
  - допускается использовать только встроенный редактор формул «Equation»;
  - внутри редактора «Equation» дополнительно определяются стиль и размеры: обычных элементов – 14, крупного индекса – 10, мелкого индекса – 9;
    - выравнивание формул осуществлять по центру, а в случае наличия нумерации – симметрично, но по правому краю от ссылки на неё;
    - в конце формулы всегда ставится знак препинания: « . », « , » или « ; » и далее в обязательном порядке расписываются входящие в неё элементы; в этом случае слово «где...» пишется без красной строки и после него сразу же следует расшифровка первого из элементов;
      - в расчётной части пояснительной записки единицы измерения полученной величины после формулы пишутся следующим образом:  $L = a \cdot b = c$ , мм или  $L = 6$  мм;
  - отступ формул и рисунков от основного текста «Интервал» вверх и вниз – 12 пт;
  - отступ номера таблицы от основного текста «Формат/Абзац/Интервал» вверх – 6 пт; названия таблицы от рамки таблицы вниз – 6 пт;
  - в пояснительной записке к рисункам относятся собственно рисунки, фотографии, графики, фрагменты размерных цепочек и т. п.;
  - подрисуночная надпись оформляется в отдельном блоке на панели «Рисование», значок «Надпись» и выравнивается по центру самого рисунка;
    - в основном тексте ПЗ обязательно должна быть ссылка на рисунок, которая оформляется в круглых скобках и при наличии нескольких фрагментов обозначается русскими буквами в режиме курсива, например (рисунок 1.12, б) или (рисунок 1.14, а и б);
    - в сложном случае, при наличии нескольких рисунков, после общего названия ставится двоеточие и следует уточнение названия каждого рисунка. Далее после «:» идёт перечисление элементов на рисунке вынесенных как позиции (см. рис. 4.2);

- пояснения на рисунке, например позиция «3 – блок электронный, пишется с начала строки с выравниванием по центру текста (см. рис. 4.2);
- при переводе фрагментов чертежей в рисунки для вставки в ПЗ рекомендуется использовать графический формат \*.png (наилучшее качество изображения при максимальном сжатии и минимальном размере файла);
- **запрещается** в качестве транскриптора **использовать** графический редактор изображений **Paint!**;
- страница не может заканчиваться названием раздела или подраздела;
- глава, раздел или подраздел не могут заканчиваться формулой, рисунком или таблицей;
- нумерация формул, таблиц и рисунков должна быть сквозной в пределах одной главы;
- рисунок или таблица ставятся после первого упоминания о них в тексте;
- формулы нумеруются только в том случае, если на них есть ссылки в тексте;
- ссылки на используемые источники должны расставляться в тексте в квадратных скобках по мере использования и в порядке возрастания нумерации (ссылки на источники информации по возможности должны быть последних лет) (см. с. 233–237);
- перечень использованных источников необходимо оформлять общим списком, включив режим «нумерация»;
- каждый источник как минимум должен содержать фамилии авторов, полное название книги или статьи, тип издания, город, название издательства, год, общее количество страниц для книги или конкретный диапазон страниц в журнале;
- при использовании интернет-источника необходимо указывать полный адрес страницы, название сайта, название статьи, фамилии авторов, дату написания статьи или последнего обновления сайта;
- при наличии большого числа аббревиатур по тексту пояснительной записки после списка использованных источников приводится «Перечень принятых условных сокращений» (прил. И);
- перечень принятых условных сокращений рекомендуется делать в том случае, когда их количество превышает пять;

- все приложения отделяются от основного текста пояснительной записки чистым листом, по центру которого заглавными буквами печатается слово «ПРИЛОЖЕНИЯ». **Страницы приложения входят в общую нумерацию пояснительной записки;**

- на последующих листах слово «*Приложение А*» с указанием его буквенного обозначения пишется курсивом в правом верхнем углу листа, по аналогии с представленным пособием. Спецификация в данном случае является частью приложения, поэтому к ней предъявляются аналогичные требования;

- таблицы и подписи к рисункам в приложениях оформляются по аналогии с таблицами и рисунками в основном тексте пояснительной записки (прил. М);

- перед выводом текста пояснительной записки на печать рекомендуется внимательно просмотреть её ещё раз на предмет отсутствия случайных смещений заголовков, разрыва таблиц, отображения формул, отрыва подрисуночных надписей и т. п.;

- до начала сбора подписей на титульном листе обязательно ***сверить тему*** своего дипломного ***проекта*** (работы) ***с названием в приказе*** ректора по БНТУ. Должно быть 100%-е совпадение всех слов (копию приказа можно взять у секретаря ГЭК или секретаря кафедры).

Нумерация пояснительной записки начинается со страницы № 3 (*Реферат*). Пример оформления реферата представлен в прил. Г.

Листы пояснительной записки переплетаются в типографии или подшиваются в папку с твёрдой обложкой, имеющей негладкую и нескользящую поверхность, которая прошивается насквозь. Лучше всего использовать стандартную папку для дипломных проектов или работ. Обложку папки следует подбирать с соответствующим названием «Дипломный проект» или «Дипломная работа». Допускается папка без названия. Папки со скоросшивателями и папки с пружинными зажимами (перфобиндер) любого типа не использовать.

После переплёта ***на титульном листе*** не забыть проставить ***суммарное число страниц***, которое должно соответствовать значению, указанному в реферате и самой ПЗ, а также суммарное количество чертежей и плакатов.

## 7.2. Оформление графического материала

В соответствии с ГОСТ 2.201–80 всем конструкторским документам проекта (работы) (ПЗ, чертежам и плакатам) присваивается обозначение (индивидуальный номер) по следующей схеме:

Код организации-разработчика содержащий *четыре буквы*, например сокращённое наименование предприятия или вуза, которые в Республике Беларусь официально присваивает БелГИСС (прил. К).

Код классификационной характеристики изделия, содержащий *шесть цифр*, которые присваивает непосредственно конструктор в соответствии с Классификатором ЕСКД (ОКЕСКД ОК 012–93) [56]. При выполнении дипломного проекта рекомендуется использовать классы, приведенные в таблице.

Основные классы деталей и сборочных единиц  
по Классификатору ЕСКД

Номер класса	Наименование
1	2
20	Средства оптико-механические, оптико-электронные наблюдения, управления движением, средства фотометрические, голографические, микрофильмирования, фото-, кино-
28	Оснастка технологическая, инструмент режущий
30	Сборочные единицы общемашиностроительные
40	Средства измерений линейных и угловых размеров, параметров движения, времени, силы, массы, температуры, давления, расхода, количества и уровня
41	Средства измерений электрических и магнитных величин, ионизирующих излучений, средства интроскопии, определения состава и физико-химических свойств веществ
42	Устройства и системы контроля и регулирования параметров технологических процессов, средств телемеханики и пр.
43	Микросхемы, приборы полупроводниковые, электровакуумные, пьезоэлектрические, квантовой электроники, резисторы, соединители, преобразователи электроэнергии
44	Оборудование технологическое специфическое
69	Оборудование технологическое стекольной промышленности
70	Оборудование для производства изделий из полимерных материалов

1	2
71	Детали-тела вращения типа колец, дисков, стержней, шкивов, втулок, блоков, стаканов, колонок, штоков, валов, осей и др.
72	Детали-тела вращения; с элементами зубчатого зацепления; трубы разрезные, секторы, сегменты и пр.
73	Детали-не тела вращения: корпусные, опорные, емкостные
74	Детали-не тела вращения плоскостные
75	Детали-тела вращения и/или не тела вращения, кулачковые пружинные, ручки

Для оптических приборов выделен 20-й класс (прил. Л). Например – 201212 «Средства наблюдения, визирования, кроме средств наблюдения небесных, трубы зрительные, монокуляры».

Для выполнения технологических проектов по изготовлению оптических деталей посредством финишных методов обработки с использованием шлифовального и полировального инструмента рекомендуется использовать, например, классы 28; 40; 42; 44; 69; 70.

Децимальные номера для рабочих чертежей оптических деталей следует выбирать по 755XXX классу, который определяет обозначение: призмы с различным числом отражающих поверхностей, клиньев, светофильтров, мир, модуляторов, диаграмм, дифракционных решёток, сеток, экранов, пластин, волоконных световодов, отражателей осветителей излучателей лазера и прочих деталей, а также 756XXX класс, по которому отдельно обозначаются все виды линз.

Назначение классификационного кода изделия обеспечивает:

- установление единой обезличенной классификационной системы обозначения изделий и конструкторских документов машино- и приборостроения;

- ускорение и облегчение поиска разрабатываемых и изготавливаемых изделий и конструкторских документов;

- обеспечение возможности использования различными предприятиями конструкторской документации, разработанной другими предприятиями, без её переоформления;

- выявление объектов и определение направлений стандартизации и унификации; широкое использование средств электронно-вычислительной техники в проектировании, производстве изделий и технологической подготовке производства и обеспечении автома-

тизации разработки конструкторской документации и технологических процессов.

При оформлении графического материала к дипломному проекту необходимо придерживаться следующих правил:

- Чертежи и плакаты выполняются на компьютере. Плотность заполнения листа графическим и текстовым материалом должна составлять не менее 70–80 %.

- При выполнении двумерных электронных чертежей рекомендуется использовать простые графические пакеты, такие как «AutoCAD» или «Компас», а также «Solid Works».

- 3D-модели приборов выполняют в «Solid Works», «Inventor», «Pro Engineer» или в других аналогичных приложениях.

- На сборочных чертежах в обязательном порядке проставляются позиции, установочные, присоединительные и габаритные размеры, с указанием (при необходимости) посадок, шероховатостей, допусков формы и расположения поверхностей.

- На сборочных чертежах, чертежах общего вида и оптических схемах над основной рамкой приводятся технические требования или характеристики.

- Аберрационный выпуск желательно совмещать с принципиальной оптической схемой прибора или оптического узла. Также допускается его размещение на отдельном листе (обычно А2 или А1), в этом случае он оформляется как второй лист чертежа ЛЗ.

- Общий объем рабочих чертежей деталей (предусматривающих различную технологию их изготовления) не должен превышать формата А1.

- Образец заполнения основной надписи на чертежах приведен в прил. К.

- При работе в пакете «AutoCAD» следует выбирать: стиль – style2, шрифт – ISOCPEUR, высота текста – 2.5 (для граф основной надписи чертежа и фамилий) – 4.0 (для названия чертежа и технических требований) – 5.0 (для общего номера чертежа) – 7.0 (позиций на видах).

- Перечень элементов к чертежу общего вида или спецификация к сборочным чертежам оформляется в соответствии со стандартом и подшивается в конце приложений в пояснительной записке.

- При создании чертежей в обязательном порядке необходимо назначать не менее трёх слоёв, для каждого из которых задаётся свой тип и толщина линий. Рекомендуемые значения: основные (контурные) линии толщиной 0,8 пт.; вспомогательные (осевые и штриховые) линии – 0,2 пт.; размерные и выносные линии – 0,25 пт.

- Высота цифр для размеров определяется плотностью заполнения чертежа и рекомендуется в пределах от 6 до 8 мм. При выполнении рабочих чертежей деталей и лучшего чтения толщина основных линий также может быть уменьшена до 0,7 пт.

- При нанесении разрезов и сечений, отображении видов и местных выносных элементов их буквенные обозначения должны быть выполнены жирным шрифтом (например – **A–A**).

- Плакаты, содержащие фотографии оптических приборов, таблицы или схемы, рекомендуется компоновать в пакетах «Power Point» или «Corel Draw».

- Каждый плакат должен содержать общий **заголовок**, который выполняют **ПРОПИСНЫМИ** буквами высотой 20 мм (прил. Ф).

- В зависимости от длины заголовка (числа слов в строке) необходимо использовать шрифт **Arial (полужирный)** или **Arial Black**.

- **Размер шрифта и его тип в заголовках на всех плакатах – одинаковые!**

- На плакатах высота букв поясняющего текста или текста в таблицах, а также цифры в формулах составляет не менее 8–10 мм. Поясняющий текст или текст внутри таблиц выполняют шрифтом **Arial (полужирный)** (прил. Ф).

- На чертежах высота букв вспомогательных надписей на видах чертежа, а также технических требований и характеристик составляет 8–10 мм.

- Внешние поля (сверху, снизу, справа и слева) на плакате – 20 мм, отступ от заголовка до текста – не менее 15–20 мм.

- На плакат не допускается вставлять рисунки в виде отсканированных изображений графиков или схем (в том числе оптических) из различных источников: книг, журналов, статей, а также фотографий с сайтов.



- Минимальное разрешение любой фотографии на плакате должно быть не хуже 600 dpi на дюйм. В исключительных случаях для увеличения размера изображения рекомендуется использовать программный пакет «Adobe Photoshop CS» с введением интерполяции и наложением сглаживающих фильтров.

- На плакатах не рекомендуется брать заголовок в рамку или делать разделительные линии по полю листа.

- Основная рамка на плакатах аналогична той, которая выполняется на чертежах (прил. П), и располагается с оборотной стороны листа.

- **В основной рамке** обязательно **проставляется дата** разработки чертежа, его проверки руководителем, консультантом и нормоконтролёром, а также утверждения заведующим кафедрой. Дата кодируется шестью цифрами, разделёнными точкой: день, месяц, год – например 08.06.12 (прил. К).

- Перед выводом графического материала на плоттер рекомендуется задать режим «Предварительный просмотр» и ещё раз внимательно проверить «вес» основных и вспомогательных линий, а также масштаб при печати.

В печатных центрах г. Минска установлены различные версии графических программных пакетов, которые могут отличаться от тех, что инсталлированы на компьютере дипломника. При выводе на плоттер возможны сбои следующего характера:

- отсутствие некоторых слоёв, в том числе и с размерными линиями;
- искажение обозначений в формулах, таблицах и графиках;
- автоматическая замена шрифта в технических требованиях и многие другие.

В связи с вышесказанным для предотвращения неожиданных «сюрпризов» для печати рекомендуется подготовить отдельную копию каждого графического листа в формате \*.pdf. Например, для графического пакета «AutoCAD» печать в файл осуществляется через главное меню программы, как показано на рис. 7.1.

При необходимости вставки фрагмента чертежа в текст ПЗ в качестве рисунка файл формата \*.pdf конвертируется в пакете Adobe Photoshop CS в файл с расширением \*.png.

Правильно оформленные **ПЗ и графический материал** должны быть согласованы с нормоконтролером до предзащиты.

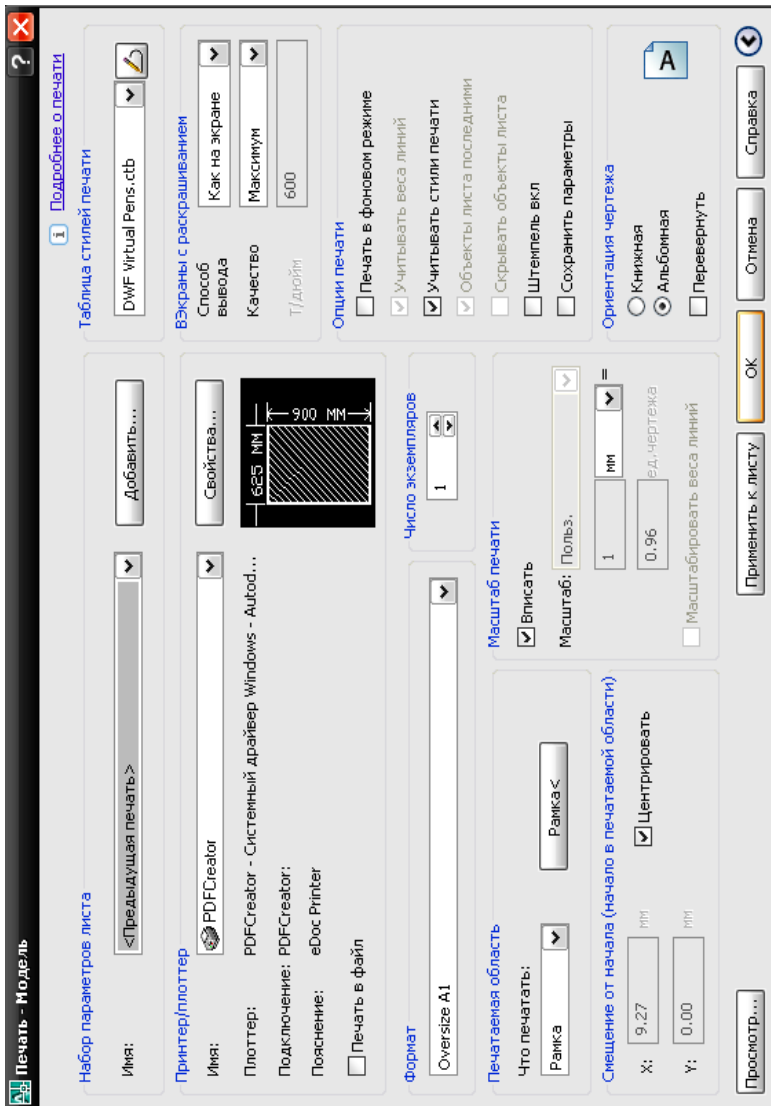


Рис. 7.1. Окно с настройкой параметров печати чертежа или плаката в pdf формате

### **7.2.1. Оформление технической документации**

Оформление технической документации на оптическую систему является завершающим этапом проектирования прибора или его узла.

*В техническую документацию входят:* принципиальная оптическая схема, оптический выпуск на систему, таблицы влияния отклонения параметров на aberrации и параксиальные характеристики, чертежи на оптические детали. Процесс оформления технической документации в настоящее время полностью автоматизирован.

### **7.2.2. Требования к оформлению схемы оптической принципиальной**

Согласно ГОСТ 2.412–81 на оптической схеме должны быть изображены:

- оптические элементы, выполняющие определенную функцию;
- упрощенно источники и приемники излучения, если таковые есть в схеме;
- элементы, поворачивающиеся или перемещающиеся вдоль или перпендикулярно оси, которые следует показывать в основном рабочем положении;
- положение диафрагм, зрачков (при необходимости), фокальных плоскостей, плоскостей изображения, предмета (для фотографических объективов и объективов микроскопов), а также положение экранов, светорассеивающих плоскостей и поверхностей, если таковые есть в системе.

На схеме оптической принципиальной необходимо привести основные оптические характеристики в виде записей на поле схемы или в таблице по форме, приведенной в прил. Р.

В зависимости от типа оптической системы *на ней следует указывать:*

- диаметры диафрагм, размеры зрачков, размеры тела накала или других светящихся элементов источников излучения, воздушные промежутки и другие размеры по оси, определяющие взаимное расположение оптических элементов, диафрагм, зрачков, фокальных плоскостей, плоскостей изображения и плоскостей предмета (для систем, работающих на конечном расстоянии), источников излучения и приемников энергии;

- размеры, определяющие положение оптической системы относительно механической части прибора;
- габаритные или установочные размеры, например, длину базы, высоту выноса плоскости изображения (при необходимости).

Для **телескопических систем** следует привести:

- видимое увеличение;
- угловое поле оптической системы в пространстве предметов;
- диаметр выходного зрачка;
- удаление выходного зрачка от последней поверхности;
- предел разрешения;
- коэффициент пропускания (при необходимости).

Для **фотографических объективов**:

- фокусное расстояние;
- относительное отверстие;
- угловое поле оптической системы или размер кадра;
- разрешающую способность;
- коэффициент пропускания.

Для **фотоэлектрических систем**:

- размеры фотокатодов или типы фотоприемников;
- размеры светового пятна на фотокатодах.

Кроме того, на оптических схемах следует указывать *дополнительные сведения*:

- расстояние от последней поверхности фотографического объектива до плоскости изображения в зависимости от расстояния до предмета;
- линейное перемещение окуляра на одну диоптрию;
- наименования или типы источников и приемников излучения;
- световые диаметры и стрелки прогиба, толщины линз по оптической оси.

### **7.2.3. Требования к оформлению оптического выпуска на оптическую систему**

Для окончательного варианта системы со скругленными радиусами кривизны составляется оптический выпуск (прил. М), который содержит чертеж оптической системы, ее оптические характеристики, конструктивные параметры, таблицы и графики аберраций [4].

В левой верхней части формата записывают название объектива, а затем указывают основные оптические характеристики, зависящие

от расположения предмета и особенностей системы: фокусное расстояние или увеличение, относительное отверстие, апертуру или диаметр входного зрачка, угловое или линейное поле оптической системы в пространстве предметов. Для фотообъективов и проекционных объективов может быть указан размер кадра, предел разрешения, а иногда и коэффициент пропускания.

Для *телескопических систем* указываются увеличение, угловое поле, диаметр выходного зрачка, его расстояние от последней поверхности. Кроме того, могут быть указаны предел разрешения и коэффициент пропускания. Для фотоэлектрических систем следует указать тип приемника излучения и размер светового пятна на площадке приемника.

Для *зеркальных и зеркально-линзовых систем* рекомендуется помимо общих оптических характеристик указать коэффициент центрального экранирования и эффективное относительное отверстие. Для телеобъективов следует записать значение коэффициента телесокращения. Иногда приводятся дополнительные сведения, характеризующие особенность работы системы.

Ниже, под основными оптическими характеристиками, приводится рабочая длина волны, для которой исправлены монохроматические аберрации, а также интервал длин волн, в котором осуществлена ахроматизация системы.

Затем располагается чертеж оптической системы, выполненный в масштабе. Под чертежом приводятся конструктивные параметры системы ( $r$ ,  $d$ ,  $n$ ,  $v$ ), марки стекол или других оптических материалов, световые и полные диаметры, а также стрелки прогиба поверхностей по световым и полным диаметрам. Если система содержит асферические поверхности, то соответствующие им вершинные радиусы записываются в виде  $r_{0v}$ , а ниже записывается уравнение профиля или поверхности. Под конструктивными параметрами системы указываются значения заднего фокусного расстояния, а также переднего и заднего фокальных отрезков.

Для случая предмета, расположенного на конечном расстоянии (в микрообъективах, проекционных, репродукционных объективах), приводится расстояние от первой оптической поверхности до предмета (передний отрезок) и от последней поверхности до изображения (задний отрезок), а также оптическая длина системы  $L$  – расстояние между плоскостями предмета и изображения.

Дополнительно могут указываться положение и размер апертурной диафрагмы в оптической системе, а также диаметры зрачков и расстояния от первой поверхности до входного зрачка ( $s_p$ ) и от последней поверхности до выходного зрачка ( $s'_p$ ); при необходимости – линейное увеличение в зрачках.

Числовые значения *остаточных aberrаций оптической системы* сводят в таблицы и строят соответствующие графики aberrаций. В правой верхней части (прил. С) приводится таблица aberrаций для точки на оси, где указаны сферическая aberrация, условие изопланатизма, сферохроматические разности и хроматизм положения.

Затем следует таблица aberrаций главных лучей и бесконечно тонких астигматических пучков для различных точек поля: меридиональная и сагиттальная кривизна поверхности изображения, астигматизм, дисторсия и хроматизм увеличения. В этой же таблице указывается удаление входного зрачка для оценки сферической aberrации в зрачках.

Далее следуют таблицы aberrаций лучей широких наклонных пучков в меридиональном и сагиттальном сечениях. Эти aberrации должны быть даны для различных точек поля для основной длины волны. Иногда указываются aberrации для дополнительных длин волн, подлежащих ахроматизации.

В отдельных случаях, например при больших относительных отверстиях и угловых полях зрения, приводится таблица aberrаций для внемеридиональных («косых») лучей.

Для высоточных оптических систем, где качество изображения сравнимо с дифракционным, например объективов микроскопов, приводят таблицу волновых aberrаций и указывают положение плоскости наилучшей установки (ПНУ).

На основании данных таблиц строят соответствующие графики aberrаций (прил. С). Графики поперечных aberrаций широких внеосевых пучков для различных точек поля необходимо выполнять в одинаковом масштабе.

#### **7.2.4. Требования к выполнению чертежей оптических деталей**

Рабочие чертежи оптических деталей выполняются в соответствии с ГОСТ 2.412–81; обозначения основных величин геометрической оптики – по ГОСТ 7427–76, классов чистоты полировальных

поверхностей – по ГОСТ 11141–84. Требования к материалу указываются согласно ГОСТ 23136–93. На чертеже оптической детали в правой верхней части следует поместить таблицу параметров, состоящую из трёх частей (прил. Т):

- 1) требования к материалу;
- 2) требования к изготовлению;
- 3) расчётные данные.

Требования к изготовлению ( $N$ ,  $\Delta N$ ,  $P$ ,  $\theta$ ,  $\pi$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\Delta R$ ) указываются в зависимости от вида детали. Число интерференционных колец и величину местной ошибки  $N$  и  $\Delta N$  относят к наименьшему размеру световой зоны (светового диаметра) для каждой поверхности. К расчётным данным относятся:

- задний фокус  $f_1'$ ;
- передний и задний фокальные отрезки соответственно  $S_F$ ,  $S'_F$  (для линз);
- длина хода луча  $l$  (для призм).

Размеры световых зон округляют до десятых долей миллиметра.

На поверхностях оптических деталей, на которые в дальнейшем наносятся покрытия, указывают условный графический знак с обозначением поверхности и типа покрытия. Если покрытие наносится только на часть поверхности ОД, то зону покрытия следует обвести штрихпунктирной линией с указанием её размеров. Чертёж ОД с асферическими поверхностями (АП) должен содержать уравнение АП и необходимые параметры или требования.

## 8. ПОДГОТОВКА К ОБУЧЕНИЮ В МАГИСТРАТУРЕ

Студенты, активно занимавшиеся научно-исследовательской работой ещё в период обучения в университете на третьем–пятом курсах и успешно закончившие вуз (средний балл 8 и выше), могут поступать в магистратуру на очное либо заочное отделение.

Магистратура является второй ступенью высшего образования и первым этапом для выпускников вузов или состоявшихся инженеров, планирующих связать свою жизнь с научной и педагогической деятельностью или повысить квалификацию.

**Срок обучения в магистратуре на дневном отделении** составляет **один год** (сентябрь–июнь) (для лиц до 30 лет), **на заочном отделении – 1,5 года** (сентябрь–декабрь) (без ограничений по возрасту). Магистратура в основном является подготовительным этапом для последующего поступления в аспирантуру.

Поступление в магистратуру – поэтапный процесс. В девятом или десятом семестрах пятого курса студент определяется с выбором будущего научного руководителя, который по согласованию с соискателем формулирует тему его научной работы.

О планируемом поступлении в магистратуру студенту необходимо сообщить заведующему кафедрой не позднее февраля–марта текущего года для резервирования мест в магистратуре БНТУ по специальности **1-38 80 02 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»**.

После защиты дипломного проекта (работы) (20–25 июня) ГЭК официально объявляет студенту о решении рекомендовать его для поступления в магистратуру.

Прием в магистратуру БНТУ осуществляется на конкурсной основе из числа лиц, получивших образование на первой ступени высшего образования, подтвержденное соответствующим документом об образовании, и имеющих научные публикации, ходатайства выпускающих кафедр, участвующих в разработке научно-исследовательских тем и инновационных проектов, в научно-практических конференциях и семинарах.

Прием в магистратуру БНТУ на обучение за счет средств республиканского бюджета осуществляется в соответствии с контрольными цифрами приема, которые утверждаются Министерством образования.



Прием в магистратуру БНТУ на обучение на условиях оплаты (сверх контрольных цифр приема) осуществляется в рамках предельной численности обучающихся, предусмотренной специальным разрешением (лицензией) на образовательную деятельность.

Сведения о количестве мест, предоставляемых в БНТУ на обучение в магистратуре за счет средств бюджета и на условиях оплаты, доводятся до общественности до **1 июня** текущего года.

### **8.1. Документы, представляемые в приёмную комиссию гражданами, поступающими в магистратуру**

Для организации приема в магистратуру БНТУ создается приемная комиссия, возглавляемая ректором, в состав которой входят ответственный секретарь приемной комиссии, руководители факультетов и преподаватели. Приемная комиссия осуществляет работу в соответствии с актами законодательства, в том числе Положением о приемной комиссии высшего учебного заведения, утверждаемым Министерством образования.

Выпускники, поступающие в магистратуру БНТУ, подают лично в приемную комиссию БНТУ, которая работает на факультете, следующие документы:

- **заявление на имя ректора по установленной форме** (заполняется при подаче документов);

- **копии диплома о высшем образовании и приложения к нему** (заверяются заместителем ответственного секретаря приёмной комиссии по факультету при наличии оригиналов диплома о высшем образовании и приложения к нему);

- **выписку из протокола заседания совета факультета (ПСФ) высшего учебного заведения (БНТУ)** (прил. Э), содержащую рекомендации для обучения в магистратуре и составляемую на основании выписки из заседания выпускающей кафедры, на которой обучался студент-дипломник (для студентов ЛТТ – обратиться к секретарю кафедры Кузнечик В.О.);

- **выписку (копию) трудовой книжки** (для работающих). Заверенная в отделе кадров или нотариальной конторе копия трудовой книжки действительна в течение двух месяцев со дня выдачи. Последней записью в копии должна быть фраза «уволен... (причина, дата)» либо «работает по настоящее время»;

▪ **медицинскую справку о состоянии здоровья** по форме, установленной Министерством здравоохранения для поступающих в высшие учебные заведения. Справка действительна в течение шести месяцев со дня выдачи;

▪ **четыре фотографии размером 3 × 4 см;**

▪ **документ, удостоверяющий личность** (паспорт или заменяющий его документ), предъявляется абитуриентом лично;

▪ **список и копии опубликованных научных работ, описаний изобретений, отчеты о выполненных исследованиях и разработках** (при их наличии), дипломы, подтверждающие победы в республиканских и (или) международных олимпиадах (при их наличии).

## **8.2. Сроки приёма документов**

Прием документов на дневную и заочную форму получения образования в магистратуре БНТУ осуществляется **с 27 июня по 5 июля текущего года.**

## **8.3. Вступительные испытания**

1. При поступлении в магистратуру на все специальности всех форм обучения выпускники сдают вступительное испытание по специальности (вступительный экзамен). Форма проведения вступительного экзамена устанавливается приемной комиссией БНТУ.

2. Сроки проведения вступительного экзамена – **с 6 по 12 июля текущего года.** Точная дата проведения экзамена утверждается приемной комиссией БНТУ до начала приема документов в магистратуру, например, 6 июля.

Вступительный экзамен проводится по учебным программам для поступающих в магистратуру, которые составлены в соответствии с типовыми учебными программами высших учебных заведений по специальностям высшего образования и утверждены ректором БНТУ.

Дисциплины, по которым составляются экзаменационные билеты:

– *Конструирование оптических приборов;*

– *Теория и расчет оптических систем;*

– *Лазеры и управление характеристиками лазерного излучения;*

– *Проектирование оптико-электронных приборов;*

– *Лазерные технологии в обработке материалов и медицине.*

Прием вступительного экзамена производится экзаменационной комиссией в составе трех человек. Экзаменационные комиссии утверждаются ректором БНТУ. Оценка знаний поступающих в магистратуру осуществляется по десятибалльной шкале.

3. Передача вступительного экзамена не допускается.

В случае несогласия с выставленной оценкой поступающий в магистратуру может в день сдачи вступительного экзамена подать председателю приемной комиссии письменное заявление о пересмотре результатов сдачи вступительного экзамена.

Рассмотрение такого заявления проводится специально создаваемой комиссией не позднее следующего дня после его подачи в присутствии поступающего в магистратуру и экзаменаторов, которые проводили данный вступительный экзамен.

4. Лицам, которые стали лауреатами Республиканского конкурса научных работ студентов высших учебных заведений, иных республиканских и международных конкурсов научных работ, проведенных Министерством образования в учебном году, предшествующем году поступления в магистратуру, по дисциплинам, соответствующим профилю избранной специальности, по специальности засчитывается высший балл – 10 (десять), установленный для оценки результатов вступительных испытаний.

5. Лица, которые не явились на вступительный экзамен без уважительных причин, либо получили оценки «один», «два» или «три», либо забрали документы, к участию в конкурсе не допускаются.

Оценки по результатам вступительного экзамена выставляются в экзаменационные листы.

#### **8.4. Порядок зачисления в магистратуру**

1. Решение о зачислении в магистратуру БНТУ принимает приемная комиссия по результатам вступительных экзаменов.

2. Сроки зачисления лиц в магистратуру на обучение за счет средств республиканского бюджета и на условиях оплаты по дневной и заочной формам получения образования – *по 17 июля текущего года.*

3. По решению приемной комиссии БНТУ конкурс и зачисление в магистратуру проводятся по специальностям.

4. Без вступительных испытаний в магистратуру зачисляются:

- лица, награжденные в текущем учебном году на первой ступени высшего образования нагрудным знаком «Лауреат специального фонда Президента Республики Беларусь по социальной поддержке одаренных учащихся и студентов» или «Лауреат специального фонда Президента Республики Беларусь по поддержке талантливой молодежи» за высокие достижения в учебных дисциплинах, соответствующих профилю избранной специальности;

- победители международных студенческих олимпиад, проведенных Министерством образования Республики Беларусь в текущем учебном году по дисциплинам, соответствующим профилю избранной специальности.

5. Преимущественное право на зачисление в магистратуру при одинаковом балле по результатам вступительного экзамена (в порядке перечисления) имеют лица:

- получившие по окончании первой ступени высшего образования диплом с отличием;

- представившие материалы, подтверждающие наличие научных публикаций, участие в разработке научно-исследовательских тем и инновационных проектов, в научно-практических конференциях и семинарах;

- работающие больший период времени по профилю избранной специальности;

- набравшие более высокий средний балл по результатам обучения на первой ступени высшего образования.

6. Зачисление в магистратуру на обучение за счет средств республиканского бюджета лиц, успешно сдавших вступительный экзамен, производится приказом ректора на основании решения приемной комиссии.

7. Лица, не прошедшие по конкурсу на обучение за счет республиканского бюджета и получившие на вступительном экзамене оценку не ниже чем «четыре», имеют право участвовать в конкурсе на обучение в магистратуре на условиях оплаты. Зачисление в магистратуру на обучение на условиях оплаты лиц, успешно сдавших вступительный экзамен, производится приказом ректора на основании решения приемной комиссии.

8. Лицам, не прошедшим по конкурсу, лично под роспись возвращаются оригиналы и копии документов, поданных в приемную комиссию.

## 8.5. Правила составления индивидуального плана работы магистранта

Индивидуальный план работы составляет сам магистрант под непосредственным участием научного руководителя в сентябре текущего года на основании учебного плана специальности и рекомендаций [57]. Контроль за правильностью и своевременностью оформления индивидуального плана возложен на учебно-методического работника деканата (Акулич Оксану Николаевну).

Индивидуальный план должен содержать:

– календарный план-график учебного процесса в зависимости от формы обучения по двум или трём семестрам с указанием периодов теоретического обучения, научной работы, экзаменационной сессии и каникул, а также финальную подготовку материалов и последующую защиту магистерской диссертации;

– сводную таблицу по двум циклам общеобразовательных и специальных дисциплин. Для каждой дисциплины приводится её полное наименование, объём часов (аудиторных и индивидуальных занятий, а также самостоятельная работа), форма отчётности (зачёт, экзамен);

– рабочую программу дисциплин специальности и спецкурса, одобренную на заседании кафедры «Лазерная техника и технология» и утверждённую на совете приборостроительного факультета, содержащую краткую аннотацию по основным изучаемым темам для каждой дисциплины (*обычно их три*) и рекомендуемую литературу.

**Цикл дисциплин кандидатских экзаменов и зачетов**, общих для всех магистрантов БНТУ, включает:

- «Иностранный язык» (экзамен);
- «Философия и методология науки» (экзамен);
- «Основы информационных технологий» (дифференцированный зачёт).

**Цикл дисциплин специальной подготовки**, общих для всех магистрантов ПСФ, включает *Государственный компонент*:

- «Педагогика и психология высшей школы» (зачёт);
- «Перспективные направления оптико-электронного приборостроения» (экзамен) и *Компонент учреждения высшего образования*:

– «Новые направления в приборостроении» (экзамен), в том числе для магистрантов кафедры «Лазерная техника и технология» дополнительно формируются рабочие программы по профильным дисциплинам, связанным с темой их будущей магистерской работы, например: «Сборка и юстировка типовых узлов и оптических приборов»; «Конструирование оптических приборов»; «Теория и расчёт твёрдотельных лазеров»; «Специальные оптические приборы»; «Анализ и синтез ОЭА для космических систем ДЗЗ в оптическом диапазоне спектра»; «Спектроскопия материалов, легированных ионами переходных и редкоземельных металлов» и пр.

По указанным дисциплинам сдаётся зачёт.

## 8.6. Правила оформления и защита магистерских диссертаций в ГЭК

Защита диссертационных работ для магистрантов дневной формы обучения осуществляется в июне в том же составе ГЭК и в те же дни, которые выделены для защиты дипломных проектов и работ студентов кафедры «Лазерная техника и технология» текущего года; для магистрантов заочной форм обучения защита проводится в декабре.

За *три рабочих дня* до защиты диссертационной работы магистрант **должен представить** заведующему кафедрой следующий комплект документов:

– **рукопись работы**, оформленную в соответствии с требованиями, подписанную магистрантом, руководителем (консультантом по технической части при его наличии);

– **отзыв руководителя** на магистерскую работу (с указанием оценки (раздел 7), подписью руководителя, заверенной в отделе кадров БНТУ);

– **отзыв рецензента** на магистерскую работу (с указанием оценки, заверенной подписью на предприятии или в организации, где работает рецензент);

– **презентацию** магистерской работы.

– **электронная копия на CD** рукописи работы и презентации.

Титульный лист рукописи магистерской работы оформляется в соответствии с образцом, приведенным в прил. Ю.

Рукопись магистерской работы (*объём не менее 80 с.*) структурно состоит из следующих пунктов и разделов:

- реферат;
- содержание;
- введение;
- аналитический обзор и постановка задач исследования;
- разработка методики проведения исследования;
- разработка математической модели объекта исследования;
- численные методы исследования;
- экспериментальные методы исследования;
- основные результаты работы и выводы.

Названия указанных разделов могут быть скорректированы с учётом полноты раскрытия объекта исследования.

Количество слайдов магистрант выбирает самостоятельно из расчёта суммарного времени, отводимого на доклад (15–20 мин). Обычно объём презентации составляет 18–22 слайда.

Презентация оформляется в пакете «Microsoft PowerPoint» и структурно содержит (*вариант проектирования*):

**Слайд 1.** Титульный лист: указывают наименование организаций (в том числе логотипы), в которых осуществлялось выполнение работы, тему работы (*свернуть с приказом и индивидуальным планом*), фамилии и инициалы: магистранта, руководителя и консультанта, город, год.

**Слайд 2.** Задачи исследований (по пунктам).

**Слайд 3–4.** Существующие на сегодняшний день методы и способы решения проблемы с указанием достоинств и недостатков.

**Слайд 5–6.** Схема (структурная, функциональная, принципиальная) стенда, установки, прибора и т. п., подлежащего разработке).

**Слайд 7–9.** Основные характеристики (отличительные признаки) составных компонентов.

**Слайд 10–11.** Компьютерное моделирование. Используемое программное обеспечение и методики, расчётные формулы и выражения.

**Слайд 12–13.** Сопоставительный анализ по графикам зависимости входных и выходных параметров.

**Слайд 14–15.** Внешний вид или 3D-модель изделия (в наиболее удачных проекциях), выполненная в одном из графических пакетов.

**Слайд 16-17.** Фотография экспериментального образца изделия (стенда, установки, прибора и т. п.) и его основные технические характеристики.

**Слайд 18.** Выводы (по пунктам), полученные в результате выполнения магистерской работы.

**Слайд 19.** Перспективные направления дальнейших исследований (по желанию).

**Слайд 20.** Доклад окончен. Спасибо за внимание!

Нумерация слайдов выполняется в верхнем правом углу.

Все слайды презентации оформляются в едином стиле. Сочетание цветовой гаммы фона и основной информации (текста, рисунков, фотографий) следует подбирать с учётом правил действия прямого или обратного контраста. Информация на слайдах (например индексы в формулах) должна быть легко читаема с расстояния примерно 3 м. Поля по контуру слайда устанавливаются не менее 8 мм.

**Презентация** также должна быть *распечатана* в количестве *не менее чем три экземпляра* для секретаря и членов ГЭК.

Перед началом доклада вступительное слово предоставляется научному руководителю магистранта.

С 2012 г. среди магистрантов очного и заочного обучения кафедры «Лазерная техника и технология» ПСФ БНТУ в программе Skype существует группа «Магистранты и аспиранты ЛТТ».

Группа создана с целью оперативного обмена:

- данными о сроках и месте проведения экзаменов;
- полезными лекционными и практическими материалами по специальным дисциплинам;
- on-line связи с собственными научными руководителями и консультантами, а также прочей полезной информацией.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Единая система стандартизации БНТУ. Дипломное проектирование: методическая инструкция Белорусского национального технического университета : МИ БНТУ 3.001–2003. – Минск : БНТУ, 2004. – 41 с.
2. Порядок разработки и постановки продукции на производство. Министерство промышленности Республики Беларусь : ТКП 424–2012 (02260). – Минск : УП «Промстандарт», 2012. – 24 с.
3. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила разработки технических условий : ТКП 1.3–2010. – Минск: Госстандарт, 2010. – 22 с.
4. Заказнов, Н.П. Теория оптических систем : учебник для студентов приборостроительных специальностей / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. Н. Кузичев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 448 с.
5. Проектирование оптико-электронных приборов / Ю. Б. Парвлюсов [и др.] ; под ред. Ю. Г. Якушенкова. – М. : Логос, 2000. – 488 с.
6. Сайт компании Kryotherm. Производство термоэлектрических модулей и комплексных систем охлаждения. Раздел «Техническая поддержка». Санкт-Петербург, 2007. <http://www.kryotherm.ru/?tid=29>.
7. Сайт компании «Световые технологии». Расчет количества светильников методом коэффициента использования. – М., 2007. – 10 с. [http://ltcompany.com/UserFiles/LT\\_Table.pdf](http://ltcompany.com/UserFiles/LT_Table.pdf).
8. DIAL GMBH Light. Building. Software. Germany. 2012. – Программа DIALux 4.10.0.2 <http://www.dial.de/DIAL/de/dialux/dialux-4/download/download-dialux.html>.
9. База данных светильников (Plug-in) для программы DIALux 4.8. Компания «Световые технологии». Россия. – М., 2009. <http://www.ltcompany.com/tech.php>.
10. Исследовательский центр компании Shredder. Великобритания. Программа для расчетов освещенности и яркости точечным методом Ulysse v.1. <http://www.brightelec.ru/topmenu/support/programmyraschetov/ulyssse/>.
11. Программа Fael-Lite для расчёта систем освещения объектов с использованием оборудования Fael Luce. Компания Fael S.p.A. Italy. – 2012. <http://fael-lite.software.informer.com/download/>.

12. Программа расчёта уличного освещения Light-in-Night (Road) 5.0. ООО Управляющая компания «БЛ ГРУПП». Россия. 1997. – 2011. <http://www.light-in-night.com/download.html>.

13. Надежность авиационной техники : Большая российская энциклопедия / главный редактор Г.П. Свищев. – М., 1994. [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_tech/2812/Надёжность](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/2812/Надёжность)

14. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / В. И. Анурьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1980. – Т.3. – 557 с.

15. Справочник конструктора точного приборостроения / Г. А. Веркович [и др.]; под общ. ред. К. Н. Явленского, Б. П. Тимофеева, Е.Е. Чадаевой. – Л. : Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1989. – 792 с.

16. Сайт компании «ИнСис Лтд» (промышленная автоматизация и контрольно-измерительные системы. – <http://www.insysltd.ru>.

17. Артюхина, Н. К. Методическое пособие для выполнения курсовой работы по дисциплине «Теория оптических систем и техническая оптика» / Н. К. Артюхина. – Минск : БПИ, 1988. – 28 с.

18. Родионов, С. А. Электронный учебник по курсу «Основы оптики» / С. А. Родионов. Приложение Л1. Описание работы с программой OPAL-PC. СПб. : ГИТМО (ТУ), 2000. – 167 с. [http://aco.ifmo.ru/el\\_books/basics\\_optics/lab\\_app\\_opal/lab\\_app\\_opal.html](http://aco.ifmo.ru/el_books/basics_optics/lab_app_opal/lab_app_opal.html).

19. Справочник конструктора оптико-механических приборов / М. Я. Кругер [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1967. – 760 с.

20. Справочник конструктора оптико-механических приборов / под ред. В. А. Панова. – Л. : Машиностроение, 1980. – 742 с.

21. Ключникова, Л. В. Проектирование оптико-механических приборов: учебное пособие для средних специальностей учебных заведений / В. В. Ключников. – СПб. : Политехника, 1994. – 206 с.

22. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.] ; под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2004. – 679 с.

23. Фёдорцев, Р. В. Элементы и детали оптических приборов: учебно-методическое пособие по выполнению курсового проекта для студентов приборостроительных специальностей / Р. В. Фёдорцев, А. Ю. Луговик. – Минск : БНТУ, 2010. – 149 с.

24. Иванов, А. В. Прочность оптических материалов / А. В. Иванов. – Л. : Машиностроение, 1989. – 144 с.

25. SCHOTT AG. Products & Applications. Optical Glass. Data Sheets. 2011. [http://www.schott.com/advanced\\_optics/english/tools\\_downloads/download/index.html](http://www.schott.com/advanced_optics/english/tools_downloads/download/index.html).

26. Сравнительная таблица оптических стекол по  $d$ -линии. VM-TIM / OHARA GmbH. Jena, Germany. 08.10.2010. – <http://www.oharacorp.com/>.

27. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия : ГОСТ 3514–94.

28. CDGM Glass Co., Ltd. China. Optical Glass, 2008. – <http://www.kryptontronic.de/pdf/products%20introduction%20and%20its%20data%20sheets.pdf>.

29. Козерук, А.С. Методическое пособие для выполнения курсового проекта по дисциплине «Технология производства оптических деталей» для студентов специальности «Технология оптического приборостроения» : в 4 ч. – Минск : Ротапринт БПИ, 1991. – Ч.1 : Расчёт инструмента для обработки оптических деталей. – 32 с.

30. Справочник технолога-оптика / И. Я. Бубис [и др.] ; под общ. ред. С. М. Кузнецова, М. А. Окатова. – Л. : Машиностроение, 1983. – 414 с.

31. Научно-производственное предприятие «Фокус». Продукция. Оптические смолы. – Россия, СПб., 2010. – [http://www.nppfocus.com/opticheskie\\_smoly.php](http://www.nppfocus.com/opticheskie_smoly.php).

32. Томаль, В. С. Ультразвуковая очистка оптико-механических систем / В. С. Томаль // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – № 5(71). – С. 57–60.

33. ОАО «Сморгонский завод оптического станкостроения» : Каталог продукции. – Сморгонь, Беларусь, 2010. – <http://www.szos.by/ru>.

34. Научно-производственное РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» : каталог продукции. – Минск, Беларусь, 2005. – <http://www.osvt.by/about.htm>.

35. Satisloh GmbH. Optical Manufacturing Solutions. Germany. – 2011. – [http://www.satisloh.com/index\\_\\_gast-e---.html](http://www.satisloh.com/index__gast-e---.html).

36. Opto Tech Optikmaschinen GmbH. Germany. – 2005–2012. – <http://www.optotech.de/uk/home>.

37. Jos. Schneider Optische Werke GmbH. Germany, 2008–2012. – <http://www.schneider-kreuznach.com/>.

38. Lapmaster International – US. Machinery. Precision Surfacing Machines. Chicago, 2012. – <http://www.lapmaster.com/machinery/default.html>.

39. Компас-автопроект : руководство пользователя. Акционерное общество АСКОН. – СПб., 2002. – 184 с.

40. Режимы резания металлов: справочник / под ред. Ю.В. Барановского. – М.: Машиностроение, 1972. – 408 с.

41. <http://www.td-automatika.ru/catalog/detail.php?ID=34010>.

42. Никитин, В.А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие / В. А. Никитин, С. В. Бойко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2004. – 462 с.

43. Научно-производственное предприятие «МИКРОТЕХ» : каталог продукции. Лабораторное оборудование. Оптиметры. Харьков, Украина, 2011. – <http://www.microtech-ua.com/index.php?lang=ru&module=catalog&category=77>.

44. Соболев, С. Ф. Разработка технологических процессов / С. Ф. Соболев, Г. А. Глазов. – Л. : ЛИТМО, 1986.

45. Фёдорцев, Р. В. Элементы и детали оптических приборов: учебное пособие / Р. В. Фёдорцев. – Минск : БНТУ, 2005. – 226 с.

46. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». – Л. : Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.

47. Порядок выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию научно-технической продукции: СТБ 1080–97. – Введ. 01.04.1998. – Минск : Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1998. – 46 с.

48. Кулешов, Н. В. Активные среды твердотельных лазеров / Н. В. Кулешов, А. С. Ясюкевич. – Минск : БНТУ, 2010. – 133 с.

49. Чуносков, Н. И. Программа reZonator. Версия 1.6.0 (278) / Н. И. Чуносков. – 2006–2012. – <http://www.rezonator.orion-project.org/>.

50. WINLASE Professional Laser Marking Software, Official webpage of LANMARK CONTROLS / cited Oct. 2009: Available at: Parallel diffractive multi-beam ultrafast laser micro-processing Zheng Kuang PhD Thesis 166. – [http://www.lanmarkcontrols.com/software\\_pro.htm](http://www.lanmarkcontrols.com/software_pro.htm).

51. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом / Г. М. Зверев [и др.]. – М. : Радио и связь, 1985. – 144 с.

52. Optics and optical instruments. Laser and laser related equipment. Test methods for laser induced damage threshold of optical laser surfaces: ISO/DIS 11254-1.2 – Part 1: 1 on 1 test.

53. Optics and optical instruments. Laser and laser related equipment. Test methods for laser induced damage threshold of optical laser surfaces: ISO/DIS 11254-2 – Part 2: S on 1 test.

54. Сканирующий зондовый микроскоп: пат. RU 2366008 С2 МПК G12В21/00/ А. О. Голубок, И. Д. Сапожников. – № 2006129124/28; заявл. 11.08.2006; опубл. 27.08.2009 // Открытия. Изобретения. – 2009. – № 24. – С.1–12.

55. Программное обеспечение «Nova». Инсталляционные дистрибутивы программ для стандартных конфигураций приборов АСМ. – Россия, Москва, Зеленоград: ЗАО «НТ-МДТ», 2008–2012. – <http://www.ntmdt.ru/software>.

56. Программа «Классификатор ЕСКД», версия 2.06. Продукция компании «АСКОН». Зарегистрирована в Российском агентстве по патентам и товарным знакам, свидетельство №2002611902. – СПб., 2006.

57. Вторая ступень высшего образования (магистратура) в Белорусском национальном техническом университете : методические указания / сост. : С.И. Романюк [и др.]. – Минск : БНТУ, 2010. – 80 с.

58. Волосов, Д. С. Фотографическая оптика. Теория основы проектирования, оптические характеристики : учебное пособие для киноузов / Д. С. Волосов. – 2-е издание. – М. : Искусство, 1978. – 543 с.

*Образец титульного листа отчёта о преддипломной практике*

**БЕЛОРУСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**Приборостроительный факультет**

**Кафедра «Лазерная техника и технология»**

**ОТЧЁТ О ПРЕДДИПЛОМНОЙ ПРАКТИКЕ**

в период с 2 февраля по 7 марта 20\_\_\_ г.

Место проведения – предприятие ОАО «Пеленг»

Специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы  
и системы»  
специализация: 1-38 01 02 01 «Оптические и оптико-электронные приборы  
и комплексы»

Студент группы 113117

И.И. Змитрович

Руководитель  
д-р техн. наук проф.

Н.К. Артюхина

Консультант от предприятия  
Канд. техн. наук, начальник отдела  
НПЦ «СКС»

П.В. Королёв

**Минск 20\_\_\_**

*Образец титульного листа пояснительной записки*

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**Приборостроительный факультет  
Кафедра «Лазерная техника и технология»**

Допущен к защите  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Н.В. Кулешов  
« 16 » июня 20\_\_ г.

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА (РАБОТЫ)**

**Расчёт и конструирование зрительной трубы  
переменного увеличения 24-40 × 60  
БНТУ–ДП–201212.01.00.000 ПЗ**

Специальность

1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»,  
специализация

1-38 01 02-01 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Студент-дипломник  
группы 113117

И.И. Змитрович

Руководитель  
д-р техн. наук проф.

Н.К. Артюхина

Консультанты:

по технической части  
канд. техн. наук, начальник отдела  
НПЦ «СКС» ОАО «Пеленг»  
по разделу «Охрана труда»  
канд. техн. наук, доцент

П.В. Королёв

А.М. Науменко

по разделу «Экономика»  
старший преподаватель

О.В. Козленкова

Ответственный за нормоконтроль  
канд. техн. наук, доцент

Р.В. Фёдорцев

Объем проекта:  
пояснительная записка – 120 страниц;  
графическая часть – 6 листов.

**Минск 20\_\_**

Образец заполнения задания по дипломному проектированию

Белорусский национальный технический университет

(название вуза)

Факультет приборостроительный Кафедра Лазерная техника и технология

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

« 16 » февраля 20\_\_ г.

### ЗАДАНИЕ

по дипломному проектированию

Змитровичу Ивану Ивановичу

Студенту (гр.113117)

1. Тема проекта Расчёт и конструирование зрительной трубы  
переменного увеличения 24–40 × 60

Утверждена приказом по вузу от 31 января 2012 г. № 392-ЛС

2. Срок сдачи студентом законченного проекта 13 июня 2012 г.

3. Исходные данные к проекту \_\_\_\_\_

3.1. Диапазон увеличений  $24^{\times}$ – $40^{\times}$ . 3.2. Диаметр входного зрачка

$D_{вз} = 60$  мм. 3.3. Фокусные расстояния объективов оборачивающей

системы  $f_3' = f_4' = 28,73$  мм. 3.4. Фокусное расстояние входного

объектива  $f_{об}' = 396$  мм. 3.5. Угловое поле зрения объектива

$2\omega = 2,8$  град.

4. Содержание расчётно-пояснительной записки (перечень подлежащих  
разработке вопросов)

4.1. Введение. 4.2. Литературный обзор. 4.2.1. Обзор ассортимента  
продукции, выпускаемой ИП «БелтексОптик». 4.2.2. Телескопиче-  
ские системы. 4.2.3. Малогабаритные приборы ночного виденья.

4.3. Развернутое техническое задание на зрительную трубу перемен-  
ного увеличения. 4.3.1. Наименование и область применения.

4.3.2. Основание для разработки. 4.3.3. Цель и назначение

разработки. 4.3.4. Источники финансирования. 4.3.5. Технические  
требования. 4.3.6. Экономические показатели. 4.3.7. Стадии и

этапы разработки. 4.3.8. Порядок контроля и приёмки. 4.4. Расчёты  
зрительной трубы переменного увеличения. 4.4.1. Габаритный



расчет зрительной трубы. 4.4.2. Аберрационный расчет двух-линзового склеенного объектива. 4.4.3. Расчёт кулачкового механизма панкратической системы. 4.5. Обоснование и выбор конструкции. 4.5.1. Внутренняя и внешняя компоновка прибора. 4.5.2. Назначение плоских зеркал. 4.5.3. Устройство и принцип работы изделия. 4.6. Охрана труда. 4.6.1. Техника безопасности и производственная санитария. 4.6.2. Пожарная безопасность. 4.7. Экономическая часть. 4.7.1. Расчет себестоимости прибора. 4.7.2. Расчет величины налоговых платежей. 4.7.3. Расчет экономического эффекта. 4.8. Заключение. 4.9. Список использованных источников. 4.10. Приложения.

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей и графиков)

5.1. Лист 1. Плакат сравнительных технических параметров существующих моделей зрительных труб и разрабатываемой конструкции оптического прибора (формат А1).

5.2. Лист 2. Чертёж общего вида зрительной трубы переменного увеличения 24–40 × 60 (формат А1).

5.3. Лист 3. Сборочный чертёж панкратической линзовой оборачивающей системы (формат А1).

5.4. Сборочный чертёж подвижного компонента и схема расчёта профиля кулачка (формат А2). Сборочный чертёж узла крепления плоского зеркала (формат А2).

5.5. Лист 5. Оптическая схема зрительной трубы и аберрационный выпуск (формат А1).

5.6. Лист 6. Рабочие чертежи деталей входящих в изделие (формат А1).

6. Консультант по проекту (с указанием разделов проекта)  
Технической части – канд. техн. наук, начальник отдела НПЦ «СКС» ОАО «Пеленг» П.В. Королёв  
Охрана труда – канд. техн. наук, доцент А.М. Науменко  
Экономической части – старший преподаватель О.В. Козленкова

7. Дата выдачи задания «02» февраля 20\_\_ г.

8. Календарный график работы над проектом на весь период проектирования (с указанием сроков выполнения и трудоёмкости отдельных этапов).

8.1. Обзор литературы – 03.04.20\_\_ г. 8.2. Развёрнутое  
техническое задание – 07.04.2012 г. 8.3. Обоснование и выбор  
конструкции – 15.04.2012 г. 8.4. Расчётная часть – 06.05.2012 г.  
8.5. Охрана труда – 11.05.2012 г. 8.6. Экономическая часть –  
17.05.2012 г. 8.7. Компоновка и оформление графического  
материала – 01.06.2012 г. 8.8. Редактирование пояснительной  
записки и написание доклада – 07.06.2012 г.

Руководитель \_\_\_\_\_ Н.К. Артюхина  
(подпись)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ «02» февраля 2012 г.  
(дата и подпись студента)

*Пример составления реферата дипломного проекта*

**РЕФЕРАТ**

Дипломный проект: 120 с., 53 ил., 15 табл., 30 библиогр., 2 прил.

**СТЕНД ДЛЯ КОНТРОЛЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ  
МОЩНОСТИ, ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, АНАЛИЗ ПРОФИЛЯ  
ЛУЧА, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР**

Объектом проектирования является устройство для электронного измерения профиля луча волоконного лазера.

Цель проекта заключается в разработке стенда, предназначенного для проведения измерений согласно существующим стандартам ГОСТ 26086–84, ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3–2008.

В процессе проектирования были выполнены расчеты уровня освещенности по центру пучка исследуемого волоконного лазера, расчеты дискретных и плавных фильтров, предназначенных для ослабления направленного излучения до его поступления на матричное фотоприёмное устройство, расчеты линзы, служащей для переноса изображения с объектива лазерного излучателя на площадку матричного фотоприёмного устройства и позволяющей устранить влияние расходимости лазерного излучения. Рассчитанные элементы представлены в виде сборочных единиц и рабочих чертежей деталей.

На основании выполненных расчетов проработана компоновка конструкции стенда и рассмотрены варианты необходимости введения дополнительных элементов. В частности, скорректирована оптическая схема для согласования увода лазерного излучения для каждого из устанавливаемых дискретных фильтров.

*Последовательность подшивки и примерное содержание  
пояснительной записки **конструкторского** дипломного проекта*

СОДЕРЖАНИЕ

(Титульный лист).....	(1)
(Бланк задания на дипломное проектирование).....	(2)
(Реферат).....	(3)
(Содержание).....	(4)
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	6
1.1. Телескопические системы.....	18
1.1.1. Простые зрительные трубы с увеличением $32\times$ и $100\times$ .....	20
1.1.2. Призменные зрительные трубы.....	23
1.1.3. Панкратические и телескопические системы переменного увеличения.....	25
1.1.4. Стереоскопические телескопические системы.....	28
1.2. Малогабаритные приборы ночного видения.....	30
1.2.1. Ночные монокуляры и зрительные трубы.....	30
1.2.2. Ночные прицелы и призменные бинокли.....	32
2. РАЗВЕРНУТОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ЗРИТЕЛЬНУЮ ТРУБУ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ.....	34
2.1. Наименование и область применения.....	34
2.2. Основание для разработки.....	34
2.3. Требования назначения прибора.....	35
2.4. Технические требования.....	35
2.4.1. Состав прибора и требования к конструктивному устройству.....	37
2.4.2. Технические характеристики зрительной трубы «Юкон» 24-40 × 60.....	38
2.4.3. Требования экономического использования сырья, материалов, топлива и энергии.....	39
2.4.4. Требования стойкости к внешним воздействиям.....	40
2.4.5. Требования к надежности.....	41

2.4.6. Требования технологичности.....	42
2.4.7. Требования безопасности.....	43
2.4.8. Требования к заимозаменяемости и унификации.....	43
2.4.9. Требования эргономики и эстетики.....	44
2.4.10. Требования к патентной чистоте.....	45
2.4.11. Условия эксплуатации, требования к техническому обслуживанию и ремонту.....	46
2.4.12. Требования к маркировке и управлению.....	47
2.4.13. Требования к транспортированию и хранению.....	48
2.4.14. Требования к метрологическому обеспечению.....	49
2.5. Экономические показатели.....	50
2.6. Стадии и этапы разработки.....	51
2.7. Порядок контроля и приёмки.....	52
<b>3. РАСЧЕТЫ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ.....</b>	<b>53</b>
3.1. Габаритный расчет зрительной трубы.....	55
3.2. Аберрационный расчет двухлинзового склеенного объектива.....	61
3.3. Расчёт кулачкового механизма панкратической системы.....	72
<b>4. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА.....</b>	<b>48</b>
4.1. Внутренняя и внешняя компоновка.....	48
4.2. Назначение плоских зеркал.....	51
4.3. Устройство и принцип работы изделия.....	52
<b>5. ОХРАНА ТРУДА.....</b>	<b>75</b>
5.1. Техника безопасности и производственная санитария.....	75
5.1.1. Техника безопасности.....	75
5.1.2. Метеорологические условия.....	76
5.1.3. Вентиляция.....	77
5.1.4. Производственное освещение.....	80
5.1.5. Электробезопасность.....	81
5.1.6. Шум и вибрация.....	82
5.2. Пожарная безопасность.....	84
<b>6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....</b>	<b>87</b>
6.1. Расчет себестоимости прибора.....	88
6.2. Расчет величины налоговых платежей.....	95
6.3. Расчет экономического эффекта.....	97

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	111
(Условные сокращения и обозначения).....	112
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	113
Приложение А. Аберрационный выпуск.....	114
Приложение Б. Технологический процесс сборки зрительной трубы.....	118
Приложение В. Спецификация.....	120

*Названия пунктов в скобках определяют их место в пояснительной записке, но в содержании не указываются.*

Последовательность подшивки и примерное содержание  
 пояснительной записки **технологического** дипломного проекта

СОДЕРЖАНИЕ

(Титульный лист).....	(1)
(Бланк задания на дипломное проектирование).....	(2)
(Реферат).....	(3)
(Содержание).....	(4)
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	6
1.1. Обзор вариантов и сравнительный анализ существующих конструкций изделий с призмами АР-90.....	6
1.2. Назначение оптической детали в приборе и область применения монокуляра.....	20
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИЗМЫ ТЕЛЕОБЪЕКТИВА.....	27
2.1. Выбор материала для изготовления оптической детали.....	27
2.2. Обоснование выбора метода получения заготовки и расчёт её геометрических параметров.....	30
2.3. Выбор клеичного приспособления и расчёт количества заготовок в блоке.....	35
2.4. Выбор и расчёт технологического инструмента.....	41
2.5. Описание маршрута обработки по основным и вспомогательным технологическим операциям.....	44
2.6. Характеристика технологического оборудования.....	56
2.7. Применение вспомогательных материалов.....	59
3. КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЗМЫ.....	61
3.1. Контроль геометрических параметров.....	61
3.2. Контроль чистоты поверхности.....	62
3.3. Контроль формы поверхности.....	63
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СБОРКИ И ЮСТИРОВКИ МОНОКУЛЯРА (ТЕЛЕОБЪЕКТИВА).....	65
4.1. Склеивание вогнуто-выпуклой линзы телеобъектива и призмы со сферической поверхностью.....	65
4.2. Составление общей (узловой) схемы сборки.....	68

*или второй вариант:*

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	6
1.1. Телескопическая система и её основные характеристики.....	6
Биноклярные приборы. Особенности биноклей.....	9
1.2. Классификация биноклей.....	13
1.2.1. Классификация биноклей по типу оборачивающей системы.....	16
1.2.2. Классификация биноклей по способу фокусировки.....	20
1.3. Специальные типы биноклей.....	21
Герметичные и газонаполненные бинокли.....	26
2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БИНОКЛЯ 8 × 40 СО СМЕННЫМИ СВЕТОФИЛЬТРАМИ.....	30
3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СБОРКИ И ЮСТИРОВКИ БИНОКЛЯ.....	35
3.1. Технологические особенности сборки бинокля.....	36
3.2. Описание технологического процесса сборки бинокля.....	39
3.2.1. Подготовка корпуса переднего.....	41
3.2.2. Сборка блока объективов.....	43
3.2.3. Сборка блока светофильтров.....	49
3.2.4. Сборка окуляров.....	50
3.2.5. Сборка крышки объектива.....	53
3.2.6. Общая сборка бинокля.....	54
3.3. Юстировка бинокля.....	55
3.4. Наполнение бинокля азотом.....	56
4. КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИНОКЛЯ.....	57
4.1. Методика контроля параметров бинокля.....	57
4.1.1. Контроль видимого увеличения и абсолютной разности увеличений в трубках бинокля.....	57
4.1.2. Контроль углового поля зрения.....	58
4.1.3. Проверка предела разрешения и качества изображения.....	59
4.1.4. Измерение диаметра и удаления выходного зрачка.....	60
4.1.5. Проверка параллельности выходящих из окуляров пучков лучей.....	62
4.2. Методика проведения испытаний бинокля.....	63
4.2.1. Проверка работы подвижных механизмов.....	64
4.2.2. Проверка биноклей на теплоустойчивость и холодоустойчивость.....	65
4.2.3. Проверка биноклей на соответствие требованиям по степени защиты IRX7.....	66
4.2.4. Испытания на надежность.....	68



5. ОХРАНА ТРУДА.....	71
5.1. Техника безопасности и производственная санитария.....	71
5.1.1. Метеорологические условия.....	71
5.1.2. Вентиляция.....	72
5.1.3. Производственное освещение.....	73
5.1.4. Электробезопасность.....	74
5.1.5. Шум и вибрация.....	75
5.2. Пожарная безопасность.....	78
6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	81
6.1. Затраты на сырьё и основные материалы.....	81
6.2. Покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты.....	83
6.3. Основная заработная плата производственных рабочих.....	85
6.4. Расчет численности работников.....	85
6.5. Отчисления в фонд социальной защиты населения.....	86
6.6. Отчисления на обязательное страхование.....	86
6.7. Расчёт коммерческих расходов.....	87
6.8. Расчёт нормативной прибыли.....	88
6.9. Расчет НДС.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	90
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	91
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	93
Приложение А. Спецификация сборочного чертежа.....	94
Приложение Б. Технологический процесс сборки бинокля.....	96

*Названия пунктов в скобках определяют их место в пояснительной записке, но в содержании не указываются.*

Последовательность подшивки и примерное содержание пояснительной записки **научно-исследовательской** дипломной работы

## СОДЕРЖАНИЕ

(Титульный лист).....	(1)
(Бланк задания на дипломное проектирование).....	(2)
(Реферат).....	(3)
(Содержание).....	(4)
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	6
1.1. Характеристика активных ионов $\text{Er}^{3+}$ и $\text{Yb}^{3+}$ .....	6
1.1.1. Ион $\text{Er}^{3+}$ .....	6
1.1.2. Ион $\text{Yb}^{3+}$ .....	8
1.1.3. Сенсibilизация ионов $\text{Er}^{3+}$ ионами $\text{Yb}^{3+}$ .....	10
1.2. Спектроскопические и генерационные свойства лазерных кристаллов, легированных ионами эрбия и иттербия.....	14
1.2.1. Кристаллы, легированные ионами $\text{Er}^{3+}$ .....	14
1.2.2. Кристаллы, легированные ионами $\text{Yb}^{3+}$ .....	22
1.2.3. Кристаллы, легированные ионами $\text{Er}^{3+}$ и $\text{Yb}^{3+}$ .....	27
2. МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЙ ИЛИ МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	34
2.1. Объекты исследования.....	34
2.1.1. Кристалл $\text{Er, Yb : KY(WO}_4)_2$ .....	34
2.1.1. Кристалл $\text{Er, Yb : KGd(WO}_4)_2$ .....	35
2.2. Измерение спектров поглощения и люминесценции.....	36
2.3. Расчет спектров вынужденного излучения.....	38
2.3. Исследования кинетики люминесценции.....	39
2.4. Измерения длительности ультракоротких лазерных импульсов.....	41
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....	43
3.1. Спектроскопические свойства кристаллов $\text{Er, Yb : KY(WO}_4)_2$ и $\text{Er, Yb : KGd(WO}_4)_2$ .....	43
3.1.1. Спектры поглощения и люминесценции.....	43
3.1.2. Спектры вынужденного излучения.....	49
3.1.3. Время жизни возбужденных состояний.....	53
3.2. Генерационные свойства кристаллов $\text{Er, Yb : KY(WO}_4)_2$ и $\text{Er, Yb:KGd(WO}_4)_2$ .....	56

3.2.1. Режим непрерывной генерации.....	56
3.2.2. Режим пассивной синхронизации мод.....	59
4. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ.....	65
4.1. Расчеты концентраций активных ионов.....	65
4.2. Расчеты лазерных резонаторов.....	67
5. ОХРАНА ТРУДА.....	75
5.1. Техника безопасности и производственная санитария.....	75
5.1.1. Техника безопасности.....	75
5.1.2. Метеорологические условия.....	76
5.1.3. Вентиляция.....	77
5.1.4. Производственное освещение.....	80
5.1.5. Электробезопасность.....	81
5.2. Пожарная безопасность.....	82
5.3. Лазерная безопасность.....	84
6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	87
6.1. Расчет трудоемкости научно-исследовательских работ.....	88
6.2. Расчет плановой себестоимости научно-исследовательских работ.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	111
(Условные сокращения и обозначения).....	112

*Названия пунктов в скобках определяют их место в пояснительной записке, но в содержании не указываются.*

*Пример оформления перечня условных сокращений и обозначений  
(в формате таблицы и в алфавитном порядке)*

**ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

<b>АСМ</b>	– атомный силовой микроскоп
<b>АЦП</b>	– аналого-цифровой преобразователь
<b>ВН</b>	– вертикальный наклон
<b>ВНГО</b>	– высота нижней границы облаков
<b>ВОЛС</b>	– волоконно-оптическая линия связи
<b>ВОП</b>	– ведомость операций
<b>ВСУ</b>	– видеосигнальное устройство
<b>ВУ</b>	– вакуумная установка
<b>ГН</b>	– горизонтальный наклон
<b>ГОСТ</b>	– Государственный стандарт
<b>ДЗЗ</b>	– дистанционное зондирование Земли
<b>ДП</b>	– дипломный проект
<b>ДР</b>	– дипломная работа
<b>ЕНО</b>	– естественная ночная освещённость
<b>ЕСКД</b>	– Единая система конструкторской документации
<b>ЕСТД</b>	– Единая система технологической документации
<b>ИК</b>	– инфракрасный
<b>ИОТ</b>	– инструкция по охране труда
<b>КД</b>	– конструкторская документация
<b>КМОП</b>	– комплементарная структура металл-окисел-проводник
<b>КТП</b>	– карта технологического процесса
<b>КЭ</b>	– карта эскизов
<b>ЛК</b>	– лёгкий крон
<b>ЛТК</b>	– лазерный технологический комплекс
<b>ЛТТ</b>	– лазерная техника и технология
<b>МДВ</b>	– метеорологическая дальность виденья
<b>МИ</b>	– методическая инструкция
<b>МК</b>	– маршрутная карта
<b>МКП</b>	– микроканальная пластина
<b>НДС</b>	– налог на добавленную стоимость
<b>НОТ</b>	– научная организация труда
<b>ОД</b>	– оптическая деталь
<b>ОК</b>	– операционная карта
<b>ОМТ</b>	– оптические материалы и технологии
<b>ОНВ</b>	– очки ночного виденья

<b>ОНТД</b>	– отчётная научно-техническая документация
<b>ОС</b>	– оптическая система
<b>ОТТ</b>	– общие технические требования
<b>ОЭА</b>	– оптико-электронная аппаратура
<b>ОЭП</b>	– оптико-электронный прибор
<b>ПДТ</b>	– прицел дальномерный танковый
<b>ПЗ</b>	– пояснительная записка
<b>ПЗС (CCD)</b>	– прибор с зарядовой связью (charge coupled device)
<b>ПНВ</b>	– приборы ночного видения
<b>ПНМ</b>	– смола полиэфирная ненасыщенная марка (стеклопластик)
<b>ПНУ</b>	– плоскость наилучшей установки
<b>ПО</b>	– программное обеспечение
<b>РКД</b>	– рабочая конструкторская документация
<b>РПС</b>	– рабочее пробное стекло
<b>СИД</b>	– светоизлучающий диод
<b>СОЖ</b>	– смазочно-охлаждающая жидкость
<b>ССИ</b>	– схема сборки изделия
<b>СТБ</b>	– стандарт Беларуси
<b>СТП</b>	– стандарт предприятия
<b>ТД</b>	– технологическая документация
<b>ТЗ</b>	– техническое задание
<b>ТИ</b>	– технологическая инструкция
<b>ТКП</b>	– технический кодекс установившейся практики
<b>ТЛ</b>	– титульный лист
<b>ТУ</b>	– технические условия
<b>ТФ</b>	– тяжёлый флинт
<b>УМУ</b>	– учебно-методическое управление
<b>УХЛ</b>	– умеренно-холодный климат
<b>УФ</b>	– ультрафиолетовый
<b>ФЭУ</b>	– фотоэлектронный умножитель
<b>ФП</b>	– фотоприёмник
<b>ЦАП</b>	– цифроаналоговый преобразователь
<b>ШД</b>	– шаговый двигатель
<b>ЭО</b>	– экспериментальный образец
<b>ЭОП</b>	– электронно-оптический преобразователь
<b>IP</b>	– international protection
<b>GaAs</b>	– gallium arsenide (арсенид галлия)
<b>PC</b>	– personal computer
<b>YAG:Nd<sup>3+</sup></b>	– кристалл алюмоиттриевый кубический гранат с трехвалентным неодимом

*Приложение К*  
*Образец заполнения основной надписи на графической части дипломного проекта*

<b>БНТУ–ДП–201212.01.00.000 ВО*</b>			
<i>Труба зрительная</i>		<i>Лит.</i>	<i>Масса</i>
<i>временного</i>			<b>1,2</b>
<i>увеличения 24-40 x 60</i>			<b>1:1</b>
<i>Чертёж общего вида</i>			
		<i>Лист 1</i>	<i>Листов 2</i>
		1-38.01.02.01	
		гр.113117	
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>
			<i>Дата</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Змитрович</i>		08.06.12
<i>Пров.</i>	<i>Артюхина</i>		09.06.12
<i>Т. контр.</i>	<i>Королёв</i>		10.06.12
<i>Н. контр.</i>	<i>Фёдорцев</i>		12.06.12
<i>Утв.</i>	<i>Кулешов</i>		14.06.12

\*БНТУ – код организации-разработчика (четыре буквы), (в данном случае сокращённое наименование вуза);

ДП (ДР) – дипломный проект (работа);  
 201212 – код классификационной характеристики изделия (шесть цифр), присваивает конструктор в соответствии с Классификатором ЕСКД;  
 (первые) 01 – номер зачётки через дробь (если дополнительный номер отсутствует – ставится первая буква фамилии);  
 (вторые) 00 – порядковый номер сборочного узла (единицы) или номер плаката;  
 000 – порядковый номер детали в сборочной единице.

Сокращённое обозначение:

ПЛ – плакат;  
 ВО – чертёж общего вида;  
 СБ – сборочный чертёж;  
 ГЧ – габаритный чертёж;  
 КЗ – схема кинематическая принципиальная;  
 ЛЗ – схема оптическая принципиальная  
 (на рабочих чертежах деталей тип не обозначается).

ОЭ – операционный эскиз

***При оформлении плакатов штамп основной надписи и рамка выполняются аналогично чертежам, но с оборотной стороны листа.***

Перечень приборов и устройств с их цифровым обозначением. Классификатор ЕСКД. Классы 20, 40, 69

Автоколлиматоры	203313	– ночные с форматом кадра до 24×36 мм	202134
Адаптеры	203127	– ночные с форматом кадра 24×36 мм	202135
Анализаторы	203584	– ночные с форматом кадра свыше 24×36 мм	202136
Аппаратура репродукционная	202160	Аэрофотоустановки:	
Аппаратура фоторегистрирующая	202161	– неподвижные	202137
Аппаратура кинорегистрирующая	202162	– качающиеся	202138
Аппаратура для фото- и киносъёмки	202150	Бинокли	201211
подводных объектов		Бленды	203421
Аппаратура для фотосъёмки:		Блоки скрещенных систем:	
– внутри космических объектов	202141	– решётки с призмами	203544
– снаружи космических объектов земной		– решётки с решётками	203545
поверхности	202142	Блоки световодов	203578
– снаружи космических объектов		Видоискатели	201213
поверхности других планет	202143	Головки панорамирующие:	
Аппаратура для киносъёмки:		– механические	203111
– внутри космических объектов	202144	– гироскопические	203112
– снаружи космических объектов земной		– жидкостного трения	203113
поверхности	202145	Головки поворотные:	
– снаружи космических объектов		– механические (кроме лимбовых)	203114
поверхности других планет	202146	– жидкостного трения (кроме лимбовых)	203115
Аэрофотоаппараты:		– лимбовые	203116
– дневные с форматом кадра до 24×36 мм	202131	Устройства опорные прочие	203119
– дневные с форматом кадра 24×36 мм	202132	Головки оптические:	
– дневные с форматом кадра свыше 24×36 мм	202133	– моноскопические призмные	203131

– моноскопические линзовые	203132	Загворы фотографические	203411
– моноскопические зеркальные	203133	Зеркала в оправе	203621
– стереоскопические призмённые	203134	Зеркала в блоке без оправы	203622
– стереоскопические линзовые	203135	Зеркала в блоке в оправе	203623
– стереоскопические зеркальные	203136	Зеркала склеенные	203626
– прочие	203139	Инструменты пассажные (для определения времени прохождения света через какую-нибудь вертикальную плоскость)	201222
Гранулометры (приборы для определения зернистости сыпучего материала)	203614	Искатели	203341
Денситометры (приборы для измерения степени затемнения (оптической плотности фотографических материалов)	202611	Кинопроекторы (кроме телевизионных)	202220
Дешифраторы	202253	Кинопроекторы телевизионные	202230
Диаметры (условного прохода поверяемых приборов)	203315	Камеры для измерения зеркального отражения	203311
Диаскопы	202242	Камеры для измерения диффузного отражения	203312
Диски вакуум-плотные (из корундовой керамики неметаллизированные)	203724	Каналы фильмовые	203212
Диффузометры (комплекс приборов и оборудования, содержащий специализированный ЯМР-спектрометр сверхвысокой чувствительности и разрешающей способности)	202615	Коллиматоры	203313
Диафрагмы постоянные круглые	203413	Кольца ирисовых диафрагм	203417
Диафрагмы постоянные щелевые	203414	Компараторы цвета	201114
Диафрагмы переменные ирисовые	203415	Коллективы	203518
Диафрагмы переменные щелевые	203416	Киноэкраны светопропускающие	202266
Жгуты гибкие	203721	Киноэкраны светоотражающие	202267
		Киноэкраны для стереопроекций-растровые	202268
		Конденсоры	203517
		Компенсаторы, отражающие световой поток:	
		– призмённые	203641
		– зеркальные	203642
		– прочие	203649



Компенсаторы, преломляющие световой поток:		Микроскопы световые биологические	201131
– призмные	203553	Микроскопы световые металлографические	201132
– линзовые	203554	Микроскопы световые минералогические, петрографические	201133
– клинья	203555	Микроскопы электронные	201135
Корпуса светоизолирующие оптических устройств	203121	Миры в оправе	203551
Клинья несклеенные в оправе	203535	Многохвостовики-коллекторы ( <i>волоконно-оптические элементы</i> )	203722
Клинья склеенные с призмой	203536	Магазины	203126
Клинья склеенные без оправы	203537	Модуляторы в оправе	203552
Клинья склеенные в оправе	203538	Монокуляры	201212
Корректоры	203556	Монохроматоры	201156
Кюветы	202436	Насадки фотографические	202381
Лепестки диафрагм или затворов	203418	Насадки для осветительной аппаратуры	202386
Линзы несклеенные	203511	Насадки для микроскопов	202387
Линзы склеенные из двух линз без оправы	203512	Насадки для устройств квантовой электроники	202388
Линзы склеенные из двух линз в оправе	203513	Нумераторы	202478
Линзы склеенные из трёх и более линз без оправы	203514	Обтураторы	203412
Линзы склеенные из трёх и более линз в оправе	203515	Объективы: – микроскопов	202310
Линзы фоконные	203723	– на длину тубуса 160 мм	202311
Лулы	201140	– на длину тубуса 190 мм	202312
Маркировщики	202478	– на длину тубуса 250 мм	202313
Межа ( <i>человекообразные пилотируемые военные машины</i> )	203423	– на длину тубуса свыше 250 мм	202314
		– устройств квантовой электроники	202315
		– фотографические	202320

– с постоянным фокусным расстоянием: – формат кадра до 24×36 мм	202321	Окуляры широкоугольные с полем зрения свыше 70°	203523
– формат кадра 24×36 мм	202322	Окуляры отрицательные (гомали), с негативной линзой для микрофотографии	203524
– формат кадра свыше 24×36 мм	202323	Окуляр–микрометры	203342
– с переменным фокусным расстоянием		Отражатели	203625
– формат кадра до 24×36 мм	202324	Опоры плечевые	202185
– формат кадра 24×36 мм	202325	Опоры нагрудные	202186
– формат кадра свыше 24×36 мм	202326	Призмы, отражающие световой поток:	
– эпидиаскопов	202350	– несклеенные	203611
– стереоскопов:	202350	– склеенные без оправы	203612
– с постоянным фокусным расстоянием	202351	– склеенные в оправе	203613
– с переменным фокусным расстоянием	202352	– блоки призмленные без оправы	203614
– аэрофотографические	202360	– блоки призмленные в оправе	203615
– телевизионные	202360	Призмы, преломляющие световой поток:	
– репродукционные:	202360	– несклеенные в оправе	203531
– с постоянным фокусным расстоянием	202361	– склеенные без оправы	203532
– с переменным фокусным расстоянием	202362	– склеенные в оправе	203533
– зрительных труб	202370	– блоки призмленные	203534
– визирных устройств	202370	Приемники чистой энергии	203581
– с постоянным фокусным расстоянием	202371	Поляризаторы	203583
– с переменным фокусным расстоянием	202372	Рамки визирные	203335
Объективодержатели	203122	Рамки прицельные	203336
Окуляры с нормальным полем зрения до 55° включительно	203521	Растры, отражающие световой поток	203634
Окуляры с увеличенным полем зрения свыше 55 град. до 70° включительно	203522	Растры, преломляющие световой поток	203543

Резольвометры (приборы для измерения разрешающей способности)	202613	Сетки измерительные	203526
Решетки, отражающие световой поток	203632	Сетки комбинированные	203527
Решетки, преломляющие световой поток	203542	Спектрофотометры для области спектра ультрафиолетовых излучений	201151
Решетки дифракционные: – отражающие световой поток	203631	Спектрофотометры для области спектра инфракрасных излучений	201152
– преломляющие световой поток	203541	Средства контроля шкал объектов	202633
Световоды волоконные	203727	Средства контроля визирные для наблюдения за экраном при наводке на резкость	202634
Световоды неволоконные	203578	Средства голографические	
Светофильтры стеклянные	203561	– обработки изображений	201121
Светофильтры пластмассовые	203562	– интерферометрии	201122
Светофильтры жидкие в оправе	203564	– регистрации быстротекающих процессов	201123
Светофильтры газовые в оправе	203566	– запоминающие	201124
Сенситометры (приборы для создания нормированного дозированного оптического излучения заданного спектрального состава и воздействия этого излучения на испытуемый фотоматериал)	202612	– изобразительные	201125
Спектрографы	201153	Средства радиолографические	201126
Спектроскопы	201154	Средства фотометрические	201110
Селфокки (световодная цилиндрическая линза, у которой показатель преломления достигает максимума вдоль оси и уменьшается вдоль радиуса)	203726	– приборы для измерения постоянного светового излучения	201111
Сетки визирные	203525	– приборы для измерения импульсного светового излучения	201112
		– приборы для измерения световых характеристик материалов	201113
		Стенды контроля параметров аппаратуры: – киносьемочной	202635
		– кинопроекционной	202636

Стекла клеенные без оправы	203572	Устройства сканирования	203332
Стереоскопы	202245	Увеличители фотографические	202241
Стилоскопы ( <i>прибор для измерения показателя преломления металлов вследствие рефракции волн</i> )	201155	– зеркальные для сбора излучения	203334
		– изменения параметров объектов	203322
Столики гониометрические	203337	– осветительно-проекционные	203710
Столики предметные	203124	– охлаждения осветителей кинопроекторов	202262
Телескопы	201221	– очистительные ультразвуковые	202455
Тест-объекты	203557	– перехода с поста на пост	202264
Трубки выверки холодной пристрелки	203314	– поворота изображения	203324
Трубы зрительные	201212	– поисковые многофункциональные	202730
Трубы оптических устройств	203128	– однофункциональные	202820
Турели	203122	– регулирование экспозиции	203323
Тубусы	203123	– сканирования	203332
Установки устройств, имитирующих природные условия	202184	– смены дифракционных решеток	203540
Устройства целостатные	201223	– светофильтров, кювет	203333
Устройства аэрофотограмметрические	202252	– совмещения кадра с кадрowym окном	203331
Устройства визирные	203343	– управления качающимися аэрофотоустановками	203318
– дистанционной наводки на резкость	202261	– установки и проверки призм в биноклях	203326
Устройства смены светофильтров, кювет	203333	– фокусировки объективов	203321
Устройства зеркальные для сбора излучения	203334	– фотограмметрические	202251
Устройства смены дифракционных решёток:		– юстировки коллиматоров, автоколлиматоров	203327
– с ручным управлением	203546	Фоکلины ( <i>солнечные концентраторы</i> )	203726
– автоматическим управлением	203547	Фоконы, линзы фокусные	203723
		Фотоаппараты	202123

Фотокамеры	203338	Средства измерений линейных размеров:	
Фотолaborатории	202435	– механические микрометрические	401121
Цветоделители	202167	– для наружных измерений	401122
Цветокорректоры	202168	– глубиномеры	401123
Щели спектральные	203430	– нутромеры	
Экраны, отражающие световой поток	203624	Средства измерений угловых размеров:	
Эпидиаскопы	202244	– угломеры, квадранты	401211
Эпископы	202243	– нивелиры, теодолиты	401213
Приборы коррекции и согласования:			
– электромеханические	402211	– гониометры, буссоли	401215
– электронные	402213	– кипрегели	401216
– оптические	402214	– головки делительные	401218
– газоразрядные	402215	– прочие	401219
– комбинированные	402218	Агрегаты моечно-сушильные:	
– прочие	402219	– ванны периодического действия	692233
		– ванны непрерывного действия	692234
Средства измерений параметров движения (имитаторы):		– прочие	692239
– гироскопические	402992	Агрегаты резки стекол различной конфигурации	692244
– оптические	402993	Агрегаты механической обработки поверхностей:	
– квантово-оптические	402994	– шлифование плоских поверхностей	692251
Преобразователи измерительные:		– шлифование криволинейных поверхностей	692252
– электронные	401263	– полировальные	692253
– фотоэлектрические	401264	– шлифовально-полировальные	692254
– оптические	401265	– притирочные	692255
– прочие	401269	– алмазного гранения	692256
		– прочие	692259

Пример оформления результатов абберационного расчёта

Таблица М1

Конструктивные параметры оптической системы

Номер варианта	Радиусы кривизны	Осевые расстояния	Световые высоты	Марки стекол	Показатели преломления		
$L =$					0.54600	0.48600	0.65600
Воздух							
1	0.0000	3.0000	28.400	БК8	1.54886	1.55283	1.54412
2	0.0000	6.6000	28.600	Воздух			
3	0.0000	7.0000	29.300	БФ16	1.67440	1.68100	1.66680
4	-45.2900	6.9000	29.900	Воздух			
5	-110.1500	5.0000	28.400	ТК14	1.61551	1.62014	1.61002
6	-76.3800	26.1900	26.900	Воздух			
7	22.2800	3.5000	7.400	ТК16	1.61520	1.62001	1.60951
8	-74.4700	1000	6.700	Воздух			
9	7.3450	4.5000	4.850	ТК16	1.61520	1.62001	1.60951
10	0.0000	1.0000	2.750	ТФ104	1.74623	1.75871	1.73247
11	3.1320	1.7500	1.800	Воздух			
12	0.0000	2.3000	2.000	К8	1.51830	1.52196	1.51390
13	0.0000	1.0000	2.000	Воздух			
14	-22.4900	4.0000	3.000	ТК14	1.61551	1.62014	1.61002
15	-6.0810	.5000	4.400	Воздух			
16	18.6210	2.0000	5.500	Ф1	1.61688	1.62468	1.60808
17	12.0000	4.5000	6.000	ТК14	1.61551	1.62014	1.61002
18	-23.9300	10.4700	5.900	Воздух			
19	-8.2410	3.0000	5.750	ТК16	1.61520	1.62001	1.60951
20	811.0000		7.700	Воздух			

Таблица М2

Спектральные характеристики

Спектральный интервал от 0.50000 мкм до 0.90000 мкм	
Длина волны	Спектр. эффективность
0.546000	1.000000
0.486000	0.150000
0.656000	0.150000

ПРЕДМЕТ: Удал. размер  $Y = -18,35000$  мм.

SO = 0,000 мм совпадает с 1-й поверхностью зрачка

ИЗОБРАЖ: Близ. размер  $Y = 0.00000$  мм.

SI = 0,0 мм совпадает с плоскостью Гаусса

ДИАФР. ND = 12 SD = 0.0000 мм. Передняя апертура = 0.0440 (sin)

Относительные величины предмета: 1.000 0.750 0.600 0.500

Относительное виньетирование верхнее: 0.000 0.000 0.000 0.000

Относительное виньетирование нижнее: 0.000 0.000 0.000 0.000

Таблица М3

## Параксиальные характеристики

F	F <sup>ˆ</sup>	SF	SF <sup>ˆ</sup>	SH	SH <sup>ˆ</sup>
-23.97792	23.97792	98.78185	-9.42027	122.75977	-33.39819

	S (дптр)	S <sup>ˆ</sup> (мм)	S <sup>ˆ</sup> G (мм)	V	SP (мм)	SP <sup>ˆ</sup> (дптр)
0	0.00000	3.59996	-3.59996	-0.24274	3.45854	-113.11419
1	0.00000	3.59996	-3.61497	-0.00701	3.30898	-113.55854
2	0.00000	3.59996	-3.57187	-0.00786	3.63189	-112.58158

Таблица М4

## Габариты пучков

Но- мер	Апертуры				Положение зрачков		Виньетир.		Светораспр	
	передние		задние		(дптр)	(дптр)	Верх	Низ	Вход	Выход
	Ax	Ay	Ax <sup>ˆ</sup>	Ay <sup>ˆ</sup>	Sp	Sp <sup>ˆ</sup>				
Длина волны – 0.5460										
1	0.04175	0.03721	-0.17551	-0.16409	-2.472	-123.621	0.000	0.000	80.3	87.3
2	0.04273	0.03991	-0.17806	-0.17097	0.263	-118.645	0.000	0.000	88.1	92.2
3	0.04320	0.04136	-0.17931	-0.17457	1.46	-116.558	0.000	0.000	92.3	94.8
4	0.04344	0.04217	-0.18002	-0.17664	2.089	-115.471	0.000	0.000	94.6	96.4
0	0.04400	0.04400	-0.18167	-0.18167	3.459	-113.114	0.000	0.000	100.0	100.0
Длина волны – 0.4860										
1	0.04188	0.03739	-0.17741	-0.16597	-2.694	-123.915	0.000	0.000	80.9	89
2	0.04286	0.04003	-0.17996	-0.17287	0.74	-119.032	0.000	0.000	88.6	94.3
3	0.04332	0.04148	-0.18122	-0.17646	1.285	-116.972	0.000	0.000	92.8	96.9
4	0.04358	0.04229	-0.18192	-0.17854	1.922	-115.897	0.000	0.000	95.2	98.4
0	0.04414	0.04414	-0.18357	-0.18357	3.309	-113.559	0.000	0.000	100.6	102.1
Длина волны – 0.6560										
1	0.04158	0.03699	-0.17331	-0.16187	-2.215	-123.243	0.000	0.000	79.5	85.0
2	0.04257	0.03976	-0.17585	-0.16877	0.481	-118.169	0.000	0.000	87.4	89.9
3	0.04302	0.04121	-0.17710	-0.17237	1.661	-116.054	0.000	0.000	91.6	92.5
4	0.04327	0.04201	-0.17781	-0.17444	2.282	-114.956	0.000	0.000	93.9	94.0
0	0.04382	0.04382	-0.17945	-0.17945	3.632	-112.582	0.000	0.000	99.2	97.6

Таблица М5

## Характеристики главных лучей пучков

Но- мер	Величина предмета		Величина изображения		Дисторсия		Астигмат. отрезки	
	Относ	(мм)	Относ	(мм)	%	(мм)	Z m	Z s
1	1.000	-18.350000	1.000	4.391470	-1.4085	-0.062737	0.1756	0.2007
2	0.750	-13.762500	0.755	3.317182	-0.7027	-0.023474	0.1402	0.1134
3	0.600	-11.010000	0.606	2.661551	-0.4106	-0.010974	0.0992	0.0721
4	0.500	-9.175000	0.506	2.221103	-0.2694	-0.006001	0.0721	0.497
0	0.000	0.000000	0.000	0.000000	0.0000	0.00000	0.0000	0.0000

Таблица М6

## Аберрации осевого пучка

Отн.зр	Продольные аберрации, мм			Поперечные аберрации, мм		
	0	1	2	0	1	2
Коор.	0	1	2	0	1	2
1.000	0.05585	0.03727	0.08847	0.010248	0.006929	0.015967
866	0.03503	0.01751	0.06629	0.005555	0.002813	0.010343
707	0.01915	0.00257	0.04922	0.002473	0.000337	0.006256
500	0.00764	-0.00811	0.03666	0.000695	-0.000747	0.003284
0.000	0.00000	-0.01501	0.02810	0.000000	0.000000	0.000000
Tg`	Волновые аберрации (дл. волн)			Неизопл., %	Н зр, мм	
*100	0	1	2			
8.349	0.6732	0.1712	1.5455	-0.2203	4.4043	
15.857	0.3291	-0.0400	0.9743	-0.1729	3.8133	
12.911	0.1256	-0.1155	0.5496	-0.1203	3.1128	
9.099	0.0265	-0.0914	0.2354	-0.0625	2.2005	
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	



## Аберрации внеосевых пучков

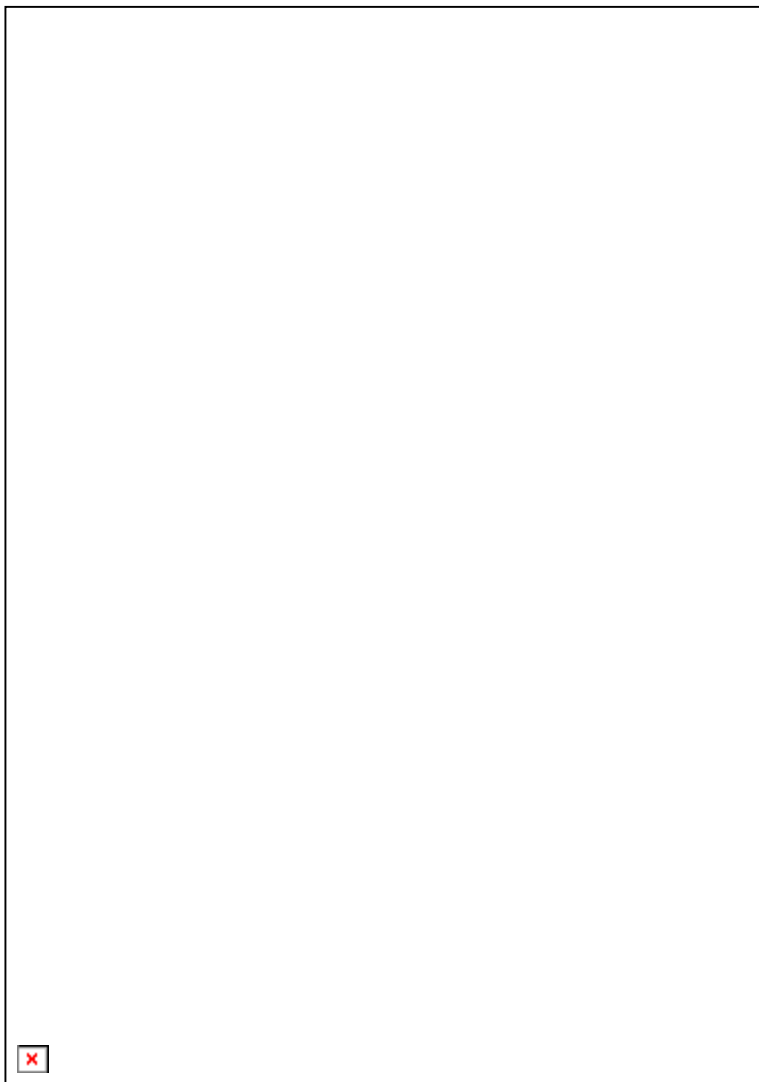
Вых. координаты		Поперечные аберрации, мм		
Канон.	(tg*100)	0	1	2
Меридиональное сечение		Пучок 1 Y = -18.3500		
1.000	-33.55	-0.07304	-0.12029	-0.01790
0.866	-36.61	-0.04565	-0.08971	0.00558
0.707	-40.17	-0.02205	-0.06311	0.02543
0.500	-44.76	-0.00341	-0.04148	0.04027
0.000	-56.07	-0.00374	-0.03745	0.03411
-0.500	-68.41	-0.05829	-0.09022	-0.02314
-0.707	-74.04	-0.09681	-0.12857	-0.06204
-0.866	-78.65	-0.13359	-0.16545	-0.09883
-1.000	-82.75	-0.17015	-0.20225	-0.13517
Меридиональное сечение		Пучок 2 Y = -13.7625		
1.000	-20.57	-0.02610	-0.06025	0.01423
0.866	-23.17	-0.01609	-0.04804	0.02144
0.707	-26.26	-0.00676	-0.03662	0.02809
0.500	-30.29	-0.00096	-0.02683	0.03307
0.000	-40.31	-0.00145	-0.02628	0.02638
-0.500	-51.17	-0.03303	-0.05678	-0.00724
-0.707	-56.07	-0.05514	-0.07889	-0.02964
-0.866	-60.04	-0.07629	-0.10024	-0.05078
-1.000	-63.55	-0.09741	-0.12167	-0.07172
Меридиональное сечение		Пучок 3 Y = -11.0100		
1.000	-12.87	-0.01029	-0.03738	0.02209
0.866	-15.33	-0.00680	-0.03212	0.02329
0.707	-18.27	-0.00270	-0.02634	0.02516
0.500	-22.12	-0.00120	-0.02075	0.02676
0.000	-31.69	-0.00070	-0.02018	0.02111
-0.500	-41.95	-0.02128	-0.03973	-0.00147
-0.707	-46.52	-0.03589	-0.05427	-0.01651
-0.866	-50.20	-0.05004	-0.06850	-0.03082
-1.000	-53.42	-0.06436	-0.08300	-0.04515
Меридиональное сечение		Пучок 4 Y = -9.1750		
1.000	-7.75	-0.00338	-0.02608	0.02408
0.866	-10.15	-0.00289	-0.02407	0.02256
0.707	-13.03	-0.00122	-0.02095	0.02226
0.500	-16.81	0.00095	-0.01731	0.02236
0.000	-26.17	-0.00039	-0.01642	0.01755
-0.500	-36.11	-0.01511	-0.03011	0.00078
-0.707	-40.50	-0.02586	-0.04070	-0.01051
-0.866	-44.00	-0.0349	-0.05132	-0.02143
-1.000	-47.06	-0.04749	-0.06238	-0.03259

## Ход лучей в оптической системе

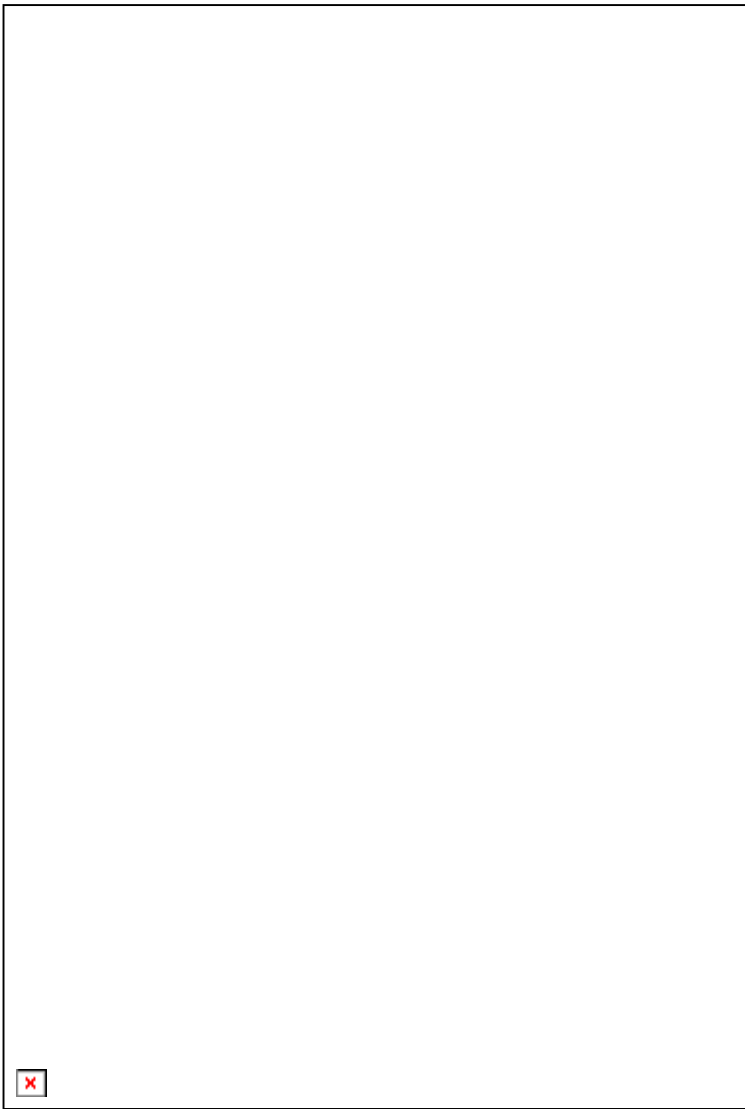
Но- мер	Аперт. ос. пучка	Пучок 1 $Y = -18.3500$					Световые высоты	Стрелки
		главный	верхний	нижний	боковой			
					x	y		
1	0.000	-18.350	-18.350	-18.350	0.000	-18.350	18.350	0.000
2	0.084	-18.437	-18.371	-18.513	0.080	-18.442	18.521	0.000
3	0.375	-18.736	-18.443	-19.079	0.356	-18.761	19.116	0.000
4	0.559	-18.815	-18.463	-19.218	0.428	-18.844	19.260	-4.299
5	0.805	-15.938	-15.248	-16.729	0.780	-15.992	16.774	-1.285
6	0.929	-15.405	-14.604	-16.321	0.891	-15.468	16.371	-1.775
7	1.788	-5.712	-4.119	-7.520	1.832	-5.808	7.563	1.323
8	1.746	-4.908	-3.211	-6.915	1.796	-5.044	6.962	-3.26
9	1.735	-3.985	-2.790	-5.122	1.712	-3.951	5.135	2.093
10	1.245	-1.844	-0.752	-3.169	1.281	-1.920	3.174	0.000
11	1.118	-1.141	-0.278	-1.962	1.105	-1.092	1.963	0.692
12	1.273	0.000	1.273	-1.273	1.270	-0.091	1.273	0.000
13	1.425	0.983	2.396	-0.387	1.432	0.893	2.398	0.000
14	1.521	1.680	3.097	0.263	1.542	1.561	3.104	-0.215
15	1.852	3.089	4.362	1.640	1.842	2.892	4.368	-1.851
16	1.805	3.690	5.272	1.989	1.734	3.604	5.277	0.763
17	1.662	3.968	5.403	2.409	1.569	3.897	5.404	1.286
18	1.351	4.350	5.509	3.171	1.328	4.284	5.515	-0.644
19	-0.313	4.934	4.650	5.167	-0.141	4.955	5.184	-1.834
20	-0.650	6.359	5.532	7.227	-0.656	6.432	7.255	0.032
Апертурная диафрагма								
12	1.273	0.000	1.273	-1.273	1.270	-0.091	1.273	

*Приложение Н*

*Пример оформления габаритного чертежа «Прибор спектрального фотометрического контроля полиции»*

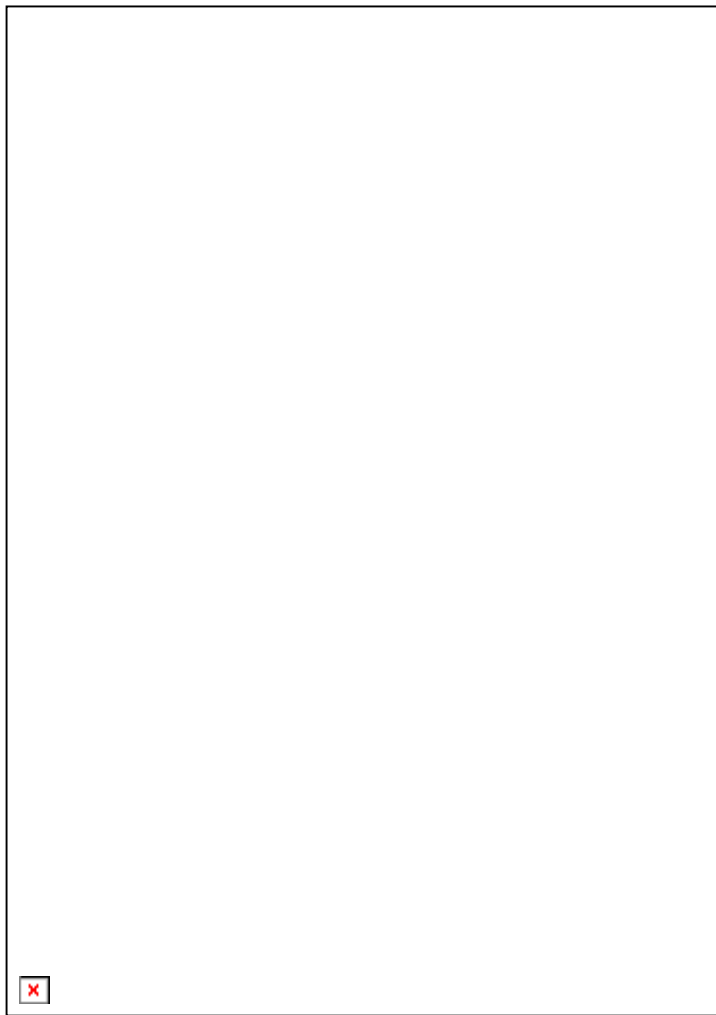


*Приложение П*  
*Пример оформления сборочного чертежа «Прицел тепловизионный “Quantum 38”»*



*Приложение Р*

*Пример оформления оптической схемы ЛЗ «Стенд для контроля распределения плотности мощности лазерного излучения»*



Приложение С

Пример оформления чертежа «Объектив “Диалит 38”. Аберрационный выпуск» (ЛЗ – лист 2)





## У1. Пример оформления титульного листа технологического процесса

Дубль.			Гост 2.105-04 форма 1		
Взам.					
Годоп.					
Кол. №	Передать	Дата			
Конференция «Патентная технология и технология»			БНТУ-ДП-758766.71.42.002		
Литера патента			БНТУ.01140.00001		
Литера патента					
<b>МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ</b> <b>БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>					
(Лист 1)					
(Лист 2)	<b>СОГЛАСОВАНО</b> Директор завода «Сфера» В.А. Холмова «12» июля 2012				
(Лист 3)	<b>КОМПЛЕКТ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ</b> на технологический процесс изготовления				
(Лист 4)	Консультант по технологической части, инженер-технолог И-Н категории И.Л. Пашкевич «10» июля 2012				
(Лист 5)	Акт экспертизы в производстве № _____ (Лист 6)				
	Консультант по охране труда, инженер-технолог наук, доцент А.М. Меларович «08» июля 2012				
	Протокол № 392-ПС от 31.01.2012 об утверждении тех. документации и конструкторских документов				





Пример оформления маршрутной карты технологического процесса (лист 2)

Дробл. Велич. Поряд.																ГОСТ 3.1118-82 Формат 10																																																							
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> </tr> <tr> <td colspan="10"></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">БНТУ.01140.00001</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">2</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">2</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>																																														БНТУ.01140.00001		2		2																					
										БНТУ.01140.00001		2		2																																																									
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> <td style="width:10%;"></td> </tr> <tr> <td colspan="10"></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">БНТУ.ДП-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">БНТУ.10140.00001</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">2</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td colspan="10"></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">768166.71.42.002</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">БНТУ.10140.00001</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">2</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">2</td> </tr> </table>																																														БНТУ.ДП-		БНТУ.10140.00001		2		2												768166.71.42.002		БНТУ.10140.00001		2		2	
										БНТУ.ДП-		БНТУ.10140.00001		2		2																																																							
										768166.71.42.002		БНТУ.10140.00001		2		2																																																							
А	Цепь	Учл.	РМГ	Стер.	Инд. наименование	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КЗМ	ЕН	СП	Клт	Тя	Тур.																																																							
Б	№зд	оборудован.	марк.	инвентарный номер	штрихов раск. детали	ИОТ №зд	длина	т	с	п	у	г																																																											
Р08	Обозначение документа																																																																						
А 04	050	4130	ИР-УПЛОЩИТЕЛЬНАЯ			ИОТ №зд-180	11-08							БНТУ.00140.00006	БНТУ.20140.00006																																																								
Б 06			ЦСМ-100			25	4	X									0,2																																																						
А 07	035	4130	ФАКЕТИРОВАНИЕ			ИОТ №зд-90	14-10							БНТУ.00140.00007	БНТУ.20140.00007																																																								
Б 06			СД-120			25	3	X									1,24																																																						
09																																																																							
А 10	040	4268	ГРАВИРОВАЛЬНАЯ			ИОТ №зд-08	2-3-87							БНТУ.00140.00008	БНТУ.20140.00008																																																								
Б 11			СД-120			13	4	X									3,6																																																						
12																																																																							
А 13	045	4190	ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ			ИОТ №зд-03	105-80							БНТУ.00171.00009	БНТУ.20103.00009																																																								
Б 14			СП-150М			28	3	X									4,7																																																						
15																																																																							
А 16	050	4190	ЛАНТИРОВАНИЕ			ИОТ №зд-06	22-86	170-06						БНТУ.00171.00010	БНТУ.20103.00010																																																								
Б 17			СД-120			13	3	X									1,47																																																						
18																																																																							
А 19	055		КОНТРОЛЬНАЯ			ИОТ №зд-00								БНТУ.00140.00011	БНТУ.20140.00011																																																								
Б 20			Стел контроля			26	5	X									2,28																																																						
МАРШРУТНАЯ КАРТА ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА																																																																							

У3. Пример оформления операционной карты технологического процесса

ГОСТ 3.1404-88 Формат 3										
Дублик. Выкл.										
Печат.										
Разработ. Провер. Утверд.	Баллукова Федорова Куркина	Кодификация «Детальная карта и технология»	БНТУ-ДП- 769166.71.42.802		БНТУ.60140.00001		1	1		
Н.катг. федерации			Линейка переключ							005
Наименование операции		Материал	Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры		М3	КОМД	
ШИРОВАЛЬНАЯ		ФЛЮИТ 101	3403 НВ	КГ	0,182	Штамповка		4,55	1	
Оборудование, устройство ЧПУ		Объемные протравы	То	То	Тол.	Тол		СОЖ		
ОС – 350			2,2	1,4		3,6		Воэра		
P						L	t	i	S	V
01	ГОСТ ИБЭТ-80, 6-88.									
0 02	А: Установить и зафиксировать заготовку.									
T 03	ГР: Смазать маслом цинковые отходы.									
0 04	1. Штамповать выколотый торцы заготовки, выдерживая размеры 1 и 2.									
T 05	РК: АШ 8048-3257-1 Плашайба обдирочная Ø350-М28 СТАШ 2438-82 С1-32 ГОСТ 1412-85;									
T 06	Шлифовальный №4 (электрокорунд белый) ГОСТ 28918-80Е.									
T 07	ВК: Губки протравки 150х60 мм, фланель ГОСТ 7259-77 (465х470 мм).									
T 08	СЖ: 390311 Штамповать ШП-175-0,1 ГОСТ 1091-89.									
P 09				88,0	8	0,24	1	1,2	72	394
0 10	2. Протравить заготовку в протравной ванне, протравить и уложить в тору.									
T 11	ВК: Губки протравки 150х60 мм, фланель ГОСТ 7259-77 (465х470 мм).									
T 12	ВК: Тара промывочная ГОСТ 19022-88 (2-2-40х30х7,5 мм); Бульба обдирочная ГОСТ 18273-76 (1200х800 мм).									
13										
ОК	ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВА ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА									



У5. Пример оформления карты технологического процесса (завод «Сфера»)

СТП-1040-2905-92										Форма 7		
Дубль.												
Взам.												
Подп.												
											5	1
Взвеш.												
Утв.												
Н. контр.												
N											009	
опер.	Наименование операции	Оборудование	Обрабатывающий и вспомогательный инструмент	Режим обработки	Вспомогательный материал	Измерительный инструмент	Код. обраб. дет.					
				Тара								
005	086000 Распаковывание											
010	480700 Распилка 1.Распилить заготовки на пластины Р-ром 41х41х10.	Станок отрезной К8611	Круж 1А1 Ф320 АС15 315/250 Припособл. Унлеверс. Тара Керенваш Шаблон	30	Фланель Бумага оберат.	Лупа ЛПЗ-6* Штангенциркуль	1					
015	492000(1) АШ 2520000197, АШ 2520000046 ИОТ11-89 Блокирование детали на план 1-ой стороне.	Плита злектр	АШ7752-4030 прист. шестиперанное	t°с 60	Воско- парафин. смесь фланель		25					
020	483117 ИОТ6-89 Шлифование врубое 1-ой стороны до получения Р-ра 8-0,2 . См. карту эскизов лист 1.	Станок плоскошлф. ЗД756	АШ2748-4201 АК Ф 500 АСВ 125/100 СТПАШ2135-79 Стойка	980 30	СОЖ фланель Бумага оберат. фланель	Микрометр Индикатор	125					
КТП	Заготовка											2

Уб. Пример оформления карты технологического процесса (СП  
«Цейсс-БелОМО»)

СП Цейсс БелОМО Дата: 13.01.2012 Время: 09:29:48 Страница: 001  
**ZSP2 - DRUCK** Пользователь: ZBSMI ГТ/СГТ: 1004/1

Завод: 8100 / Склад: 8120 **Техпроцесс - Оптика** Система: P15 / 081

Вид заказа: 0055 Материал: **444231-0021-000** Произв.заказ:

Линсе Ver.a

Плановое кол-во: **00000**

текст плана: **ЦПВ-** Автор изменения: ZBNRA

Пос.	Номер поз.	материал	Наименование	Кол-во	
0010		<b>444231-0021-810</b>	Прессовка SK 5	1,000	ШТ
0020		<b>262699-9999-999</b>	Коррекция	1,000	ШТ

**ЦПВ-**

Признак изм.: a/28.02.96

R1=49,048

Dmr frei R1=28

Belag R1=CZ219

Dmr=30h8

d=8,7+0,15

F'=28,8

1/3x0,16

2/02



R2=24,406

Dmr frei R2=28

Belag R2 ----

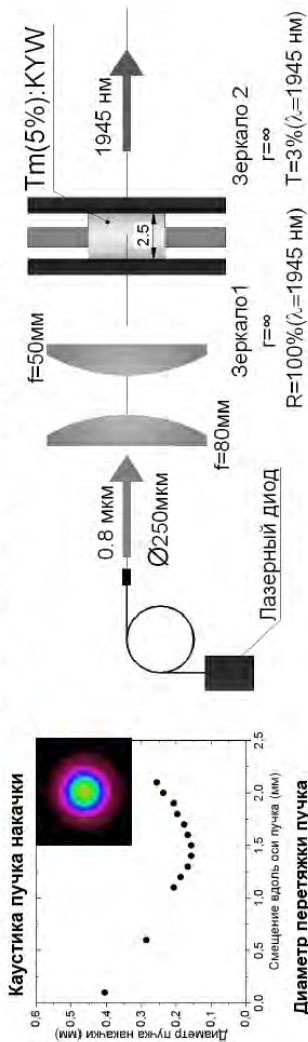
Стекло:

SK5 Hs25,7 N

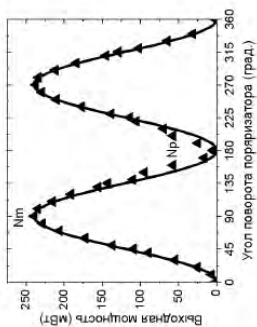
ne=1,59142

Послед. № опер	Раб.место	Ключ	Ваз. кол.	QS указание	Маш.Время	Раб.Время	Время ожд.
			Наименование / Описание		Маш.вр.осн.	Раб.вр.осн.	
0		<b>811014</b>	<b>1</b>		<b>0,0084</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
0001	<b>2901</b>	<b>0001</b>			<b>0,1004</b>	<b>0,000</b>	
<b>Выдача материала</b>							
444231-0021-810 прессовка							
R1=51 R2=26 Dmr=31,2+0,2 d=10,7+0,4							
0		<b>811014</b>	<b>1</b>		<b>0,0214</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
0010	<b>2101</b>	<b>0002</b>			<b>0,5004</b>	<b>0,000</b>	
<b>Фрезеровка R2</b>							
SPM-100 D46 Спутник 31,4-II d=9,6-0,05							
Сферометр 25/32 h'=-5мкм							
AA091/0;СРК002							
0		<b>811014</b>	<b>1</b>		<b>0,0214</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
0020	<b>2101</b>	<b>0002</b>			<b>0,5004</b>	<b>0,000</b>	
<b>Фрезеровка R1</b>							
SPM-100 D46 Спутник 31,4-I d=9,03-0,03							
Сферометр 25/32 h'=-6мкм Т'кр.<0,4мм							
AA091/0;СРК002							
0		<b>811014</b>	<b>1</b>		<b>0,0324</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
0030	<b>2601</b>	<b>0002</b>			<b>0,5004</b>	<b>0,000</b>	
<b>Центрировка</b>							
DZ-61 Dmr=30h8 4/0,03мм уг.сж.=55гр.							

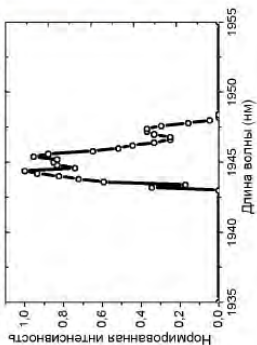
## СХЕМА МИКРОЧИП-ЛАЗЕРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРИРУЕМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Поляризация излучения лазера



Спектр генерации микро칩-лазера



Макет микро칩-лазера



*Пример составления доклада по конструкторскому  
дипломному проекту*

Цель проекта заключалась в разработке прибора для измерения высоты нижней границы облаков (ВНГО) нового поколения, который использует современную элементную базу и технические решения, а также не уступает по своим техническим характеристикам зарубежным и отечественным аналогам (*обращение к таблице на плакате № 1*), к основным из которых относятся:

- диапазон измерений 20–7000 м;
- количество измеряемых высот нижних границ облаков – не менее трех за один цикл измерения;
- относительная погрешность измерения высоты в диапазоне: от 10 до 100 м – не более  $\pm 5$  %; от 100 до 2000 м не более  $\pm 10$  %; от 2000 до 7000 м – не более  $\pm 5$  %.

На ОАО «Пеленг» в настоящее время уже разработаны две конструкции данного прибора: «СД-01-2000» (*обращение к плакату № 2*) и «СД-02-2006» (*обращение к плакату № 3*).

Анализ результатов работы данных приборов по итогам полевых испытаний показал, что в первой конструкции (*обращение к плакату № 2*) из-за сложности настройки параллельности оптических осей передающего и приемного каналов невозможно измерять высоту более 2000 м.

Во второй конструкции (*обращение к плакату № 3*) отсутствует помехозащищенность от сигналов встречного рассеяния при наличии подоблачной дымки, а также осадков в виде снега или дождя, которые, в свою очередь, приводят к ложным срабатываниям схемы прибора.

На основании выявленных недостатков предыдущих вариантов конструкций в процессе проектирования была разработана новая оптическая схема прибора. Проведены габаритный, абберационный и энергетический расчеты, результаты которых позволили определить конструктивные параметры и характеристики основных компонентов передающего и приемного каналов. В результате в качестве источника излучения выбран лазерный диод, работающий на длине волны 905 нм, а в качестве приёмника – фотодиод с 80%-й интегральной чувствительностью для данной длины волны.



Принцип измерения ВНГО (*обращение к схеме на плакате № 4*) основывается на определении времени, необходимого для прохождения коротким импульсом слоя атмосферы от передатчика прибора до нижней границы облака и обратно до приёмника прибора. Выражение, показывающее зависимость времени задержки и высоты обратного отражения, представлена на *плакате № 4*.

Оптическая база прибора, расстояние между оптическими осями передающего и приемного каналов (*обращение к плакату № 5*), была рассчитана исходя из условия, при котором зондирующий сигнал, отраженный от подоблачного слоя, расположенного на высоте 15–20 м, не должен поступать на фотоприемник. Это связано с тем, что от данного слоя отражается наибольшая часть энергии зондирующего сигнала, которая не позволяет точно измерять высоту нижней границы облаков. Таким образом, в нашем случае появляется возможность устранить недостаток, имеющий место в конструкции с совмещенными каналами (*обращение к плакату № 3*).

Используемый в передающем канале микрообъектив, поз. 1, позволяет выровнять апертуры лазерного диода в двух взаимно перпендикулярных направлениях (*обращение к плакату № 5*). Оптическое волокно, поз. 2, применяется для получения пятна с равномерным распределением яркости по полю зрения. Блок оптических клиньев, поз. 4, позволяет точно выставлять параллельность оптических осей каналов, тем самым учитывается недостаток конструкции, представленной на *плакате № 2*. Приемный объектив, поз. 6, содержит интерференционный светофильтр, который пропускает излучение в спектральном диапазоне  $\lambda = 880\text{--}925$  нм, что учитывает разброс длины волны излучателя в партии и позволяет сохранять работоспособность прибора при температуре от минус 50 до плюс 50 °С.

Из абберрационного выпуска (*обращение к плакату № 5*) видно, что приёмный объектив обладает малыми абберрациями, что дает возможность точно сфокусировать сигнал обратного рассеяния на достаточно малой площадке фотоприемника.

Внешний вид прибора представлен на *плакате № 1*. Прибор состоит из двух блоков – подвижного и стационарного. Это позволяет осуществлять измерения в трёх положениях: вертикальном – высоту нижней границы облаков; наклонном (под углом 3°) – видимость по глассе; горизонтальном – метеорологическую дальность видимости (МДВ). МДВ будет определяться контрастом, т. е. эффективностью передачи пространственных частот изображения предмета через среду, в которой распространяется свет.

В стационарном блоке размещены электронные модули, обеспечивающие функционирование прибора и обмен информации с блоком управления и индикации. В подвижном блоке установлены оптические приемопередающие элементы. Сборочные чертежи объективов передающего и приёмного каналов представлены на *плакате № 4*.

Выполненный проверочный энергетический расчет показал соответствие параметров измерения высоты разрабатываемого прибора характеристикам, обеспечиваемым аналогом в пределах заданной точности.

Рабочие чертежи деталей представителей, входящих в основные узлы прибора, представлены на *плакате № 6*.

Экономический расчет отпускной цены прибора показал его конкурентоспособность на рынках стран СНГ и Восточной Европы.

Доклад окончен, спасибо за внимание!

Пример составления доклада по **технологическому**  
дипломному проекту

Цель дипломного проекта заключалась в разработке технологического процесса изготовления оптических деталей объектива монокуляра. Сборочный чертеж оптического прибора представлен на *чертеже № 1*. Телескопический объектив представляет собой склейку двояковыпуклой и вогнуто-выпуклой линз диаметром 43 мм, предназначенных для первичного формирования изображения предмета, и прямоугольной призмы  $5 \times 5,7$  мм со сферической поверхностью, служащей для фокусирования луча от лазерного излучателя и направления его на объект наблюдения (целеуказатель).

Оптические детали объектива имеют простые конструктивные формы, поэтому могут быть изготовлены по одному из существующих на производстве типовых технологических процессов.

В результате изучения базовых технологических процессов, их анализа и возможных вариантов усовершенствования были разработаны оптимальные с экономической и технологической точки зрения маршруты обработки линз и призмы, представленные на *плакатах 2 и 3* в виде блок-схем.

Для достижения этих целей автором были подробно изучены геометрические параметры и оптические характеристики деталей, входящих в объектив: двух линз (*обращение к чертежам 2.1 и 3.1*) и призмы (*обращение к чертежу 4.1*), был выполнен анализ технологичности конструкции каждой из них. На основании проведенного анализа были выбраны и рассчитаны необходимые инструменты, подобрано соответствующее оборудование и технологическая оснастка.

Рассмотрим более подробно стадии обработки указанных оптических деталей объектива.

Технологические процессы изготовления обеих линз схожи как по количеству и наименованию выполняемых операций, так и по использованию одних и тех же станков и инструментов, а также методов контроля параметров деталей. Для обеих деталей в качестве заготовок было выбрано кусковое стекло. Такой выбор обоснован меньшей стоимостью по сравнению с альтернативным использованием прессонок, а также является доминирующим в оптическом производстве.

После распиливания кускового стекла партия поступает на участок заготовки. Первая операция, выполняемая на данном участке, – грубое шлифование сферы на сферошлифовальном станке «Алмаз-70» (*обращение к чертежам 4.2 и 5.2*). Используется кольцевой алмазный инструмент с зернистостью режущей кромки 60/40 мкм. Следующая операция – шлифование среднее и мелкое сферы свободным абразивом зернистостью соответственно М20 и М10 на шлифовально-полировальном станке модели 6ШП-200. В обоих случаях используется металлический инструмент: чашка в случае двояковыпуклой линзы (*обращение к чертежу 4.3*) и гриб – для вогнуто-выпуклой линзы (*обращение к чертежу 5.3*). Детали на участок поступают и обрабатываются блоками. Поскольку требуемая точность изготовления обеих линз средняя:  $N = 2$ ,  $\Delta N = 0,2$  и технология их изготовления не является сложной, то был выбран эластичный способ блокирования деталей для обработки обеих сторон каждой линзы. Все сопутствующие расчеты блоков, количества деталей на них, наклеенных приспособлений и используемых инструментов приведены в пояснительной записке к дипломному проекту. Далее отшлифованные блоки полируют (*обращение к чертежам 2.4 и 3.4*). Полирование ведется на том же участке, в тех же собранных блоках, используется аналогичный станок. Применяются смоляные полировальники для обработки обеих поверхностей каждой линзы. Расчеты и обоснование выбора используемых инструментов представлены в пояснительной записке.

После полирования эластичные блоки разбирают, детали отправляются на участок центрировки. Для центрирования линз используются самоцентрирующие оправки и центрировочный станок модели ЦС-50.

Окончательным этапом разработанного технологического процесса является нанесение просветляющих покрытий на поверхность А двояковыпуклой линзы (*обращение к чертежу 4.1*) и на поверхность Б вогнуто-выпуклой линзы (*обращение к чертежу 5.1*). Операция выполняется на участке вакуумных покрытий, используется вакуумная установка ВУ-1.

Далее рассмотрим технологию изготовления призмы объектива (*обращение к чертежу 6.1*). Отличительной особенностью этой оптической детали является наличие сферической поверхности на

границы Б. Этот факт обуславливает значительное отличие разработанного технологического процесса от типового.

Детали поступают на участок заготовки в виде пластин, полученных распиливанием кускового стекла на кратные заготовки. На этом участке ведется грубое шлифование параллельных сторон Г и Д (*обращение к чертежу 6.1*), подгонка углов  $90^\circ$  (шлифование грубое вручную сторон Е и В), грубое шлифование сферы из плоской заготовки на стороне Б (*обращение к чертежу 6.2*). Для шлифования плоскостей используется плоскошлифовальный станок модели ЗД-756. Подгонка углов  $90^\circ$  производится вручную на обдирочном станке модели СО-500. При грубом шлифовании сферы используется, как и при обработке линз, сферошлифовальный станок модели «Алмаз-70» и кольцевой алмазный инструмент с зернистостью режущей кромки 60/40 мкм. Однако важно отметить то, что для выполнения данной технологической операции была специально изготовлена полиуретановая вставка прямоугольного сечения для вакуумного патрона (*обращение к чертежу 6.2*), что позволило избежать операции кругления оптических деталей.

На участке шлифования-полирования призмы обрабатываются блоками по семь штук. Для формирования стороны Е блоки гипсуют (*обращение к чертежу 6.3*), а для обработки гипотенузы И – детали блокируют методом оптического контакта (*обращение к чертежу 6.4*). При шлифовании и полировании сферической поверхности Б призмы блокируют на специально изготовленное наклеечное приспособление эластичным способом по три штуки (*обращение к чертежу 6.5*). Для обработки плоских поверхностей на данном участке используется шлифовально-полировальный станок модели ЗШП-350, для сферической поверхности – шлифовально-полировальный станок ШПНМ. Во всех случаях применяется шлифовальный инструмент из серого чугуна СЧ10: для сторон Е и И – планшайбы, а для сферы Б – чашка (*обращение к чертежам 6.3, 6.4, 6.5*). Таким образом, основополагающим моментом при разработке технологического процесса изготовления призмы объектива является применение специально изготовленной полиуретановой вставки на операции грубого шлифования сферы и специального наклеечного приспособления для трех деталей при среднем и мелком шлифовании и полировании сферической поверхности призмы.

Окончательным этапом изготовления призмы объектива является нанесение просветляющего покрытия на сферическую поверхность Б и отражающего покрытия на гипотенузу И (*обращение к чертежу 6.1*). Покрытия наносятся на участке вакуумных покрытий, используется вакуумная установка ВУ-1.

Обоснование выбора оборудования, вспомогательных и обрабатываемых материалов, расчет применяемых инструментов, блоков, наклеенных приспособлений приведено в пояснительной записке к дипломному проекту.

Неотъемлемой частью любого технологического процесса являются операции промежуточного и окончательного контроля. Контролируются как геометрические и конструктивные параметры, так и оптические характеристики изготавливаемых деталей. Используемые методы и средства измерения и контроля необходимых параметров для каждой детали описаны в пояснительной записке. Наиболее важным является контроль конструктивных параметров. Для линз – это контроль диаметров, радиусов, толщин. На *чертежах 4.5, 5.5 и 4.6* соответственно представлены операционные эскизы контроля толщины линзы индикатором часового типа, диаметра линзы – микрометром гладким МК-50, радиуса поверхности линзы – пробным рабочим стеклом. Контроль децентричности линз осуществляется посредством прибора СТ-41, оптическая схема которого представлена на *чертеже 5.6*. При изготовлении призмы дополнительно контролируют углы и световую зону. Для контроля качества нанесенных покрытий на окончательном этапе изготовления обеих линз и призмы используется спектрофотометр МСФП-2.

Окончательным этапом технологического процесса изготовления объектива является операция склеивания оптических деталей. На *плакате 2* представлен разработанный технологический процесс склеивания двух линз, а на *плакате 3* – склеивание линз с призмой. Во втором случае используется клей Norland NOA61, как наиболее прочный и стойкий к внешним воздействиям среди используемых клеев.

Разработанный в дипломном проекте технологический процесс изготовления объектива монокуляра позволит оптимизировать производственный цикл на оптическом предприятии завода «Сфера», руководство которого в дальнейшем планирует внедрить представленные в проекте технологические процессы.

Доклад окончен. Благодарю за внимание!

*Пример составления доклада по научно-исследовательской дипломной работе*

Добрый день, уважаемые члены государственной комиссии! Целью данной дипломной работы являлась разработка макета непрерывного эрбиевого лазера, излучающего в области 1,5–1,6 мкм, с выходной мощностью более 1 Вт.

**(Плакат 1)** Излучение спектральной области 1,5–1,6 мкм имеет ряд особенностей, интересных для практического применения. Во-первых, оно является сравнительно безопасным для глаз. Во-вторых, излучение в области 1,5–1,6 мкм обладает малыми потерями при прохождении через атмосферу. В-третьих, кварцевые волокна, являющиеся основой современных сетей оптической связи, характеризуются низкими значениями дисперсии и поглощения в данной спектральной области. Указанные особенности излучения с длиной волны в области 1,5–1,6 мкм обуславливают повышенный интерес к разработке лазерных источников, излучающих в данной области спектра, для применения в медицине, дальнометрии, оптической локации и системах связи.

На сегодняшний день существует ряд лазерных источников, излучающих в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Однако наибольшее практическое распространение получили твердотельные лазеры на трехвалентных ионах эрбия, отличающиеся относительной простотой, компактностью и возможностью работы в различных режимах генерации.

**(Плакат 2)** Ионы  $\text{Er}^{3+}$  обладают развитой схемой энергетических уровней. Для генерации излучения в области 1,5–1,6 мкм интерес представляет переход  ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ . Полоса поглощения ионов эрбия характеризуется достаточно малой интенсивностью, что снижает эффективность накачки при создании лазеров с диодной накачкой в области 1 мкм. Поэтому для повышения эффективности накачки используют дополнительную соактивацию активной среды ионами-сенситизаторами  $\text{Yb}^{3+}$ , имеющими интенсивные полосы поглощения в этой спектральной области.

Для эффективной генерации в спектральной области около 1,5 мкм при диодной накачке в области около 1 мкм активная среда должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Эффективное поглощение энергии накачки и её перенос от ионов иттербия к ионам эрбия.

2. Малое время жизни иона  $\text{Er}^{3+}$  на уровне  ${}^4\text{I}_{11/2}$  для минимизации энергетических потерь, связанных с обратным переносом энергии от ионов эрбия к ионам иттербия, поглощением из возбужденного состояния, ап-конверсионными переходами с этого уровня.

3. Достаточно большое время жизни иона  $\text{Er}^{3+}$  на верхнем лазерном уровне  ${}^4\text{I}_{13/2}$  – с целью сохранения невысокого порога генерации.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют фосфатные стёкла с ионами Er и Yb. На данных активных средах реализована непрерывная генерация с выходной мощностью около 200 мВт и дифференциальной эффективностью генерации 20–30 %. Однако основным недостатком, ограничивающим применение эрбиевых стекол в системах с непрерывной диодной накачкой, является низкая теплопроводность.

Для снятия таких ограничений актуальным остаётся поиск кристаллических матриц для активации ионами Er и Yb.

На сегодняшний день проведено большое количество лазерных экспериментов с эрбиевыми кристаллами. Однако характеристики кристаллических лазеров не превышают параметров, достигнутых в лазерах на эрбиевых стёклах. Поэтому задача поиска новой кристаллической матрицы для активации ионами Er остаётся актуальной.

В данной работе рассмотрен кристалл  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , активированный ионами Er и Yb.

**(Плакат 3)** В кристалле Er, Yb : YAB наблюдается интенсивная полоса поглощения с полушириной 17 нм и максимумом на длине волны 976 нм, а также наблюдается сильная анизотропия поглощения, кроме того более интенсивной является полоса  $\sigma$ -поляризации.

С использованием известной шарковской структуры уровней  ${}^4\text{I}_{13/2}$  и  ${}^4\text{I}_{15/2}$ , по методу соответствия рассчитаны спектры поперечных сечений вынужденного излучения кристалла Er, Yb : YAB. В спектрах наблюдаются полосы вынужденного излучения в области 1,5–1,6 мкм, которые могут быть использованы для получения лазерной генерации.



**(Плакаты 4)** Для оценки эффективности переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия было измерено время жизни ионов  $\text{Yb}^{3+}$  на уровне  $^2\text{F}_{5/2}$  в кристалле  $\text{YAB}$ , активированном только ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , и во втором случае – соактивированном ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ . Эффективность переноса энергии, рассчитанная по сокращению времени жизни ионов  $\text{Yb}^{3+}$  на уровне  $^2\text{F}_{5/2}$ , составила 88 %.

Измеренное время жизни ионов на уровне  $^4\text{I}_{11/2}$  составило 80 нс, что гораздо меньше, чем в самых эффективных материалах, легированных  $\text{Er}$  и  $\text{Yb}$ , – фосфатных стёклах. Это приводит к минимизации энергетических потерь, связанных с обратным переносом энергии от ионов эрбия к ионам иттербия, поглощением из возбужденного состояния, ап-конверсионными переходами с этого уровня.

Время жизни иона на уровне  $^4\text{I}_{13/2}$  составило 325 мкс. Знание спектров вынужденного излучения позволяет рассчитать значение радиационного времени жизни возбужденного уровня  $^4\text{I}_{13/2}$ . Так, радиационное время жизни ионов на уровне  $^4\text{I}_{13/2}$  составило 3,9 мс.

Квантовый выход люминесценции составил 7 %, что объясняется высокой вероятностью безызлучательных переходов, обусловленных высоким значением энергии фонона кристаллической решетки кристалла  $\text{YAB}$ .

**(Плакаты 5)** Для лазерных экспериментов был рассчитан четырёхзеркальный Z-образный резонатор, схема которого приведена на плакате. Резонатор состоял из плоского глухого зеркала, двух поворотных зеркал с радиусами кривизны 100 мм и плоского выходного зеркала. Зеркало (100 мм) дополнительно имело просветляющее покрытие на длине волны накачки. В качестве источника накачки использовался лазерный диод мощностью 25 Вт с волоконным выходом. Диод излучал на длине волны 976 нм со спектральной шириной полосы 6 нм. Оптическая система фокусировала излучение накачки в активный элемент с размером перетяжки около 120 мкм, близким к размеру моды резонатора. Активный элемент толщиной 1,5 мм имел антиотражающие покрытия на длинах волн накачки (976 нм) и генерации (1520 нм). Охлаждение активного элемента осуществлялось с помощью элемента Пельтье и вентилятора. Пропускание выходного зеркала составляло 6 % на длине волны 1520 нм. Выходное излучение лазера имело линейную поляризацию  $\text{E} \perp \text{c}$  ( $\sigma$  – поляризация).

**(Плакат 6)** В непрерывном режиме генерации было получено лазерное излучение с максимальной выходной мощностью 1,5 Вт на длине волны 1522 нм и дифференциальной эффективностью по отношению к поглощенной мощности накачки 36 %. При дальнейшем увеличении мощности накачки наблюдался загиб выходной характеристики лазера, что свидетельствует о сильном влиянии термических эффектов в кристалле. В целях уменьшения влияния термических эффектов в активном элементе были проведены лазерные эксперименты с квазинепрерывной накачкой, для чего в канал накачки вводился механический модулятор со скважностью 20 %. Максимальная пиковая мощность выходного излучения составила 3,4 Вт на длине волны 1522 нм. Дифференциальная эффективность генерации по поглощенной мощности накачки при этом составила 47 %.

В заключение отметим следующее: в работе продемонстрирована генерация лазерного излучения на кристалле Er,Yb:YAB в спектральной области 1,52 мкм при диодной накачке. Дифференциальная эффективность генерации достигала значений 36 и 47 %, а выходная мощность – 1,5 и 3,4 Вт при непрерывной и квазинепрерывной накачке соответственно. Полученные значения выходной мощности лазера в непрерывном режиме генерации более чем в пять раз превосходят результаты для эрбиевых лазеров, известные из литературы.

В ходе выполнения работы создан макет непрерывного эрбиевого лазера, работающего на длине волны 1522 нм. Фото макета приведено на плакате.

Спасибо за внимание!

*Образец выписки с заседания совета ПСФ по утверждению темы магистерской диссертации и научного руководителя*

**ВЫПИСКА**

из протокола № 10

заседания совета приборостроительного факультета БНТУ  
от 25.06.2012 г.

Всего членов совета: 22 чел.

Присутствовало: 20 чел.

**СЛУШАЛИ:**

заведующего кафедрой «Лазерная техника и технология» Кулешова Н.В. о рекомендации для поступления в БНТУ в 2012 году для получения высшего образования II ступени по специальности 1-38 80 02 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» Змитровича Ивана Ивановича, закончившего в 2012 году БНТУ по специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы».

Предполагаемая тема магистерской диссертации – «Исследование методов повышения разрешающей способности дальномерного канала прибора наведения».

Предполагаемый научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Фёдорцев Р.В.

**РЕШИЛИ:**

рекомендовать для поступления в БНТУ для получения высшего образования II ступени по специальности 1-38 80 02 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» Змитровича Ивана Ивановича, закончившего в 2012 году БНТУ по специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы».

Утвердить тему диссертации «Исследование методов повышения разрешающей способности дальномерного канала прибора наведения».

Назначить научным руководителем кандидата технических наук, доцента Фёдорцева Р.В.

Председатель совета ПСФ  
Секретарь совета ПСФ

А.М. Маляревич  
М.И. Филонова

*Приложение Ю*

*Образец титульного листа магистерской диссертации*

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

Факультет приборостроительный  
Кафедра «Лазерная техника и технология»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Кулешов Н.В.

« \_\_\_\_ » *(декабрь или июнь)* 20\_\_ г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание степени магистра технических  
*(физико-математических)* наук

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА  
ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА  
В ПРОСТРАНСТВЕ ПО УГЛОВЫМ КООРДИНАТАМ**

Специальность 1-38 80 02 – «Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы»

Магистр

\_\_\_\_\_ Е. Ю. Рогожинский  
*(подпись, дата)*

Руководитель

кандидат технических наук,

доцент

\_\_\_\_\_ Р.В. Фёдорцев  
*(подпись, дата)*

**Минск 20 \_\_\_\_**

Учебное издание

**ФЁДОРЦЕВ** Ростислав Валерьевич  
**КУЗНЕЧИК** Валерия Ольгердовна  
**ЛУГОВИК** Алексей Юрьевич и др.

## **ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-38 01 02  
«Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»  
специализации 1-38 01 02 01 «Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы»  
и 1-38 01 02 02 «Лазерные системы и технологии»

Редактор *Т. Н. Микулик*  
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 15.10.2013. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 17,03. Уч.-изд. л. 13,32. Тираж 100. Заказ 1180.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.