

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное
образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

А. В. Астахов, Е. В. Полякова, В. Е. Стригалёв

**ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

рукопись

СПб ГУТ)))

Санкт-Петербург
2020

УДК 681.7(075.8)
ББК 22.34я73
А 91

Рецензенты:
кандидат технических наук,
доцент кафедры математики и естественно-научных дисциплин
Института международных образовательных программ, СПбГПУ
Н. Л. Урванцева,
кандидат технических наук, доцент кафедры СС
И. В. Гришин

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ
в качестве учебного пособия*

Астахов, А. В.

А91 Основы проектирования оптических приборов и систем : учебное пособие / А. В. Астахов, Е. В. Полякова, В. Е. Стригалёв ; СПбГУТ. – СПб., 2020. – 44 с.

Основной задачей учебного пособия является систематизация порядка разработки оптических схем приборов, а также их практическая реализация с учетом современного уровня технологий производства оптических деталей. Внимание уделено задачам, которые должны быть решены в ходе проектирования оптических схем с точки зрения совокупности показателей качества оптического прибора. Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 210700.68 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

**УДК 681.7(075.8)
ББК 22.34я73**

© Астахов А. В., Полякова Е. В., Стригалёв В. Е., 2020

© Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	4
2. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЕМЫЕ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	6
2.1. Виды проектных работ	8
2.2. Стандарты оптического приборостроения	9
3. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА.....	10
3.1. Показатели качества оптических деталей	10
3.2. Показатели качества оптических бесцветных стекол	10
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ	11
4.1. Физико-химические характеристики оптических стекол	11
4.2. Требования к выбору материала оптических деталей.....	13
5. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ.....	14
6. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	15
7. РАСЧЕТ ПРИПУСКА НА ОБРАБОТКУ ЗАГОТОВКИ	18
7.1. Допуски по кривизне, форме, классам чистоты оптических деталей	19
7.2. Допуск формы исполнительных оптических поверхностей	20
8. СТРУКТУРА ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА.....	22
9. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	23
10. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	24
11. ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ЧЕРТЕЖАХ И СХЕМАХ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	25
12. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ.....	26
13. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ	33
14. КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ.....	35
14.1. Лупы. Микроскопы	36
14.2. Телескопы	37
14.3. Бинокли	38
14.4. Оптические прицелы.....	39
14.5. Оптические дальномеры.....	39
14.6. Диаскоп	40
14.7. Спектральные приборы	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	42

1. ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Прибор называют оптическим, если хотя бы одна его основная функция выполняется оптической системой.

Оптическая система – это совокупность оптических сред, разделенных оптическими поверхностями, которые ограничиваются диафрагмами. Оптическая система предназначена для формирования изображения путем перераспределения в пространстве электромагнитного поля, исходящего из предмета (преобразования световых пучков). Преобразование световых пучков в оптической системе происходит за счет преломления и отражения света поверхностями, а также за счет ограничения пучков диафрагмой. Кроме того, пучки света могут преобразовываться за счет дифракции.

Оптическая схема – графическое представление процесса изменения света в оптической системе.

Существует громадное количество различных видов и типов оптических приборов, а также способов их классификации.

1. По дальности действия оптического прибора:

- приборы дальнего действия (телескопические трубы, фотоаппараты);
- приборы ближнего действия (лупы, микроскопы и др.).

2. По положению предмета и изображения относительно оптической системы прибора:

- предмет и изображение на бесконечном расстоянии, входящие и выходящие пучки лучей, несущие информацию о точке предмета, образуются параллельными лучами (телескопические системы);

- предмет на конечном расстоянии, изображение в бесконечности, входящий пучок расходящийся, выходящий – параллельный (лупа, микроскоп);

- предмет в бесконечности, изображение на конечном расстоянии (фотоаппаратура, киносъёмочная аппаратура);

- предмет и изображение на конечном расстоянии (репродукционные фотоаппараты, фототрансформаторы, фотоувеличители и др.).

3. По принципу действия оптических поверхностей системы:

- диоптрические приборы (рефракторы), оптическая система образована только преломляющими поверхностями;

- катоптрические приборы (рефлекторы), оптическая система образована только отражающими, зеркальными поверхностями;

- катодиоптрические приборы (зеркально-линзовые), состоящие из линз и зеркал.

4. По типу приемников оптического излучения:

- визуальные (приемник-глаз);

- оптико-электронные (приемник-фотокатод);
 - фотографические (приемник-фотоэмульсия).
5. По использованию диапазона оптического излучения:
- для видимой части спектра (380–80 нм);
 - инфракрасные (780 нм–1 мм);
 - ультрафиолетовые (10–380 нм).
6. По условиям, в которых работает прибор:
- лабораторные;
 - полевые;
 - морские;
 - авиационные;
 - космические;
 - подводные;
 - работающие в условиях повышенной радиации, температуры и др.
7. По области применения и решаемой задаче:
- телекоммуникационные;
 - астрономические;
 - геодезические;
 - фотографические;
 - киносъемочные;
 - навигационные;
 - увеличительные;
 - медицинские;
 - осветительные;
 - колориметрические;
 - спектральные;
 - контрольно-юстировочные;
 - контрольно-измерительные и др.

Номенклатура подобных приборов, а также оптических функциональных устройств и элементов, используемых в оптическом приборостроении, достигает нескольких тысяч наименований.

В рамках изучения студентами дисциплины «Проектирование оптических приборов и систем» представляется неоправданной подготовка специалистов, например, только по телекоммуникационным приборам, по микроскопии или по гироскопической технике. Следует изучать методы, общие правила и принципы проектирования и конструирования оптических приборов, которые используются при создании, как всех технических изделий, так и их различных видов и классов, объединенных общими целевыми признаками.

2. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЕМЫЕ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

На всех этапах конструирования оптических приборов конструктор должен находить технические решения, обеспечивающие соответствие создаваемого прибора требованиям не только технического задания, но и требованиям, не отраженным в техническом задании, но выполнение которых необходимо в любом техническом проекте. Речь идет о требованиях, обеспечивающих создание качественного оптического прибора.

В соответствии с ГОСТ 22851–77, ГОСТ 15467–79 качеством прибора (продукции) называется совокупность свойств прибора, обуславливающих пригодность прибора в соответствии с назначением. Показатели качества оптического прибора характеризуют технико-экономические особенности прибора и классифицируются по следующим основным группам.

Показатели назначения – характеризуют назначение, область применения, производительность, точность, светосилу, разрешающую способность, дальность действия, габаритные размеры, массу и т. п.

Это наиболее многочисленная группа показателей качества изделий. Для оптических приборов существуют как общие показатели назначения (показатели точности функционирования, качества изображения, создаваемого оптическими системами), так и частные (показатели, характеризующие параллельность визирных осей бинокулярных приборов, увеличение микроскопов, светосилу фотографических приборов, мощность излучения лазерных приборов и т. д.).

Показатели надежности – характеризуют безотказность (свойство прибора сохранять работоспособность в течение некоторого времени или наработки без вынужденных перерывов), долговечность (свойство прибора к длительной эксплуатации с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов), ремонтпригодность (приспособленность прибора к предупреждению, обнаружению и устранению отказов путем технического обслуживания и ремонтов) и сохраняемость (свойство прибора сохранять обусловленные показатели в течение и после срока хранения и транспортировки).

Показатели технологичности – характеризуют степень соответствия прибора, элементов оптимальным условиям современного производства. Важнейшими технологическими показателями качества прибора являются, например, коэффициент сборности (блочности), коэффициент использования рациональных материалов, удельная трудоемкость.

Эргономические показатели – характеризуют степень приспособленности прибора к взаимодействию с человеком с позиции удобства работы, гигиены, безопасности труда. Эргономические показатели разделены на гигиенические (уровень шума, амплитуда и частота вибраций, уровень ра-

диации, температура, степень токсичности и т. п.), антропометрические (размеры и расположение экранов, индикаторов, рукояток и т. п.), психофизиологические (диапазоны усилий на рукоятках, скорость выполнения движений, уровень освещенности, цвет и яркость световых сигналов, тембр и сила звуковых сигналов и т. д.), психологические (объем и интенсивность потока информации, количество и частота выполняемых операций, количество и расположение контрольных, сигнальных, управляемых элементов и т. д.).

Эстетические показатели – характеризуют внешний вид прибора, его соответствие современному стилю, гармоничность сочетания отдельных элементов прибора друг с другом, соответствие формы прибора назначению, качество и совершенство отделки внешних элементов, поверхностей и упаковки, выразительность и качество надписей, знаков, технической документации (проспекта, каталога, инструкции, паспорта).

Показатели стандартизации и унификации – характеризуют степень использования и применения в данном приборе стандартизованных, унифицированных и заимствованных узлов и деталей. Чем больше таких элементов будет в проектируемом приборе, тем меньше затраты на их конструирование, технологическую подготовку производства, выше, как правило, надежность функционирования, проще организация обслуживания и ремонта.

Патентно-правовые показатели – характеризуют степень новизны технических решений в приборе и определяются патентоспособностью¹ и патентной чистотой².

Экономические показатели – характеризуют уровень затрат на производство и эксплуатацию оптического прибора, полную себестоимость и оптовую цену прибора.

Показатели безопасности – характеризуют степень защищенности людей и животных от опасного воздействия прибора (защита от электрического удара, электромагнитного поля, теплового воздействия, радиации, оптического излучения, шума, вибрации и т. д.), а также самих приборов от климатических, механических, биологических и других воздействий на них. Такими показателями, например, являются категория, класс исполнения и эксплуатации.

Экологические показатели – характеризуют степень вредного влияния на окружающую среду и ее загрязнение при изготовлении, эксплуатации и утилизации приборов.

¹ Патентоспособным является решение, которое может быть признано изобретением в одной или нескольких странах.

² Патентной чистотой обладают решения, не попадающие под действие (не нарушающие прав) других патентов.

Следует обратить внимание на то, что именно при проектировании и конструировании оптического прибора (а не при изготовлении, эксплуатации) закладываются потенциальные возможности будущего прибора, возникает возможность наиболее эффективно повысить все показатели качества по сравнению с существующими техническими решениями (прототипом).

2.1. Виды проектных работ

Проект содержит техническое описание оптического прибора, необходимое и достаточное для его производства, т. е. совокупность схем, чертежей, описаний технических процессов и т. д. Любое производство соответствующего профиля и уровня, точно следуя проекту, должно быть в состоянии изготовить прибор или серию приборов, которые будут обладать именно теми значениями характеристик, которые были указаны в техническом задании.

Проект описывает устройство оптического прибора, определяя из каких частей он состоит, как взаимодействуют между собой эти части, как они изготавливаются и собираются, как прибор настраивается и юстируется.

Основными видами проектных работ по созданию оптических приборов являются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИР и ОКР). НИР выполняются с целью решения проблемных вопросов, поиска принципиальных возможностей построения структуры оптических приборов, исследования новых принципов их функционирования и получения исходного материала для ОКР. Основным объемом НИР составляет функциональное проектирование. Конструирование обычно выполняется упрощенно.

Результатом такого проектирования является макет оптического прибора. Он позволяет провести экспериментальные испытания. Объем технологического проектирования в процессе НИР существенно сокращен. Важными этапами НИР являются исследование и испытание макетов отдельных узлов и макета в целом (экспериментирование). Это позволяет получить заключение о возможности создания прибора и сформулировать техническое задание на ОКР. НИР завершается составлением отчета, с изложением всех сведений, полученных при ее проведении.

ОКР выполняется с целью разработки конструкторской документации, изготовления и испытания опытного образца. По результатам испытания опытного образца дается заключение о возможности изготовления установочной серии приборов с последующим переходом к серийному или массовому производству в зависимости от потребностей.

Порядок выполнения проектных работ регламентируется целым рядом стандартов. На территории России проектирование оптических прибо-

ров ведется в соответствии с *Единой системой конструкторской документации (ЕСКД)*, которая представляет собой комплекс государственных стандартов, устанавливающих единый порядок разработки, оформления и обращения конструкторской документации. В соответствии с ЕСКД (ГОСТ 2.103–68) проектирование оптических приборов может быть представлено в виде последовательности этапов, в ходе которых разрабатывают:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочую документацию.

Исходные данные для начала процесса проектирования формулируются в специальном документе – техническом задании. *Техническое задание (ТЗ)* устанавливает, какими свойствами или характеристиками должен обладать прибор после его изготовления.

2.2. Стандарты оптического приборостроения

В оптическом приборостроении следует руководствоваться следующими группами стандартов:

- ISO 9211. Optical coatings;
 - ISO 9336. Optical transfer function;
 - ISO 10110. Preparation of drawings for optical elements and systems;
 - ISO 11146, 11151; 11554. Lasers and laser-related equipment;
 - ГОСТ 1807–75. Радиусы сферических поверхностей оптических деталей; ряды числовых значений радиусов;
 - ГОСТ 2736–82. Стекла пробные для проверки радиусов кривизны оптических поверхностей;
 - ГОСТ 3361–75. Окуляры и тубусы микроскопов. Присоединительные размеры;
 - ГОСТ 7427–76. Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения;
 - ГОСТ 7601–76. Физическая оптика. Обозначения основных величин;
 - ГОСТ 11141–84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей.
- Методы контроля;
- ГОСТ 3514–94. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия. Настоящий стандарт распространяется на оптическое бесцветное неорганическое стекло, выпускаемое в заготовках размером (диаметром или с наибольшей стороной) не более 500 мм по ГОСТ 13240 для нужд экономики страны и экспорта;

- ГОСТ 15130–86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия;
- ГОСТ 3516–3522. Методы оценки качества стекла (однородность, двулучепреломление, бесцветность, пузырность);
- ГОСТ 23136–93. Материалы оптические. Параметры;
- ГОСТ 2.412–81. ЕСКД. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.

Стандарты, относящиеся к одной и той же тематике, объединяют в сборники (например, стекло оптическое). Некоторые сборники стандартов официально объединяются под единым названием (ЕСКД – единая система конструкторской документации; ЕСПД – единая система программной документации). Кроме стандартов разработано большое количество другой нормативной документации (ведомственные нормативы, руководящие материалы, технические условия). Предприятия, выпускающие продукцию на экспорт, должны согласовать проектные решения со стандартами той страны, в которую экспортируется изделие.

3. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА

3.1. Показатели качества оптических деталей

Выбор и назначение нормируемых показателей качества на все оптические материалы производится в соответствии с ГОСТ 23136–93. В зависимости от вида материала оптической детали возможна следующая классификация:

- стекло кварцевое оптическое, ГОСТ 15130–86;
- стекло оптическое цветное, ГОСТ 9411–91;
- стекло оптическое бесцветное, ГОСТ 3514–94.

Требования к оптической детали (например, стекло оптическое, бесцветное) представлены в совокупности:

- показателей качества оптических бесцветных стёкол;
- требований к изготовлению оптической детали;
- оптических параметров детали.

3.2. Показатели качества оптических бесцветных стекол

Качество изображения, создаваемого оптическим прибором, находится в прямой зависимости от качества материала, из которого изготовлены составляющие его оптические узлы и детали. В зависимости от задач, решаемых прибором в целом, а также его отдельными элементами, к заготовкам оптических деталей предъявляют вполне определенные требования.

В соответствии с ГОСТ 3514–94 для оптического бесцветного неорганического стекла в заготовках размером (диаметром или наибольшей стороной) не более 500 мм нормируются следующие параметры:

- показатель преломления n_d ;
- средняя дисперсия $n_{F'} - n_{C'}$;
- оптическая однородность, которая оценивается по разрешающей способности;
- двойное лучепреломление, характеризующее разность хода лучей, образованных при раздвоении поляризованного луча в процессе прохождения его через напряженное стекло;
- радиационно-оптическая устойчивость (стекла серии 100);
- показатель ослабления e_A (характеризуется светопоглощением стекла и представляет собой величину, обратную расстоянию, на котором поток излучения от источника типа A ослабляется в результате поглощения и рассеяния в 10 раз);
- бессвильность, характеризующая количество и величину свилей³ в оптической детали;
- пузырность, характеризующая количество и величину пузырей в оптической детали.

Все эти требования могут быть сведены в две группы: основные, определяющие качество детали, и дополнительные. В зависимости от функционального назначения деталей эти требования можно группировать различными способами. Необоснованное снижение основных требований к материалу оптической заготовки приводит к заметному ухудшению качества изображения, создаваемого оптическими элементами, значительному усложнению технологии их обработки, а иногда и невозможности их изготовления. Повышение требований к показателям, которые не являются определяющими, не обеспечивает заметного улучшения работы прибора в целом, но повышает его себестоимость.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

4.1. Физико-химические характеристики оптических стекол

Механические свойства стекла оцениваются следующими показателями: плотность, прочность, твердость, хрупкость, упругость.

³ Свилы являются резко выраженными локальными оптическими неоднородностями стекла. Они представляют собой прозрачные нитевидные или слоистые включения, имеющие показатель преломления, отличный от показателя преломления основной массы стекла.

Плотность ρ – это масса единицы объема. В зависимости от состава стекла значение ρ колеблется в пределах от 2,30 г/см³ (стекло ЛК7) до 6,79 г/см³ (стекло СТФ11). Значения плотности, необходимые для расчета массы оптической детали и заготовки, приведены в каталоге для каждой марки стекла.

Прочность стекла как конструктивного материала характеризуется стандартными параметрами: модулем упругости E и модулем сдвига G , связанными между собой соотношением

$$E = 2G(1 + \mu),$$

где μ – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Для оптических стекол $E = (4,8–11,5) \cdot 10^7$ кПа, $\mu = 0,17 – 0,31$.

Стекло имеет различную прочность на растяжение и сжатие. Значение прочности определяется предельными напряжениями σ , вызывающими разрушение образца.

Специфической особенностью стекла является сравнительно высокая прочность при сжатии $\sigma_c = (5–10) \cdot 10^7$ Па.

Прочность на растяжение σ_p в 15–20 раз меньше. Стекло практически не имеет пластических свойств, плохо сопротивляется действию изгибающих и ударных нагрузок.

Хрупкость стекла приводит при обработке к образованию сколов на краях и ребрах оптических деталей. Прочность стекла в значительной степени зависит от состояния его поверхностей – наличия царапин и трещиноватого слоя, образующегося при обработке.

Прочность стекол можно повысить глубоким шлифованием и полированием, при котором удаляют поверхностный трещиноватый слой и сохраняют высокое качество поверхности. Для повышения прочности стекло подвергают закалке. Удаление дефектного поверхностного слоя травлением повышает прочность стекла в 2–4 раза, но снижает качество поверхности.

Твердость – это способность материала сопротивляться проникновению в него другого тела. Различают твердость:

- склерометрическую, характеризуемую шириной царапины, образующейся на поверхности стекла при царапании иглой с радиусом закругления 2 мкм;
- абразивную – определяемую по скорости сошлифовывания;
- микротвердость – определяемую по отпечатку вдавливаемого в стекло индентора⁴ в виде пирамиды.

В оптическом приборостроении пользуются относительной твердостью по сошлифовыванию $H_{отн}$ – это соответствует отношению объема

⁴ Индентор (англ. indenter от indent – вдавливать) – это изготовленный из алмаза, твердого сплава или закаленной стали наконечник прибора, используемого для измерения твердости.

сошлифованного стекла марки К8 к объему сошлифованного стекла другой испытываемой марки в стандартных условиях обработки. Наибольшая твердость у кварцевого стекла и ситаллов ($H_{отн} = 1,5 \dots 1,9$), наименьшая у стекол ФК ($H_{отн} = 0,2$) и тяжелых флинтгов ТФ ($H_{отн} = 0,5$).

Фотоупругие свойства стекла проявляются при возникновении упругих деформаций в образце. Стекло становится веществом анизотропным, что приводит к появлению двойного лучепреломления: луч света, проходящий через стекло, поляризуется и расходится на два луча – обыкновенный и необыкновенный, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны. Это явление, специфичное для прозрачных материалов, называют фотоупругостью. Показатели преломления стекла для поляризованных лучей отличаются от показателей преломлений стекла в ненапряженном состоянии. Фотоупругость стекла характеризуется фотоупругими постоянными, выражающими приращение значения показателя преломления стекла для лучей света, поляризованных в направлениях, параллельном и перпендикулярном действию напряжения, а также оптическим коэффициентом напряжения. Оптический коэффициент напряжения определяет разность оптического хода поляризованных лучей в стекле и характеризует двойное лучепреломление. После снятия напряжения стекло становится изотропным материалом.

4.2. Требования к выбору материала оптических деталей

Необходимо всегда учитывать условия эксплуатации оптического элемента или прибора. Если конструируется линза, то ее материал должен быть прозрачным для рабочего диапазона длин волн света. Если линза будет эксплуатироваться в условиях тропического или морского климата, необходимо выбрать материал, стойкий к воздействию влаги, грибков, соли и других вредных факторов.

Технологичными считаются материалы, которые легко обрабатываются резанием, шлифуются, штампуются, свариваются, спекаются. При выборе материала деталей, взаимодействующих с человеком как непосредственно, так и косвенно, учитывается безопасность производственного цикла. Например, такой перспективный для изготовления космических зеркал материал, как бериллий, обладающий для этого рядом очень хороших характеристик, является весьма токсичным при обработке, что ограничивает его использование в оптических приборах.

В общем случае решение задачи по выбору материала оптической детали является многовариантным, так как требования к точности, надежности, массе, прочности, жесткости, экономичности, эстетичности и др. вступают в противоречие друг с другом, которое приходится преодолевать, оптимизируя выбор материала с помощью ранжирования значимости по-

казателей качества детали и свойств материала. Весьма часто выбор материала производится с помощью расчета необходимых значений некоторых его характеристик по требуемым показателям качества (например, марок и оптических констант стекла по допустимым абберациям⁵ системы). Необходимо постоянно следить за появлением новых материалов, а также пытаться использовать нетрадиционные (для ответственных деталей) материалы, которые благодаря своим свойствам могут повысить показатели качества проектируемого изделия. Использование титанового сплава ВТ-1 при изготовлении оправ некоторых оптических деталей позволяет избежать их температурных деформаций благодаря равенству (близости) коэффициентов линейного расширения титана и многих марок оптического стекла.

Наиболее типичным примером использования новых и нетрадиционных материалов при конструировании деталей являются зеркала космических телескопов, которые в настоящее время изготавливают из таких материалов как ситалл, карбид кремния, боросиликат, композит.

Более технологичными являются типовые поверхности, получаемые при обработке деталей на универсальном оборудовании типовым инструментом. Специальные формы поверхностей получают, используя фасонный инструмент, специализированное оборудование и оснастку, что существенно снижает технологичность таких поверхностей по сравнению с типовыми. Это обстоятельство может повлиять на конструкцию не только детали, но и изделия в целом. Так, при создании конструкции космического зеркального объектива для фотографирования ядра кометы Галлея (международный проект «Вега», 1986 г.) из двух разработанных вариантов, обеспечивающих одинаковое качество изображения, была выбрана и изготовлена конструкция основывающаяся на сферических зеркалах, в то время как вторая схема объектива базировалась на асферических зеркальных поверхностях.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Требования к изготовлению оптической детали заключаются в следующих пунктах:

1) допустимое отклонение стрелки кривизны поверхности детали (N), выраженное в интерференционных кольцах Ньютона, от стрелки кривизны поверхности пробного стекла данного радиуса или допустимая сферичность плоской поверхности;

⁵ Абберации оптических систем (лат. aberratio – уклонение), погрешности изображений, даваемых оптическими системами.

2) число интерференционных колец или полос, определяющее допуск формы поверхности (DN);

3) допуск на децентрировку (c), т. е. на взаимное расположение сферических и цилиндрических поверхностей линзы, их относительный поворот и смещение;

4) допуск на дефекты чистоты полирования (P), который выражают в классах чистоты оптической поверхности по ГОСТ 11141–84;

5) допуск на радиусы пробных стекол (R_D), выраженный в процентах от значения номинальных радиусов или в долях интерференционных полос для плоских поверхностей, соответствующий ГОСТ 2786–82;

6) допуск на клиновидность (Q) или на разнотолщинность, выражают в угловой мере;

7) допуск на пирамидальность призмы (p) выражают в угловой мере (угол между ребром призмы и противоположащей гранью);

8) допуск на разность равных по номинальному значению углов призмы (O_d) выражают в угловой мере с цифровым индексом угла;

9) допустимое значение предела разрешения (e) выражают в угловой мере, значение e определяет влияние всех требований, предъявляемых к материалу детали и к разрешающей способности призмы. Оптические параметры детали: фокусное расстояние (f') и фокальные отрезки (a , a'). Световой диаметр детали (D), для призм – геометрическая длина ($св$) хода луча которая определяется при габаритном расчете в зависимости от типа призмы и светового диаметра на ее входной грани.

6. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Заготовки оптических деталей из оптического стекла получают в виде прямоугольных или круглых пластин, плиток, штабиков и прессовок. На обработку заготовки поступают партиями, состоящими из заготовок одного наименования и размера. К партии прикладывают сопроводительный паспорт, в котором указывают фактические значения оптических характеристик стекла, показатели качества, номер отжига. Наиболее рациональной заготовкой деталей типа линзы и призмы является прессовка, повторяющая конфигурацию готовой детали. Для изготовления прессовок необходима технологическая оснастка: прессформа, шаблоны и др. Стоимость оснастки окупается только при прессовании определенного числа заготовок. Поэтому ГОСТ 13240–78 «Заготовки оптического стекла» устанавливает минимальный объем партии заготовок, поставляемых в виде прессовок (табл. 1).

Таблица 1

Объем заказа, шт.	Масса заготовки, г.
2000	1,5–10
1000	10–15
250	50–100
150	100–250
100	250–500

Технические условия (ТУ) на заготовку составляют на основе чертежа оптической детали. В ТУ приводится эскиз заготовки с необходимыми для изготовления и контроля размерами и допусками, указывается марка стекла, технические требования к стеклу и заготовке, масса и число заказываемых заготовок в штуках.

Маршрутную технологию (МТ) изготовления заготовки технолог разрабатывает с учетом требований к стеклу, размерам партии и габаритным размерам детали. Выбирается метод и последовательность операций на основе типовых технологических процессов. Номер маршрутной технологии указывают в ТУ на заготовку.

Коэффициент запуска (КЗ) равен отношению массы сырьевого стекла, необходимого для изготовления заготовки, к теоретической массе заготовки, КЗ устанавливают на основе имеющихся нормативов и выбранной МТ. Коэффициент запуска зависит от требований к показателям качества стекла. Например, для заготовок линз фотооптики диаметром 20–50 мм значение КЗ находится в пределах 2–3. Размеры заготовки рассчитывают с учетом необходимого припуска на обработку и предельных отклонений размеров. Значение припуска зависит от выбранной технологии, метода базирования детали при обработке и толщины дефектного слоя поверхности заготовки. Для заготовок-прессовок размером до 150 мм толщина заготовок для линз не должна быть менее 3 мм, для плоских деталей не менее 4 мм, отношение диаметра или диагонали заготовки к ее толщине должно быть в пределах от 15:1 до 1,25:1.

Технологические процессы изготовления заготовок оптических деталей можно разделить на две группы:

- холодная разделка;
- горячее формование.

При *холодной разделке* сырьевое стекло (стеклоблоки, плитку) после визуального осмотра и разметки раскалывают или распиливают алмазным инструментом.

Горячее формование заготовок осуществляют в формах из кусочков стекла, разогретых до температуры пластической деформации, или жидкой стекломассы, вырабатываемой из ванной стекловаренной печи.

Горячее формообразование заготовок может осуществляться двумя способами:

- моллирование;
- прессование.

Моллирование – процесс, в ходе которого поверхность заготовки, обращенная к рабочей части формы, под действием нагрева за счет пластической деформации материала заготовки принимает эту форму, а внешняя поверхность заготовки деформируется так, что получается требуемая поверхность, не нуждающаяся в последующей обработке (рис. 1).

Моллирование может быть рекомендовано для серийного изготовления светотехнических и оптических деталей, например, зеркал осветительных светособирающих устройств, приборов, обтекателей, иллюминаторов, рабочие поверхности которых образованы эквидистантными сферическими или асферическими поверхностями.

В процессе моллирования оптическая деталь должна принимать форму только под действием своего веса, на поверхность нельзя прикладывать нагрузку. В отличие от технологии прессования при моллировании с контурной рамкой соприкасается только одна поверхность стекла.

Прессование – процесс изготовления оптических деталей методом давления при температуре. Суть метода состоит в том, что стеклянные заготовки необходимого размера сначала нагревают до температуры прессования, а затем прессуют с помощью пресс-форм, придавая им заданную форму. Так, всего за один раз, без последующей обработки, производится стеклянная оптическая компонента (рис. 2).

Тонкий отжиг – последняя операция технологического процесса изготовления заготовок оптических деталей. Его цель – снизить до минимально допустимых значений остаточные термические напряжения в стекле, т. е. ликвидировать физические неоднородности и получить заготовки с одинаковыми для данной партии значениями показателей преломления и дисперсии.

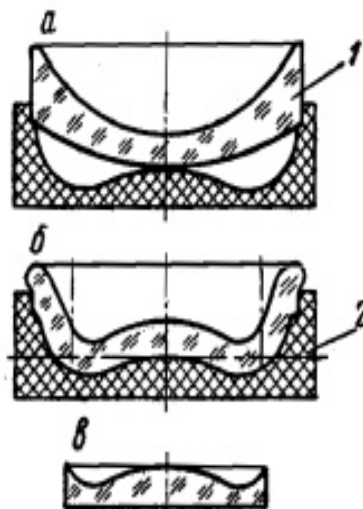


Рис. 1. Процесс моллирования. Этапы процесса моллирования: а) исходная заготовка 1 уложена в форму; б) процесс моллирования завершен; в) готовая деталь вырезана из моллированной заготовки по линиям 2

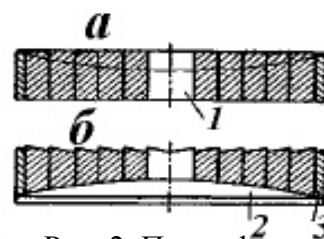


Рис. 2. Пресс-форма для пластического формования оптических деталей: а) исходный набор колец; б) готовая пресс-форма для формования линз Френеля: 1 – заглушка; 2 – шаблон; 3 – центрующее кольцо

7. РАСЧЕТ ПРИПУСКА НА ОБРАБОТКУ ЗАГОТОВКИ

Выбор оптимальных припусков имеет большое технико-экономическое значение при проектировании технологических процессов, так как завышение припусков приводит к перерасходу материалов, инструмента, увеличению трудоемкости и себестоимости изготовления деталей. Заниженные припуски увеличивают материальный брак, требуют повышенной точности установки заготовок на приспособлениях и т. п. В оптическом производстве принят опытно-статистический метод установления припусков, основу которого составляют систематизированные и обобщенные данные предприятий. Опытные значения припусков завышены по сравнению с расчетно-аналитическими, так как в них закладываются такие условия изготовления заготовок и их механической обработки, при которых возможен минимальный материальный и технологический брак. Припуск z_t на толщину по оси заготовок линз и пластин устанавливают от верхнего предела допуска на размер готовой детали. Величину z_t , которая лежит в пределах от 1,8 до 8,0 мм, назначают в зависимости от диаметра D_0 круглых или наибольшей стороны некруглых пластин:

$$z_t = 0,014D_0 + 1,22 \text{ мм.}$$

Припуск z_d на диаметр устанавливают от номинального размера готовой детали от 1,5 до 12 мм. Назначают z_d так же, как и припуск на толщину по оси, в зависимости от диаметра детали. При толщине края более 0,3 мм:

$$z_d = 0,022D_0 + 1,05 \text{ мм.}$$

При толщине менее 0,3 мм краевая зона заготовки деформируется в процессе обработки и усложняет формообразование. Уменьшая припуск на диаметр, увеличивают толщину края заготовки, а вместе с тем и ее жесткость.

Припуски на радиусы кривизны R_3 сферических поверхностей прессованных заготовок устанавливают в зависимости от назначенного ранее припуска z_t на толщину по оси и коэффициента k , предусматривающего утолщение или утоньшение заготовки по краю. Радиус увеличивают (+) при обработке с края и уменьшают (–) при обработке с центра:

$$\begin{aligned} +R_3 &= +R_0 + z_t / 2 \pm k \text{ (для выпуклых поверхностей);} \\ -R_3 &= -R_0 + z_t / 2 \pm k \text{ (для вогнутых поверхностей),} \end{aligned}$$

где R_0 – радиус кривизны готовой детали.

Коэффициент k находят из выражения:

$$k = \left(\frac{R_0}{D_0} \right)^2.$$

Припуски на длину и ширину некруглых пластин устанавливают от номинального размера готовой детали. Их значения от 0,5 до 4,0 мм назначают по размеру наибольшей стороны детали.

Номинальные размеры заготовок (толщину, диаметр, длину, ширину) определяют с учетом соответствующего номинального размера готовой детали, поля допуска на данный размер, припуска на механическую обработку и допуска по ГОСТ 13240–78 на размер заготовок, изготавливаемых методом прессования.

7.1. Допуски по кривизне, форме, классам чистоты оптических деталей

Полированные поверхности оптических деталей имеют отклонения от заданных геометрических размеров по стрелке кривизны и форме, а также по классам чистоты.

Допуск на стрелку кривизны исполнительных оптических поверхностей измеряют числом интерференционных колец N , укладываемых на диаметре детали при контроле пробным стеклом (оптическим калибром).

Контроль сферических и плоских полированных оптических поверхностей осуществляют с помощью пробных стекол или интерферометров на рабочем месте и в ОТК⁶: сравнивают кривизну контролируемой поверхности детали с кривизной измерительной поверхности пробного стекла. При наложении пробного стекла на контролируемую поверхность в тонком, переменном по толщине воздушном промежутке происходит интерференция света. Интерференционная картина при освещении белым светом имеет вид радужных колец или полос. В монохроматическом свете она состоит из темных и светлых колец или полос.

В некоторых случаях N указывают со знаками плюс или минус. Это означает, что при знаке плюс наблюдается воздушный зазор на краю, касание в центре – «общий бугор», а при знаке минус – зазор в центре, касание на краю – «общая яма» (рис. 3). Для плоской поверхности это означает, что при знаке плюс она слегка выпуклая, а при знаке минус слегка вогнутая.

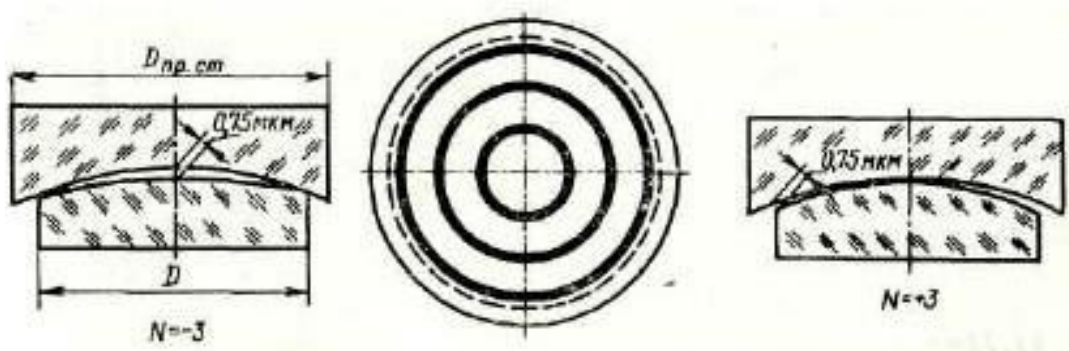


Рис. 3. Измерение пробным стеклом отклонений кривизны поверхности линзы

⁶ ОТК – отдел технического контроля.

Количество интерференционных колец или полос проставляется рядом с численным выражением, например $N = 3$. Одно кольцо в линейной мере соответствует толщине воздушного промежутка в 0,2 мкм; 3 кольца – 0,75 мкм.

Значениям N пропорциональна толщина слоя стекла, который надо споллировать, чтобы сделать отклонение кривизны поверхности меньше допустимой, заданной чертежом. Толщина этого слоя по оси увеличивается пропорционально квадрату диаметра детали. Трудности обработки в процессе полирования в связи с этим возрастают ориентировочно пропорционально квадрату или кубу диаметра детали; при этом следует учесть, что полирование выполняется приблизительно в 20 раз медленнее шлифования.

Получение значений N , меньше заданных чертежом, составляет одну из главных задач, решаемых на операциях шлифования и полирования. При единичном производстве решение этой задачи требует высокой квалификации для непрерывного управления параметрами геометрии инструмента и настройки станка. При этом необходимо учитывать еще ряд технологических факторов: характер изменения кривизны поверхности в зависимости от физических свойств данной марки стекла, способа блокировки, теплового режима обработки и т. п.

Значительную долю допусков на N составляют отклонения, возникающие при обработке в зависимости от способа крепления заготовки. Например, при эластичном блокировании можно получить $N < 1$, а при жестком блокировании $N = 2 - 5$.

При серийном производстве требуется тщательная отработка технологического процесса с последующей его стабилизацией для надежного получения заданных N по методу автоматического получения размера при заданной настройке станка.

7.2. Допуск формы исполнительных оптических поверхностей

Если на поверхности детали имеются местные отклонения от сферической формы, то они приводят к местным искривлениям интерференционных полос. Местные отклонения ΔN измеряются в долях полосы и определяются отношением изогнутости h местного искривления полосы к ее ширине H :

$$\Delta N = h / H .$$

Интерференционные картины характерных местных ошибок показаны на рис. 4.

Если на интерференционной картине кольца вытянуты в одном и сжаты в другом направлении или изогнутые полосы не составляют часть

окружности, то имеется общее отклонение формы поверхности от сферической. Это отклонение называют астигматизмом поверхности.

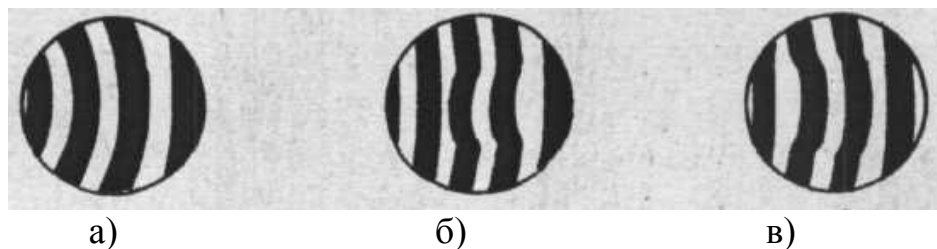


Рис. 4. Интерференционные картины местных ошибок (а, б, в)

Геометрически это означает, что оптическая поверхность стала сфероцилиндрической. Интерференционные картины для ряда типовых aberrаций приведены на рис. 5.

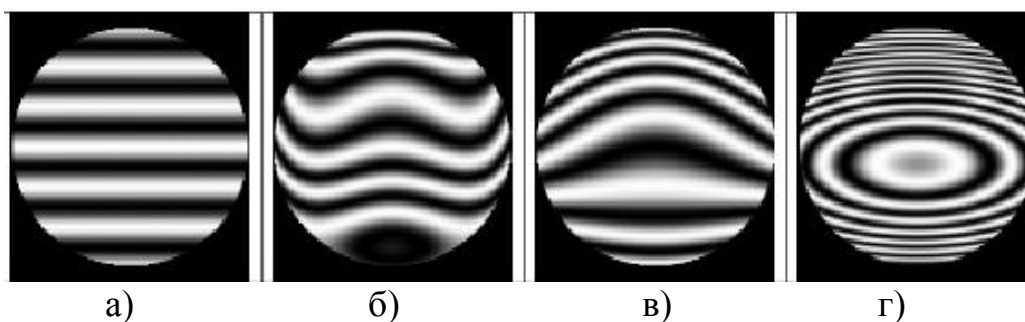


Рис. 5. Форма интерференционных картин для ряда типовых aberrаций: а) отсутствие aberrаций, б) сферическая aberrация, в) кома, г) астигматизм

Местные ошибки формы оптических поверхностей уменьшают предел разрешения системы, что не компенсируется размерами толщин и радиусов линз, воздушных промежутков. Поэтому подход к допустимым значениям ΔN строже, чем к N (табл. 2). Местные ошибки возникают как результат резкого несоответствия размеров инструмента и обрабатываемой поверхности, грубых ошибок в настройке станка, наличия неоднородностей и разной температуры притирающихся материалов.

Таблица 2

Элементы оптических приборов		Допуски на оптические поверхности			
		По кривизне, N	По форме, ΔN	По классам чистоты, p	
Объективы	коллиматоров, астрономические	1–3	0,2–0,3	VII, VIII	
	телескопические	3–5	0,3	IV, V	
	аэрофотосъемочные	1–3	0,1–0,5	IV–VI	
	фотографические	3–5	0,3–0,5	IV–VI	
	микроскопов	до 10	2–3	0,2–0,5	III
		от 10 до 40	1–2	0,1–0,2	II
свыше 40		0,5–1	0,1–0,2	III–V	

Элементы оптических приборов	Допуски на оптические поверхности		
	По кривизне, N	По форме, ΔN	По классам чистоты, p
Окуляры, лупы	3–5	0,5–1	III–V
Призмы	отражающие поверхности	0,5–1	II, III
	преломляющие поверхности	2–4	III, IV
Сетки и коллективы	5–10	1–2	0–10, 0–20, 0–40
Защитные стекла и светофильтры перед объективом	3–5	0,3–0,5	V
Светофильтры за и перед окуляром	5–10	0,8–2	II, III
Зеркала	1–2	0,2–0,3	III, IV

Допуск на дефекты чистоты полирования P_A , P_B выражают в классах чистоты оптических поверхностей по ГОСТ 1114–76, в котором оговорены размеры и число дефектов – царапин и точек.

В расчетах, проводимых в учебных целях, можно использовать значения допусков (табл. 2), назначаемых на показатели качества оптических деталей.

8. СТРУКТУРА ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Оптический прибор предназначен для преобразования информации от объекта наблюдения (обнаружения), измерения или управления. На рис. 6 показана обобщенная схема функционирования оптического прибора.

В оптических приборах происходит преобразование вида:

$$y = f(x, q_i),$$

где f – функция преобразования; q_i – конструктивные параметры прибора.

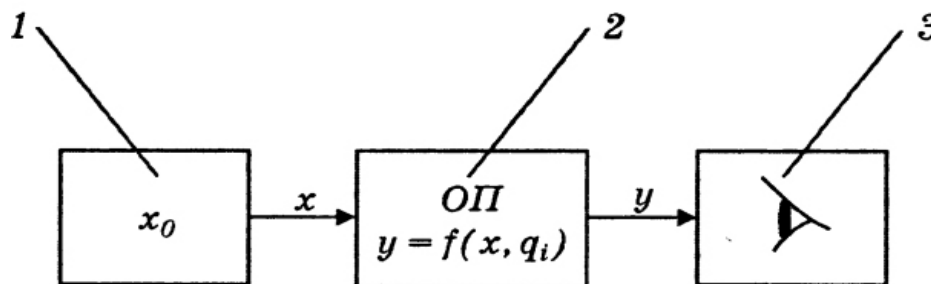


Рис. 6. Обобщенная схема оптического прибора (1 – объект; 2 – оптический прибор; 3 – наблюдатель; x_0 – информативный параметр объекта; x – информативный параметр входного сигнала; y – информативный параметр выходного сигнала)

Преобразование входного сигнала оптического прибора осуществляется оптическим функциональным устройством.

С системных позиций функциональное устройство представляет собой подсистему оптического прибора, которая работает автономно, но определенными отношениями связана с другими подсистемами (например, для передачи информации, энергии).

В свою очередь, функциональные устройства состоят из оптических конструктивных узлов – сборочных единиц, которые могут конструироваться (а в дальнейшем и собираться) отдельно от других составных частей оптического прибора и выполнять определенную функцию в оптическом приборе только совместно с другими составными частями (в отличие от функционального устройства).

В конструктивном узле можно выделить соединения деталей – элементарные сборочные единицы, которые состоят из двух или нескольких деталей, находящихся в непосредственном физическом контакте друг с другом. Первичными элементами соединенных деталей, а следовательно, и оптического прибора являются детали – конструктивные элементы, выполняемые из однородного материала (в результате его обработки) без соединения с другими конструктивными элементами (без применения сборочных операций). Таким образом, структура оптического прибора, в целом, может быть представлена в виде иерархических уровней перечисленных выше составных частей (подсистем), связанных друг с другом определенными соотношениями (связями) – рис. 7.

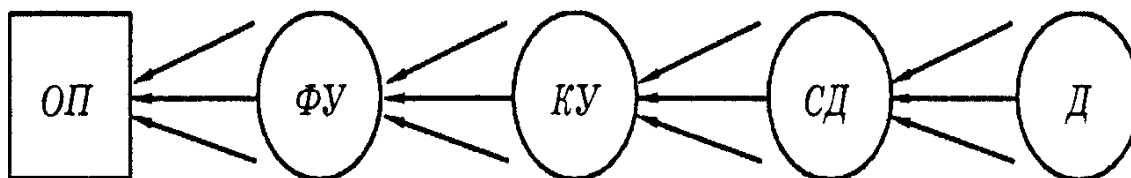


Рис. 7. Структура оптического прибора (ОП – оптический прибор, ФУ – функциональное устройство, КУ – конструктивный узел, СД – сборочная деталь, Д – деталь)

9. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

По функциональному назначению оптические детали, используемые в точных приборах, классифицируют следующим образом:

- силовые – осуществляют силовое преобразование оптического излучения (пример: линзы, сферические и асферические зеркала, граданы);
- отклоняющие и оборачивающие – создают отклонение оси оптического пучка и поворот изображения (пример: отражательные призмы, плоские зеркала, клинья);

- диспергирующие – делят оптическое излучение на монохроматические составляющие (пример: дифракционные решетки, спектральные призмы);
- поляризационные – преобразуют неполяризованный свет в поляризованный (пример: поляризационные призмы, пластины, поляроиды);
- сканирующие, модулирующие – осуществляют динамическое управление оптическим излучением и изображением (пример: растры, оптические дефлекторы, электрооптические, акустооптические и магнитооптические модуляторы);
- масштабирующие и устанавливающие – предназначены для установки визирных линий и плоскостей, измерений угловых и линейных размеров, положений изображений (пример: марки, сетки, шкалы, лимбы, растры, уровни);
- фильтрующие, рассеивающие, защитные – изменяют спектральный состав и интенсивность светового излучения, рассеивающие его и защищающие прибор от внешнего воздействия (пример: светофильтры, экраны, защитные стекла);
- световодные – предназначены для передачи и преобразования оптического излучения и изображения (пример: световоды, фоконы, волоконно-оптические пластины, микроканальные пластины);
- комбинированные – выполняют несколько из перечисленных выше функций.

10. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Как правило, любой оптический прибор состоит из нескольких отдельных оптических деталей, каждая из которых выполняет свою функцию по преобразованию поля излучения. Исключением являются лишь простейшие оптические приборы типа зеркала или увеличительного стекла, представленные одним единственным элементом.

Оптические детали являются простейшими объектами и представляют собой неделимые однородные тела, состоящие из элементов формы (геометрических поверхностей тел) и оптически прозрачного материала.

В каждом оптическом элементе различают следующие структурные поверхности:

- рабочие (активные);
- базовые;
- соединительные (свободные);
- технологические.

Рабочие поверхности (их называют также активными или исполнительными поверхностями) непосредственно выполняют заданные функции детали. Например, рабочими поверхностями являются сферические поверхности линзы. Эти поверхности, как правило, тщательно обрабатываются, и к ним предъявляются высокие требования: точность расположения, погрешность форм, чистота поверхности, размеры и т. п.

Базовые поверхности обеспечивают координацию оптического элемента относительно других деталей и представляют собой поверхности, по которым элемент соединяется с базовой деталью. Данные поверхности изготавливаются также весьма тщательно.

Соединительные поверхности (их часто называют свободными) служат для обеспечения материальной связи между рабочими и базовыми поверхностями. К соединительным поверхностям не предъявляются высокие требования по тщательности и точности изготовления (за исключением требований к чистоте поверхностей, когда это обусловлено эстетическими показателями качества детали).

Технологические поверхности служат для обеспечения технологического процесса изготовления и последующей сборки оптического элемента.

Одни и те же поверхности (части поверхностей) могут выполнять роль рабочих, базовых и соединительных поверхностей. Наиболее благоприятным считается вариант, когда в конструкции удастся объединить рабочие и базовые поверхности, минимизировать соединительные поверхности.

Конструирование оптического элемента заключается в выборе материала, формы его поверхностей и определения его размеров. Кроме этого, конструктор должен указать допустимые отклонения характеристик материала, погрешности изготовления размеров и форм, тип покрытий, вид обработки, технические и технологические условия и требования (например, вакуумное напыление просветляющих и отражающих покрытий).

Выбор материалов производится исходя из функционального назначения оптического элемента, условий его эксплуатации, рациональной технологии изготовления, стоимости и дефицитности материала, требований эргономики и эстетики. Конструктор руководствуется при этом номенклатурой и физико-механическими характеристиками и технологическими свойствами оптических стекол.

11. ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ЧЕРТЕЖАХ И СХЕМАХ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Рабочие чертежи оптических изделий должны быть выполнены в соответствии с требованиями стандартов Единой системы конструкторской документации и стандарта ГОСТ 2.412–81 ЕСКД. Правила выполнения

чертежей и схем оптических изделий. Буквенные обозначения, применяемые на чертежах и схемах приведены в табл. 3.

Таблица 3

Δn_c	категория и класс по показателю преломления
$\Delta(n_F - n_C)$	категория и класс по средней дисперсии
ε	предел разрешения, ...'
O_3	световая зона (часть детали, через которую проходит световой поток или часть поверхности, на которую падает световой поток)
O_Φ	световой диаметр (световая зона на поверхности круглой формы)
L	длина хода луча в призме (геометрическая)
N	предельное отклонение стрелки кривизны поверхности детали от стрелки кривизны поверхности пробного стекла или допускаемая сферичность плоской поверхности, интерференционное кольцо (полоса)
ΔN	поле допуска формы поверхности, интерференционное кольцо (полоса)
ΔN^3	зональная составляющая поля допуска формы
ΔN^α	астигматическая составляющая поля допуска формы
RMS	среднеквадратическое отклонение
f_{\min}	наименьшее допускаемое фокусное расстояние пластинок или призм, как результат сферичности их поверхностей
Θ	предельная клиновидность пластины, ...'(..."), разнотолщинность, мм
π	предельная пирамидальность (угол между ребром призмы и противоположащей гранью), ...'
P	класс чистоты полированной поверхности
δ	предельная разность равных по номинальному значению углов призмы (с цифровым индексом угла призмы, например, для прямоугольной призмы $-\delta_{45^\circ}$, ...'(..."))
P	Класс чистоты полированной поверхности
ΔR	класс точности пробного стекла, назначаемый по ГОСТ 2786 или предельное отклонение от значения расчетного радиуса поверхности, %

12. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Оптическая система – совокупность определенным образом размещенных в пространстве базовых оптических элементов, принимающих непосредственное участие в преобразовании поля излучения.

Базовые оптические элементы:

- линзы;
- призмы;
- зеркала;

- поляризаторы;
- дифракционные элементы;
- элементы волоконной оптики.

Линза оптическая – прозрачное тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, элемент оптического прибора, изготовленный из прозрачного материала для излучения, лежащего в рабочем спектральном диапазоне прибора. В некоторых случаях одна поверхность линзы может быть плоской. Оптическая линза является основным элементом, оптических систем, осуществляющим собирание или рассеивание пучков излучения. Оптические характеристики линзы определяются кривизной ее поверхностей и материалом, из которого она изготовлена (оптическое стекло, оптически прозрачные пластмассы). В настоящее время часто применяются «асферические линзы», форма поверхности которых отличается от сферы.

Как правило, линзы представляют собой тела вращения, ось которых является одновременно и главной оптической осью линзы. Любая из плоскостей, проходящих через эту ось, есть одна из бесконечно большого множества равноправных осей симметрии.

Линзами также называют и другие оптические приборы и явления, которые создают сходный оптический эффект, не обладая указанными внешними характеристиками (плоские «линзы», изготовленные из материала с переменным показателем преломления, изменяющимся в зависимости от расстояния от центра, линзы Френеля, зонная пластинка Френеля, использующая явление дифракции).

Действие многих оптических приборов – проекционного устройства, фотоаппарата и других приборов – может быть схематически уподоблено действию тонких линз. Однако тонкая линза дает хорошее изображение только в том сравнительно редком случае, когда можно ограничиться узким монохроматическим лучом, идущим от источника вдоль главной оптической оси или под небольшим углом к ней (параксиальная оптика). В большинстве же практических задач, где эти условия не выполняются, изображение, даваемое тонкой линзой, довольно несовершенно. Поэтому осуществляют построение сложных оптических систем, имеющих большое число преломляющих поверхностей и не ограниченных требованием близости этих поверхностей (требование, которому удовлетворяет тонкая линза).

Изображение линзы, сформированное оптической системой или частью оптической системы, используется при расчете сложных оптических систем. Примером системы оптических линз является фотографический объектив (собран в оптический блок внутри специального корпуса, создает действительное изображение объекта съемки на светочувствительном материале).

Классификация линз и правила преломления на собирающих и рассеивающих линзах показаны на рис. 8.

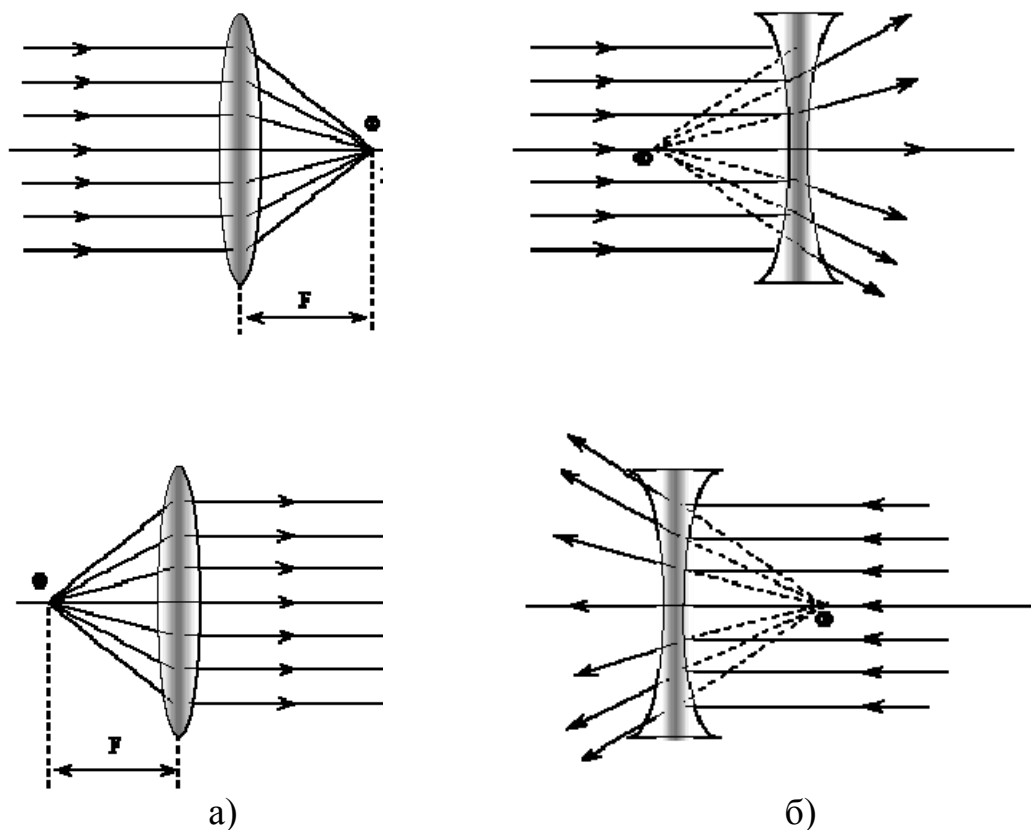


Рис. 8. Классификация линз и особенности преломления лучей:
 а) собирающая линза; б) рассеивающая линза

Призма оптическая – элемент оптического прибора, представляющий собой многогранник, выполненный из материала, прозрачного для оптического излучения. В оптических приборах призмы применяются для изменения хода лучей в приборах; изменения направления оптической оси системы; для оборачивания изображения; с целью уменьшения габаритов системы; для разложения света в спектр и проч. Рабочие и нерабочие поверхности призмы – плоские. Рабочие поверхности могут преломлять световой пучок, входящий и выходящий через них, или отражать его при прохождении последнего внутри призмы. Рабочие поверхности оптической детали выделяются визуально – они, как правило, полированные. Нерабочие поверхности – матовые. Рабочие выполняют основную (рабочую) функцию детали, а матовые гасят паразитные лучи внутри призмы, не выпуская их наружу.

Призмы подразделяют на классы, отличающиеся по назначению:

- спектральные или дисперсионные призмы (рис. 9) – используют в спектральных приборах. Материалом для производства спектральных линз

служат вещества, прозрачные в исследуемой области спектра, обладающие большой дисперсией, высокой оптической однородностью и изотропностью;

- отражательные призмы (рис. 10 и 11) – применяют для изменения направления лучей (прямоугольные призмы, многогранные призмы, пентапризмы, призмы с крышей, призмы Дове);

- поляризационные призмы – используют для получения поляризованного света.

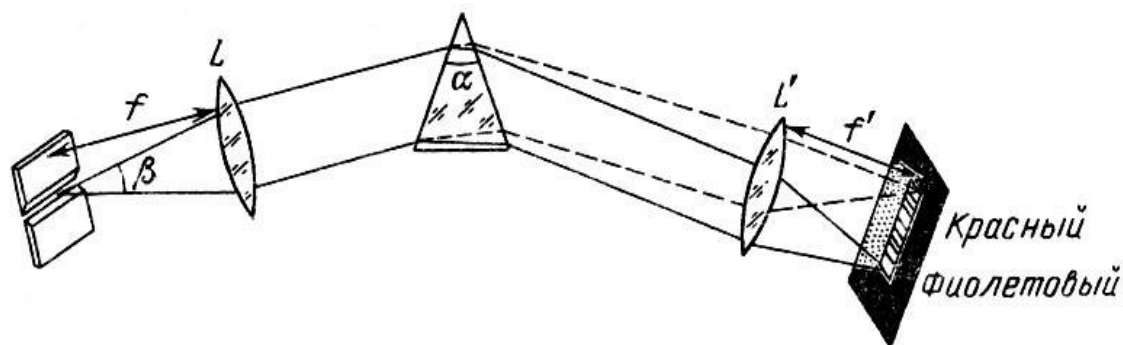


Рис. 9. Конструкция спектроанализатора на дисперсионной призме

Классификация отражательных призм:

- призмы, меняющие ход луча в одной плоскости. Делятся на призмы с одним, двумя и тремя отражениями. Могут быть составными (из двух призм);

- призмы с крышей. Строятся на базе призм с плоским ходом луча, только одна из отражающих граней заменяется с внутриграннным углом 90° ;

- призмные системы. Меняют ход лучей в пространстве и состоят из нескольких призм.

Каждая призма маркируется буквами и цифрами. Первая буква определяет число отражающих граней:

- А – одна отражающая грань;
- Б – две отражающие грани;
- В – три отражающие грани.

Вторая буква обозначает характер конструкции призмы:

- Р – равнобедренная;
- С – ромбическая;
- П – пента-призма;
- У – полупента-призма;
- Л – Лемана.

Число указывает угол отклонения осевого луча в градусах. Для обозначения призм с крышей добавляется маленькая буква «к». Например, прямоугольная призма обозначается АР- 90° , эта же призма с крышей АкР- 90° .

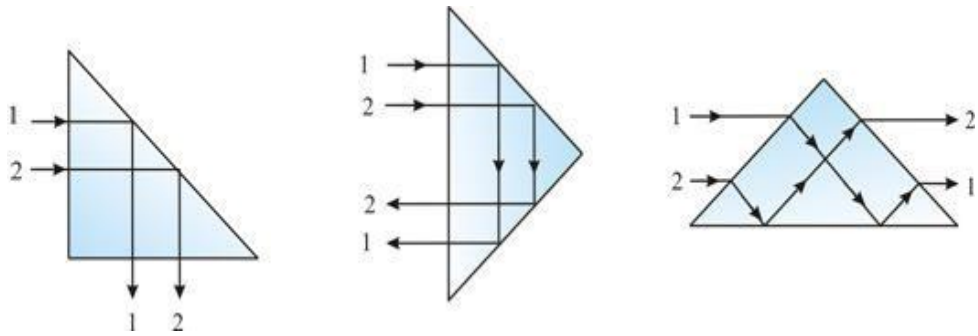


Рис. 10. Простейшие отражательные призмы

Призмы являются одним из основных элементов в изготовлении оптических систем и оптических приборов. Их используют при создании оптических приборов разного предназначения: биноклей, телескопов, микроскопов, приборов для регистрации изображений на электронных приемниках, а также сложных многофункциональных оптических приборов. В сложных оптических приборах используется большое количество различных по номенклатуре оптических призм.

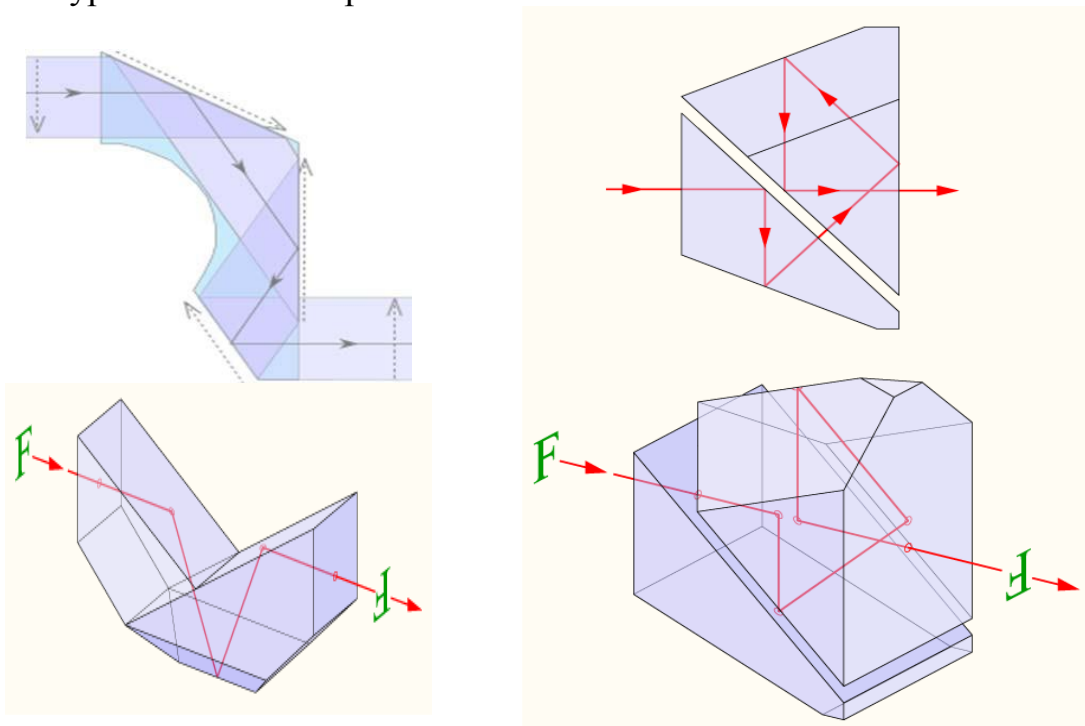


Рис. 11. Призменные составные оборачивающие системы

Одним из примеров сложной оптической системы, состоящей из объектива (система линз), призмы и зеркала является конструкция фотоаппарата (рис. 12).

Изготовление оптических призм является сложным технологическим процессом. Его усложняет большое разнообразие видов и конструкций оптических призм. Основная производственная особенность этих изделий –

сложная геометрия, максимальная точность значений углов и размеров граней, которые необходимо четко соблюдать при изготовлении.

Путем последовательного отображения одной из рабочих граней призмы в другую, можно построить оптическую развертку призмы (рис. 13). При этом возможны два варианта: в первом случае призма разворачивается в плоско-параллельную пластинку (такие призмы используются для излома пучка лучей), а во втором случае призма разворачивается в клин. Такие призмы применяются главным образом для спектрального разложения света сложного спектрального состава.

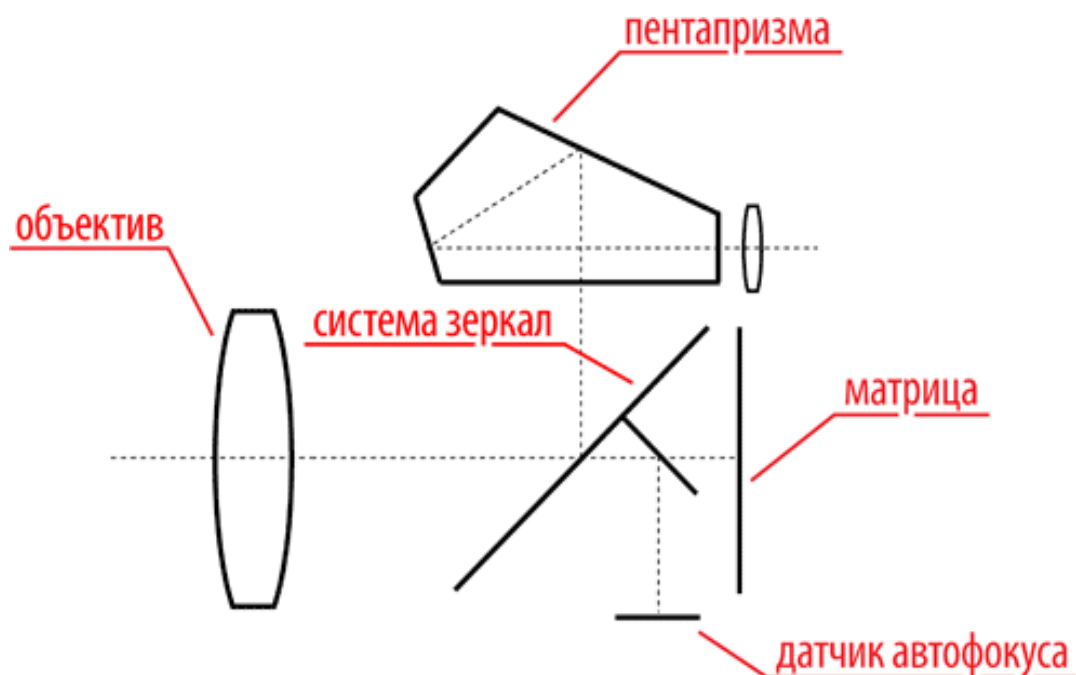


Рис. 12. Схема устройства зеркальной камеры фотоаппарата

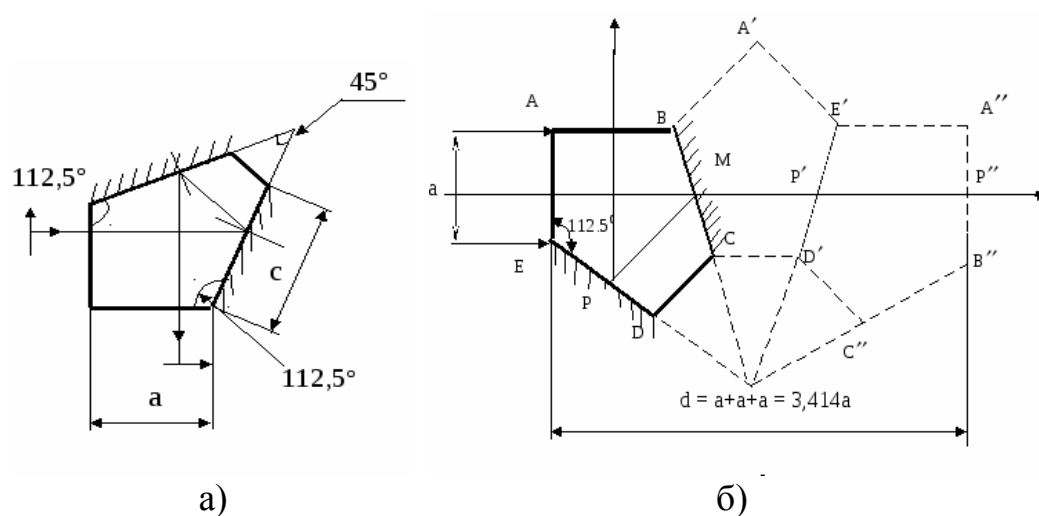


Рис. 13. Чертеж-развертка пента-призмы БП-90°:
а) главное сечение пента-призмы БП-90°; б) развертка пента-призмы БП-90°

Почти каждая призма может быть заменена системой зеркал. Несмотря на значительный вес, призмы конструктивно удобнее, так как общая конструкция прибора (устройства) оказывается проще. Система зеркал при эксплуатации требует тщательной регулировки и легко поддается разъюстировке. Учитывается, что стойкость серебряного слоя зеркала сравнительно невелика.

Зеркало оптическое – тело, обладающее полированной поверхностью правильной формы, способной отражать световые лучи с соблюдением равенства углов падения и отражения, и образующее изображения оптические предметов (в том числе источников света), положение которых может быть определено по законам геометрической оптики (рис. 14). Зеркала, применяемые в оптических приборах, могут быть плоскими, сферическими и более сложной формы. Плоские зеркала по своему действию подобны отражательным призмам, неплоские – линзам.

Большими возможностями фокусировки мощного лазерного излучения для технологических целей обладают двухзеркальные объективы. Классическая схема двухзеркального объектива, предложенного еще в XVII в. Кассегреном, представлена на рис. 15.

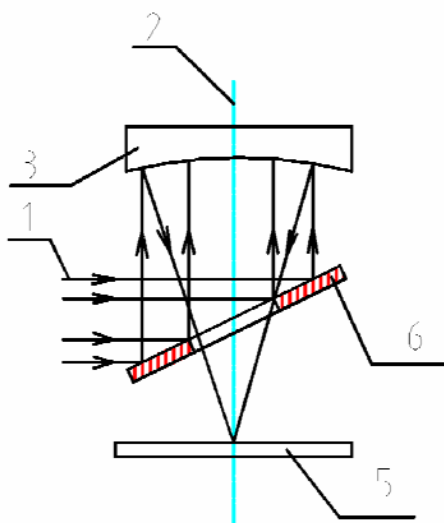


Рис. 14. Схема с одиночным фокусирующим зеркалом (1 – поток излучения, 2 – ось, 3 – фокусирующее сферическое зеркало, 4 – плоское сплошное зеркало, 5 – обрабатываемая деталь, 6 – плоское кольцевое зеркало)

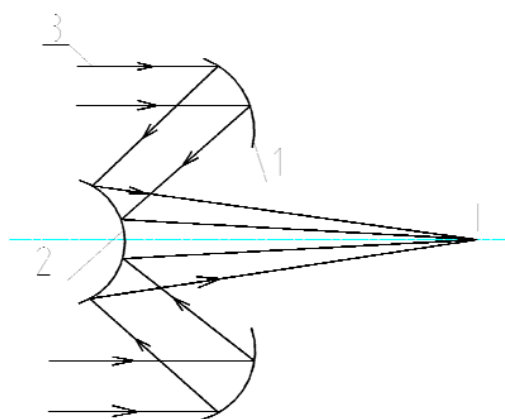


Рис. 15. Классическая схема объектива Кассегрена (1, 2 – сферические зеркала, 3 – поток излучения)

Наиболее распространены плоские оптические зеркала. В оптических системах применяются также выпуклые и вогнутые зеркала со сферическими, параболидальными, эллипсоидальными, тороидальными и др. от-

ражающими поверхностями. Качество зеркала тем выше, чем ближе форма его поверхности к математически правильной. Микронеровности отражающих поверхностей зеркал должны быть малы по сравнению с длиной световой волны. Максимально допустимая величина микронеровностей поверхностей определяется назначением зеркала. Для астрономических приборов она не должна превышать 0,1 наименьшей длины волны падающего на зеркало излучения, в то время как для прожекторных или конденсорных зеркалах, отражающих большие световые потоки, она может быть в 10–100 раз больше.

Неплоские зеркала обладают всеми присущими оптическим системам aberrациями, кроме хроматических. Плоское зеркало – единственная оптическая система, которая дает полностью безаберрационное изображение (всегда мнимое) при любых падающих на него пучках света.

13. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ

Оформление оптических схем согласно должно выполняться в соответствии с требованиями ГОСТ 2.412–81. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.

На оптической схеме должны быть изображены:

- оптические элементы изделия;
- источники излучения (упрощенно или условными графическими обозначениями);
- приемники лучистой энергии, например, фотоэлементы, фотоумножители (условными графическими обозначениями).

Элементы, поворачивающиеся или перемещающиеся вдоль или перпендикулярно оси, следует показывать в основном рабочем положении. Кроме основного рабочего положения могут быть показаны и другие положения элементов, например, крайние.

Кроме того, на оптической схеме следует указывать:

- положение диафрагм;
- положение зрачков (при необходимости);
- положение фокальных плоскостей, плоскостей изображения, плоскостей предмета (при необходимости, например, для фотографических объективов и объективов микроскопов);
- положение экранов, светорассеивающих полостей и поверхностей (при необходимости).

Номера позиций:

1. Номера позиций элементам схемы следует присваивать по ходу луча. При разветвлении схемы в несколько направлений номера позиций

следует указывать по одному из направлений до конца, затем последующие номера позиций по другому направлению и т. д.

2. Если в схему изделия входит элемент, имеющий самостоятельную принципиальную схему (расчет оптических величин), то его следует изобразить упрощенно, обвести тонкой штрихпунктирной линией и указать размеры, определяющие его положение.

3. Повторяющимся элементам необходимо присваивать один и тот же номер позиции, после которого в скобках допускается ставить порядковый номер.

4. Допускается присваивать номера позиций источникам излучения и приемникам лучистой энергии.

На принципиальной оптической схеме следует помещать основные оптические характеристики изделия в виде записей на поле схемы или таблицы произвольной формы, например:

для телескопических систем:

- 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 объектов:

- фокусное расстояние;
- относительное отверстие;
- угловое поле оптической системы в пространстве предметов или

размер кадра;

- разрешающую способность (при необходимости);
- коэффициент пропускания (при необходимости);

для фотоэлектрических систем:

- размеры фотокатодов или типы фотоприемников;
- размеры светового пятна на фотокатодах (при необходимости).

На оптической схеме в зависимости от типа следует указывать:

- диаметры диафрагм, размеры зрачков, размеры тела накала или других светящихся элементов источников излучения (при необходимости);

- 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 пределы рабочего перемещения или предельные углы поворота оптических деталей;

- размеры, определяющие положение оптической системы относительно механических частей прибора, например, размер, определяющий положение объектива микроскопа относительно нижнего среза тубуса (при необходимости);
- габаритные или установочные размеры, например, длину базы, высоту выноса (при необходимости).

14. КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

При первичной оценке качества прибора рассматриваются лишь основные его характеристики:

- способность концентрировать излучение – светосила;
- способность различать соседние детали изображения – разрешающая способность;
- соотношение размеров предмета и его изображения – увеличение;
- угол, под которым из центра прибора видны крайние точки предмета – поле зрения.

Разрешающая способность – способность прибора различать две близкие точки или линии (обусловлена волновой природой света). Численное значение разрешающей способности, например, линзовой системы, зависит от умения конструктора справиться с aberrациями линз и тщательно отцентрировать эти линзы на одной оптической оси.

Увеличение. Если предмет длиной H перпендикулярен оптической оси системы, а длина его изображения H' , то увеличение m определяется по формуле $m = \frac{H'}{H}$. Увеличение зависит от фокусных расстояний и взаимного расположения линз.

Важной характеристикой приборов для визуального наблюдения является видимое увеличение M . Оно определяется из отношения размеров изображений предмета, которые образуются на сетчатке глаза при непосредственном наблюдении предмета и рассматривании его через прибор.

Видимое увеличение M выражают отношением $M = \frac{tgb}{tga}$, где a – угол, под

которым наблюдатель видит предмет невооруженным глазом, а b – угол, под которым глаз наблюдателя видит предмет через прибор.

При желании создать качественный оптический прибор следует оптимизировать набор его основных характеристик – светосилы, разрешающей способности и увеличения. Нельзя сделать хороший, например, телескоп, добываясь лишь большого видимого увеличения и оставляя малой светосилу (апертуру). У него будет плохое разрешение, так как оно прямо зависит от апертуры. Конструкции оптических приборов весьма разнообразны,

и их особенности диктуются назначением конкретных устройств. Но при воплощении любой спроектированной оптической системы в готовый оптико-механический прибор необходимо расположить все оптические элементы в строгом соответствии с принятой схемой, надежно закрепить их, обеспечить точную регулировку положения подвижных деталей, разместить диафрагмы для устранения нежелательного фона рассеянного излучения.

Требуется выдерживать заданные значения температуры и влажности внутри прибора, свести к минимуму вибрации, нормировать распределение веса, обеспечить отвод тепла от ламп и другого вспомогательного электрооборудования. Значение придается внешнему виду прибора и удобству обращения с ним.

14.1. Лупы, микроскопы

Если рассматривать через положительную (собирающую) линзу предмет, расположенный за линзой не дальше ее фокальной точки, то видно увеличенное мнимое изображение предмета. Такая линза представляет собой простейший микроскоп и называется лупой или увеличительным стеклом. Из схемы рис. 16 можно определить размер увеличенного изображения. Когда глаз настроен на параллельный пучок света (изображение предмета находится на неопределенно большом расстоянии, а это означает, что предмет расположен в фокальной плоскости линзы), видимое увеличение M можно определить из соотношения:

$$M = \frac{H / f}{H / v} = \frac{v}{f},$$

где f – фокусное расстояние линзы, v – расстояние наилучшего зрения, т. е. наименьшее расстояние, на котором глаз хорошо видит при нормальной аккомодации⁷.

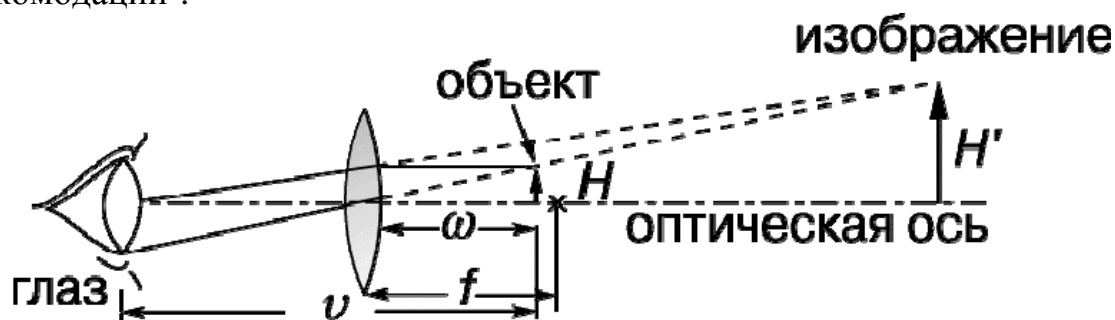


Рис. 16. Схема и принцип действия лупы

⁷ Расстоянием наилучшего зрения нормального глаза – 25 см. Способности к аккомодации у всех людей разные, с возрастом они ухудшаются.

Значение M увеличивается на единицу, когда глаз настраивается так, что мнимое изображение предмета оказывается на расстоянии наилучшего зрения. В поле зрения одиночной положительной линзы при удалении от ее оси резкость изображения быстро ухудшается из-за поперечных аберраций. Типичная кратность луп 5–10.

Микроскоп предназначен для наблюдения мелких объектов с большим увеличением и с большей разрешающей способностью, чем дает лупа. Увеличение сложного микроскопа – до 2000 крат. Оптическая система микроскопа состоит из двух частей: объектива и окуляра. Объектив микроскопа образует действительное увеличенное обратное изображение предмета в передней фокальной плоскости окуляра. Окуляр действует как лупа и образует мнимое изображение на расстоянии наилучшего видения. По отношению ко всему микроскопу рассматриваемый предмет располагается в передней фокальной плоскости.

Общее увеличение микроскопа определяется как произведение увеличения объектива на увеличение окуляра: $m = m_{об} \cdot m_{ок}$.

Как правило, увеличение современных объективов микроскопов стандартизовано и составляет ряд чисел: 10, 20, 40, 60, 90, 100 крат. Увеличения окуляров тоже имеют вполне определенные значения, например 10, 20, 30 крат. Во всех современных микроскопах имеется комплект объективов и окуляров, которые специально рассчитываются и изготавливаются так, что подходят друг к другу, поэтому их можно комбинировать для получения разных увеличений.

14.2. Телескопы

Телескоп увеличивает видимые размеры удаленных предметов. В схему простейшего телескопа входят две положительные линзы (рис. 17). Лучи от удаленного предмета, параллельные оси телескопа (лучи a и c), собираются в фокусе первой линзы (объектива). Вторая линза (окуляр) удалена от фокальной плоскости объектива на свое фокусное расстояние, и лучи a и c выходят из нее параллельно оси системы. Луч b падает под углом α к оси телескопа, проходит через передний фокус объектива и после него идет параллельно оси системы.

Окуляр направляет его в точку фокуса под углом β . Поскольку расстояние от переднего фокуса объектива до глаза наблюдателя пренебрежимо мало по сравнению с расстоянием до предмета, то из схемы рис. 16 можно получить выражение для видимого увеличения M телескопа: $M = -\frac{F}{f'} = \frac{F}{f}$.

Отрицательный знак показывает, что изображение перевернуто. В астрономических телескопах оно таким и остается; в телескопах для

наблюдений за наземными объектами применяют оборачивающую систему, чтобы рассматривать нормальные, а не перевернутые изображения. В оборачивающую систему могут входить дополнительные линзы или, как в биноклях, призмы.

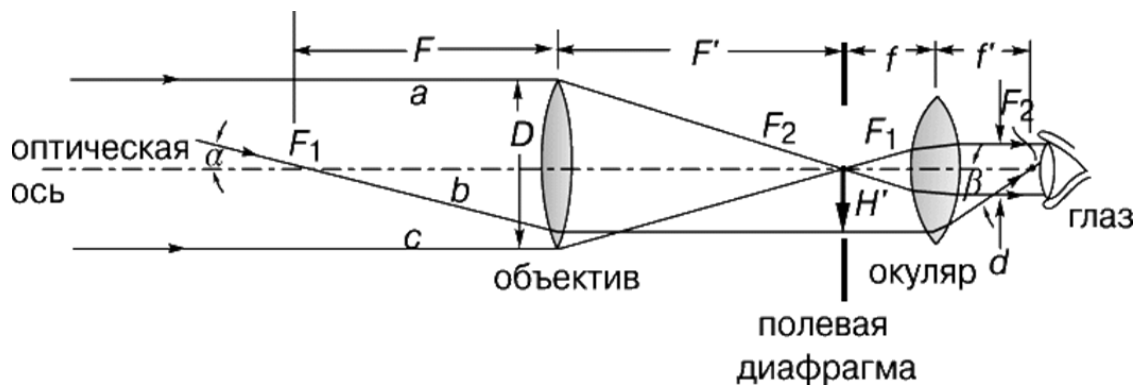


Рис. 17. Оптическая схема телескопа

14.3. Бинокли

Биноклярный телескоп, обычно именуемый биноклем, представляет собой компактный прибор для наблюдений обоими глазами одновременно; его увеличение, как правило, от 6 до 10 крат. В биноклях используют пару оборачивающих систем, призмы Порро или призмы Roof (рис. 18).

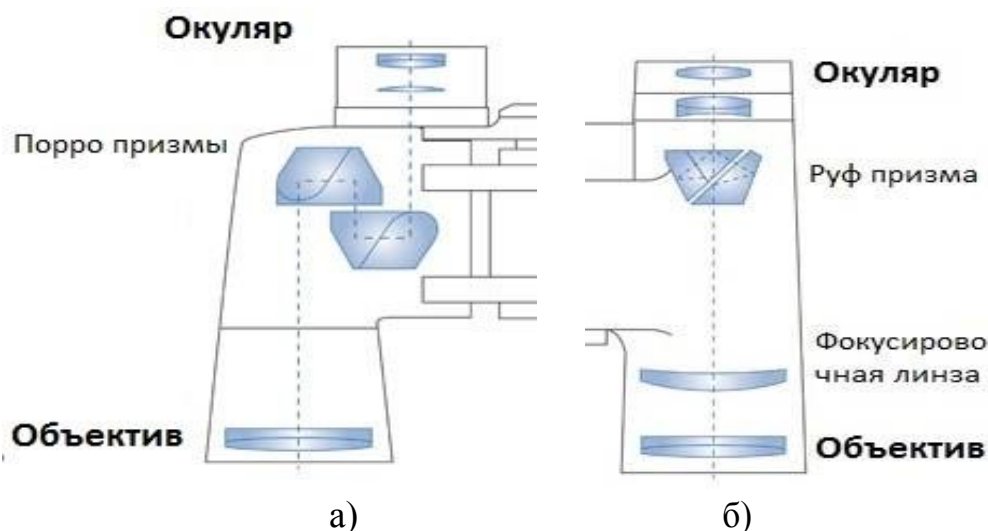


Рис. 18. Бинокль с системой призм Порро (а); бинокль с системой призм Руф (б)

Чтобы получить большое увеличение в широком поле зрения, свободном от aberrаций объектива, и следовательно, значительный угол обзора ($6-9^\circ$), биноклю необходим очень качественный окуляр, более совершенный, чем телескопу с узким углом зрения. В окуляре бинокля предусмотрена фокусировка изображения с коррекцией зрения – шкала размечена в

диоптриях. Положение окуляра подстраивается под расстояние между глазами наблюдателя. Обычно бинокли маркируются в соответствии с их увеличением (крат) и диаметром объектива (мм), например, 8×40 или 7×50.

14.4. Оптические прицелы

В качестве оптического прицела можно применить любой телескоп для наземных наблюдений, если в какой-либо плоскости его пространства изображений нанести четкие метки (сетки, марки), отвечающие заданному назначению. Типичное устройство многих военных оптических установок таково, что объектив телескопа открыто смотрит на цель, а окуляр находится в укрытии. Такая схема требует излома оптической оси прицела и применения призм для ее смещения; эти же призмы преобразуют перевернутое изображение в прямое. Системы со смещением оптической оси называются перископическими. Обычно оптический прицел рассчитывается так, что зрачок его выхода удален от последней поверхности окуляра на достаточное расстояние для предохранения глаза наводчика от ударов о край телескопа при отдаче оружия.

14.5. Оптические дальномеры

Оптические дальномеры, с помощью которых измеряют расстояния до объектов, бывают двух типов: монокулярные и стереоскопические. Основная часть оптической схемы и принцип действия у них одинаков: по известной стороне (базе) и двум известным углам треугольника определяется неизвестная его сторона. Два параллельно ориентированных телескопа, разнесенных на некоторое расстояние (база), строят изображения одного и того же удаленного объекта так, что он кажется наблюдаемым из них в разных направлениях. Если с помощью какого-нибудь приемлемого оптического устройства совместить поля изображений обоих телескопов так, чтобы их можно было рассматривать одновременно, окажется, что соответствующие изображения предмета пространственно разнесены. Существуют дальномеры не только с полным наложением полей, но и с половинным: верхняя половина пространства изображений одного телескопа объединяется с нижней половиной пространства изображений другого. В таких приборах с помощью подходящего оптического элемента проводится совмещение пространственно разнесенных изображений и по относительному сдвигу изображений определяется измеряемая величина. Часто в качестве сдвигающего элемента служит призма или комбинация призм. В схеме монокулярного дальномера, показанной на рис. 19, эту функцию выполняет призма P_3 ; она связана со шкалой, проградуированной в измеряемых расстояниях до объекта. Пента-призмы B используются как отражатели света под прямым углом, поскольку такие призмы всегда от-

клоняют падающий световой пучок на 90° , независимо от точности их установки в горизонтальной плоскости прибора. Изображения, создаваемые двумя телескопами, в стереоскопическом дальномере наблюдатель видит сразу обоими глазами. База такого дальномера позволяет наблюдателю воспринимать положение объекта объемно, на некоторой глубине в пространстве. В каждом телескопе имеется сетка с марками, соответствующими значениям дальности. Наблюдатель видит шкалу расстояний, уходящую вглубь изображаемого пространства, и по ней определяет удаленность объекта.

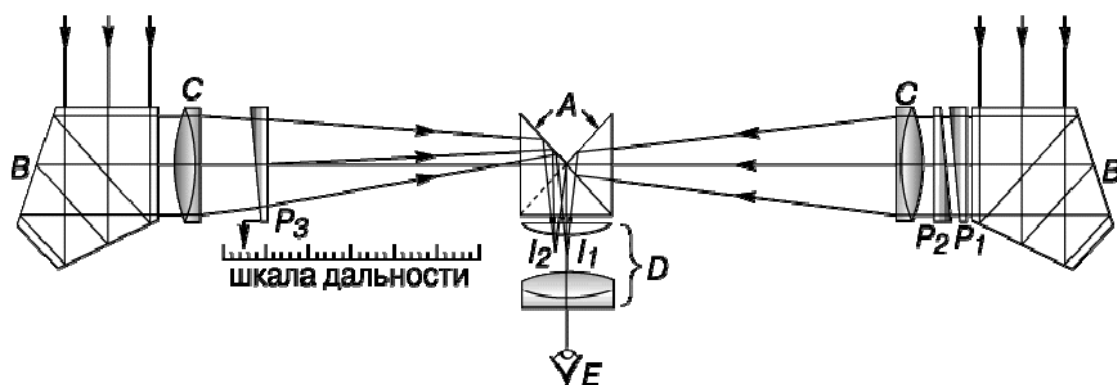


Рис. 19. Монокулярный дальномер: A – прямоугольная призма; B – пента-призмы; C – линзовые объективы; D – окуляр; E – глаз; P_1 и P_2 – неподвижные призмы; P_3 – подвижная призма; I_1 и I_2 – изображения половин поля зрения

14.6. Диаскоп

В оптическую схему диаскопа, предназначенного для просмотра диапозитивов и прозрачных цветных кадров, входят две линзовые системы: конденсор и проекционный объектив. Конденсор равномерно освещает прозрачный оригинал, направляя лучи в проекционный объектив, который строит изображение оригинала на экране (рис. 20). В проекционном объективе предусматриваются фокусировка и замена его линз, что позволяет менять расстояние до экрана и размеры изображения на нем.

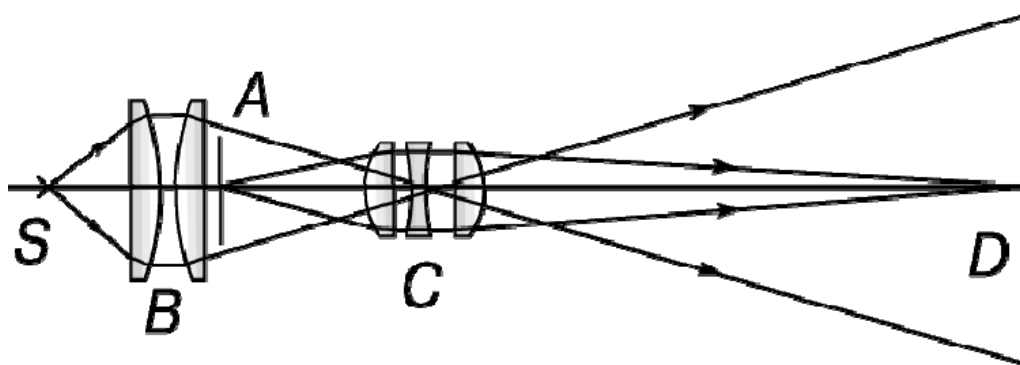


Рис. 20. Схема диаскопа: S – источник света; B – линзовый конденсор; A – диапозитив; C – линзы проекционного объектива; D – экран

14.7. Спектральные приборы

В зависимости от способа регистрации спектра приборы делятся на:

- спектрографы – приборы с фотографической регистрацией спектра;
- спектроскопы – спектр рассматривается глазом;
- спектрометры – приборы с фотоэлектрической регистрацией спектра;
- монохроматоры – приборы, предназначенные для выделения узкого участка спектра. Если эти участки последовательно меняются (это называется сканированием спектра) и выходящее из прибора излучение регистрируется фотоэлектрически, то монохроматор превращается в спектрометр.

В зависимости от элементов, обеспечивающих спектральное разложение, различают:

- призмные приборы;
- приборы с дифракционной решеткой;
- интерференционные приборы.

Несмотря на существенное различие физических принципов, призмные и дифракционные приборы имеют много общих свойств (щелевые приборы). В таком приборе свет сначала коллимируется, т. е. формируется в пучок параллельных лучей, затем разлагается в спектр, и наконец, изображение входной щели прибора фокусируется на его выходную щель по каждой длине волны спектра.

К показателям назначения спектрального прибора относятся:

1) *рабочий диапазон* – интервал длин волн, в которых может работать данная установка: $\lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$;

2) *спектральная разрешающая способность* R – характеризует свойство прибора разделять излучения, отличающиеся по длине волны на малый интервал $\delta\lambda$. Чем меньше этот интервал, т. е. чем более детальное исследование спектра допускает данный прибор, тем больше его разрешающая способность. Численно измеряют отношением: $R = \lambda/\delta\lambda$, где λ – длина волны, для которой определяют разрешающую способность спектрального аппарата, а $\delta\lambda$ – разность длин волн двух наиболее близких спектральных линий, которые еще могут быть разрешены данным спектральным аппаратом. Более строго разрешающая способность определяется аппаратной функцией прибора;

3) *пространственное разрешение* – расстояние между двумя точками пространства, излучение из которых может быть проанализировано отдельно. Основное влияние на него оказывает осветительная система;

4) *временное разрешение* – интервал между моментами времени, которые можно изучать отдельно, проанализировать отдельно. Основное влияние оказывает фотоприемник и регистрирующая система;

5) *порог чувствительности* – определяет минимальный поток от источника, позволяющий проанализировать излучение. Эта важнейшая для

задач диагностики характеристика системы зависит от конструкции и физических принципов функционирования спектрального прибора, типа и качества фотоприемника и уровня шумов источника, фотоприемника с усилителем и регистрирующей системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушенков, Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения : учебник / Ю. Г. Якушенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Логос, 2013. – 374 с.

2. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов : учебник / Ю. Г. Якушенков. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Логос, 2011. – 568 с.

3. Каледин, Б. Ф. Изготовление типовых деталей оптических приборов: учебное пособие / Б. Ф. Каледин, А. Г. Козлова. – М. : Изд. МИИГАиК, 2010. – 74 с.

4. Вильчинская, С. С. Оптические материалы и технологии : учебное пособие / С. С. Вильчинская, В. М. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 107 с.

5. Канушина, Л. А. Спецтехнология оптических деталей. Лекции для студентов / Л. А. Канушина, А. Н. Соснов. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 76 с.

6. Дамбон, О. Прецизионное прессование стекла – высокоточные оптические компоненты со сложной геометрией / О. Дамбон, Ю. Дуквен // Фотоника. – М. : Техносфера, 2011, № 6.

7. ГОСТ 2. 412–81. ЕСКД Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.

