

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**А.Н. Иванов**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЗЛОВ ОПТИКО-  
ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ. МЕТОДИЧЕСКИЕ  
УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО  
ПРОЕКТА**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург**

**2013**

Иванов А.Н. Проектирование узлов оптико-электронных приборов. Методические указания к выполнению курсового проекта. Учебное пособие – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 72 с.

Учебное пособие разработано для ознакомления студентов 3-го курса с особенностями расчета допусков на конструктивные параметры элементов оптических систем и выбора требований к материалам, из которых они изготавливаются в рамках дисциплин «Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем» и «Основы конструирования лазерных и оптико-электронных приборов и систем»

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 200400 «ОпTOTехника» по профилю 200400.62. «Проектирование и метрология оптико-электронных приборов» а также для студентов, обучающихся по направлению 200500 «Лазерная техника и лазерные технологии» по профилю 200500.62 «Лазерная техника и лазерные технологии»

Рекомендовано к печати Ученым советом ФОИСТ от 12 марта 2013 г. протокол № 7



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

© А.Н. Иванов, 2013

## Содержание

Введение .....	4
1. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ .....	5
2. ВЫБОР ДОПУСКОВ НА МАТЕРИАЛ ЛИНЗ ОБЪЕКТИВА .....	13
2.1 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ОТКЛОНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ЛИНЗЫ .....	13
2.2 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ОТКЛОНЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДИСПЕРСИИ .....	15
2.3 ВЫБОР ДОПУСКОВ НА СТЕКЛО ПО ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ, ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЮ, ПОКАЗАТЕЛЮ ОСЛАБЛЕНИЯ, БЕССВИЛЬНОСТИ И ПУЗЫРНОСТИ .....	17
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКА НА ОБЩУЮ И МЕСТНУЮ ПОГРЕШНОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ, КЛАССА ИХ ЧИСТОТЫ И ПОГРЕШНОСТИ ТОЛЩИН ЛИНЗ .....	21
3.1 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ОБЩУЮ ОШИБКУ .....	21
3.2 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА МЕСТНУЮ ОШИБКУ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ .....	22
3.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ЧИСТОТЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛИНЗ .....	23
3.4 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ТОЛЩИНУ ЛИНЗЫ ПО ОСИ .....	26
4. РАСЧЕТ ДЕЦЕНТРИРОВОК ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ И ДОПУСКОВ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОПРАВЫ .....	28
5. ПРОВЕРКА ВЫБРАННОЙ ПОСАДКИ ЛИНЗЫ В ОПРАВУ, ИСХОДЯ ИЗ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ. ....	34
6. ВЫБОР ДОПУСКОВ НА МАТЕРИАЛ ПРИЗМЫ, ЕЕ РАЗМЕРЫ И ФОРМУ ПОВЕРХНОСТЕЙ .....	37
6.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИЗМЫ И ТРЕБОВАНИЙ К ЕЕ МАТЕРИАЛУ .....	37
6.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ОБЩУЮ И МЕСТНУЮ ОШИБКИ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ И ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИЗМЫ .....	40
6.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ОШИБКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УГЛОВ ПРИЗМ И НА ПИРАМИДАЛЬНОСТЬ .....	41
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЛИНЗОВЫЕ СИСТЕМЫ .....	46
1.1 ОБЪЕКТИВЫ МИКРОСКОПОВ .....	46
1.2 ФОТООБЪЕКТИВЫ .....	50
1.3 ОКУЛЯРЫ .....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ .....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ВЫБОР НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	64
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	68
<b>КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ...</b>	<b>69</b>

## Введение

Настоящее пособие имеет целью оказание помощи студентам при выполнении конструкторского курсового проекта по дисциплине «Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем». Курсовой проект заключается в разработке конструкции линзового объектива и узла крепления призмы на уровне эскизного проекта. Цель проекта – систематизация и закрепление теоретических знаний, полученных по дисциплинам базовой конструкторско-технологической подготовки и дисциплинам специальности «Прикладная оптика», «Оптические материалы и технологии», «Сборка, юстировка и контроль ОЭП» а также приобретение практических навыков конструкторской деятельности.

Планируемый объем курсового проекта:

1. Количество чертежей общего вида – 2 шт.;
2. Количество рабочих чертежей – 4-5 шт.;
3. Объем пояснительной записки – 15-20 листов формата А4 со следующими разделами:
  - Обоснование и выбор конструкции оптической системы;
  - Расчет допусков на конструктивные параметры деталей оптической системы, выбор требований их материалу;
  - Список использованной литературы.

## 1. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

В процессе изучения дисциплины «Основы конструирования опто-электронных приборов и систем» студентам необходимо выполнить курсовой проект, который включает в себя следующие элементы:

1. Разработка конструкции объектива и выполнение его сборочного чертежа и спецификации (тип и конструктивные параметры объективов см. в Приложении 1);
2. Расчет допусков на материал и конструктивные параметры линз входящих в состав одной из склеек объектива, конструктивные параметры самой склейки и оправы, в которую она установлена. Выполнение рабочих чертежей этих деталей (если конструкция объектива насыпная без оправ, вместо чертежа оправы выполняется чертеж корпуса объектива);
3. Определение допусков на материал и конструктивные параметры призмы (тип призмы см. в Приложении 2) и выполнение ее рабочего чертежа;
4. Разработка конструкции узла крепления призмы в соответствии с вариантом крепления (см. Приложение 2) и выполнение сборочного чертежа разработанного узла.

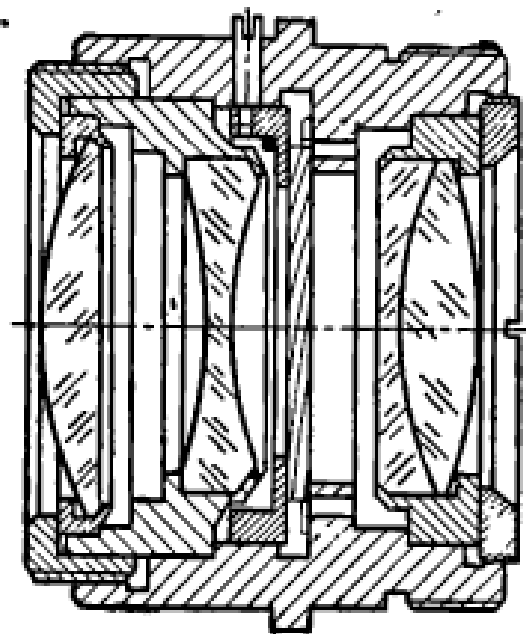


Рис. 1.1 Конструкция объектива «Индустар-50»

В качестве примера для расчета допусков возьмем объектив «Индустар – 50» из библиотеки программы расчета оптических систем ОПАЛ со следующими характеристиками: фокусное расстояние  $f' = 52$  мм, угловое поле  $2\omega = 46$  угл. гр., относительное отверстие  $D/f' = 1/2.9$ . Конструктивные параметры объектива приведены в таблице 1.

Таблица 1. Конструктивные параметры объектива «Индустар-50»

	Радиусы поверхностей мм	Толщины по оси мм	Марка стекла
1	17.1	2.7	ТК 14
2	0	4.16	ВОЗДУХ
3	-33.57	1.05	ЛФ5
4	14.56	5.05	ВОЗДУХ
5	346.7	1.2	ОФ1
6	15	4.7	ТК14
7	-23.6		

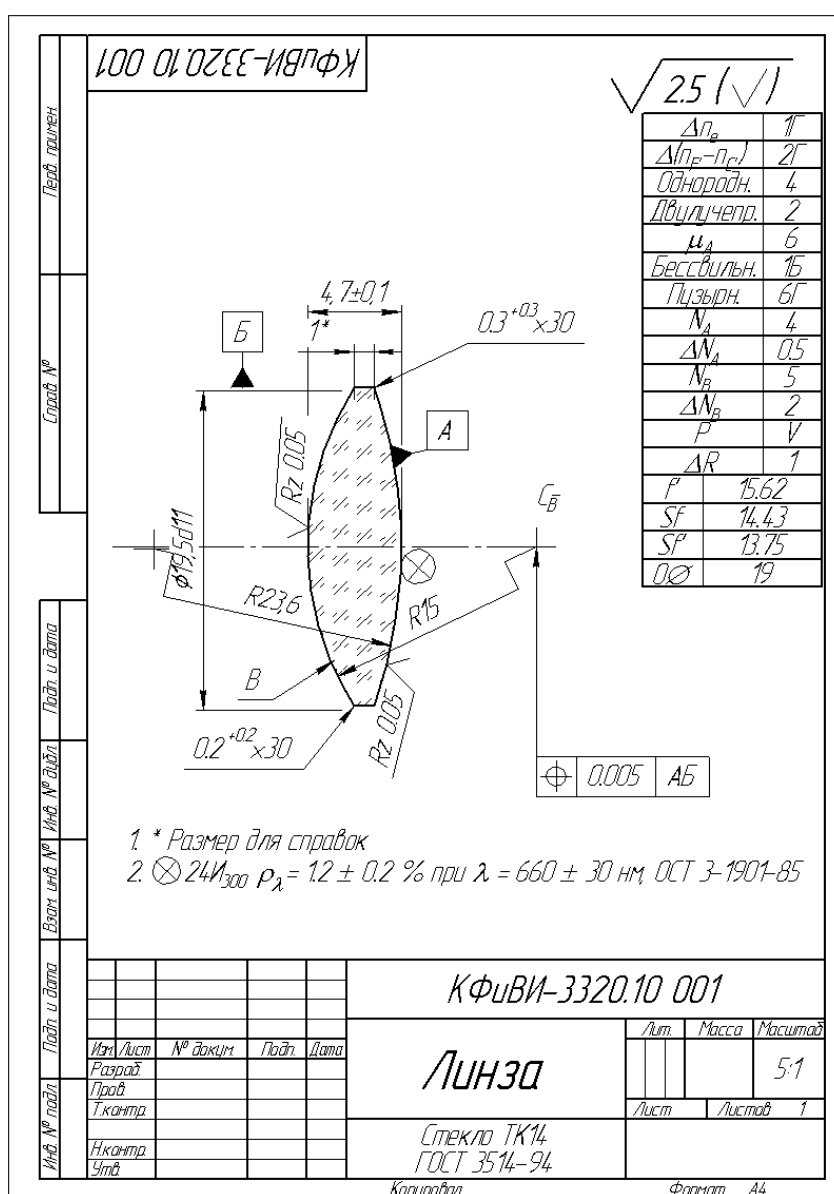


Рис. 1.2 Пример оформления чертежа линзы объектива

Ввиду достаточно жестких требований к качеству изображения при достаточно большом угловом поле целесообразно использовать для объектива насыпную в оправе конструкцию (рис.1.1). Рассмотрим, как выполняется расчет допусков на конструктивные параметры и материал склеенного компонента объектива, отдельной линзы этого компонента и оправы, в которую он устанавливается, а также призмы, установленной за объективом.

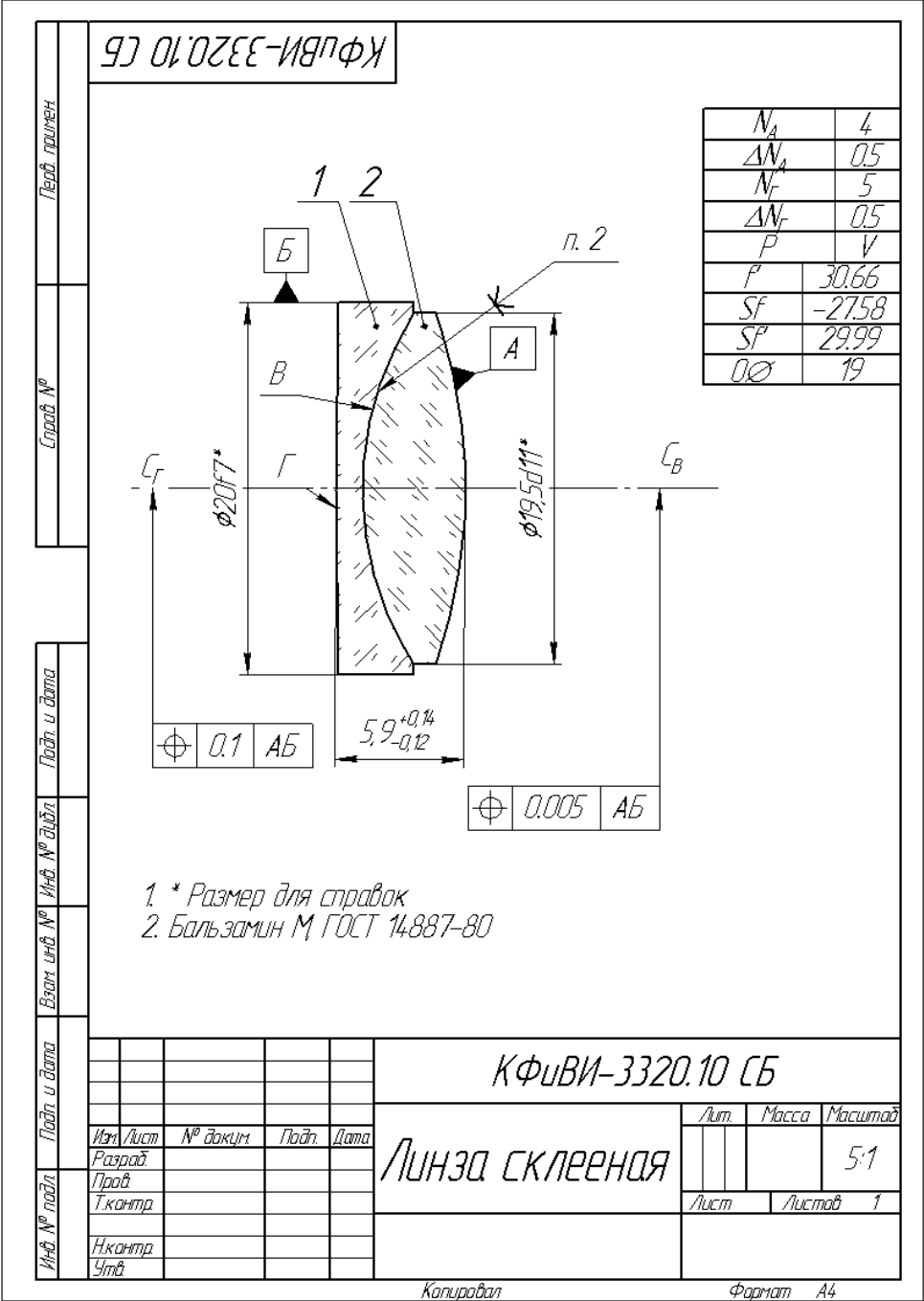


Рис. 1.3 Пример оформления склеенной линзы объектива

Для одиночной линзы необходимо определить требования к ее материалу по показателю преломления, средней дисперсии, оптической однородности, двулучепреломлению, показателю ослабления, бессвильности и пузырьности, вычислить допуски на отклонение формы оптической

поверхности  $N$  и  $\Delta N$ , а также на чистоту поверхностей  $P$ . Эти данные должны быть сведены в таблицу, расположенную в правом верхнем углу чертежа (рис. 1.2). Кроме этого, требуется вычислить допуски на толщину линзы  $\Delta d$ , ее диаметр и децентрировку поверхностей линзы  $\Delta e$ . На самом чертеже указать все необходимые размеры, фаски, шероховатости, покрытия. Рекомендации по выбору полного диаметра линз и размеров фасок приведены в приложении 3.

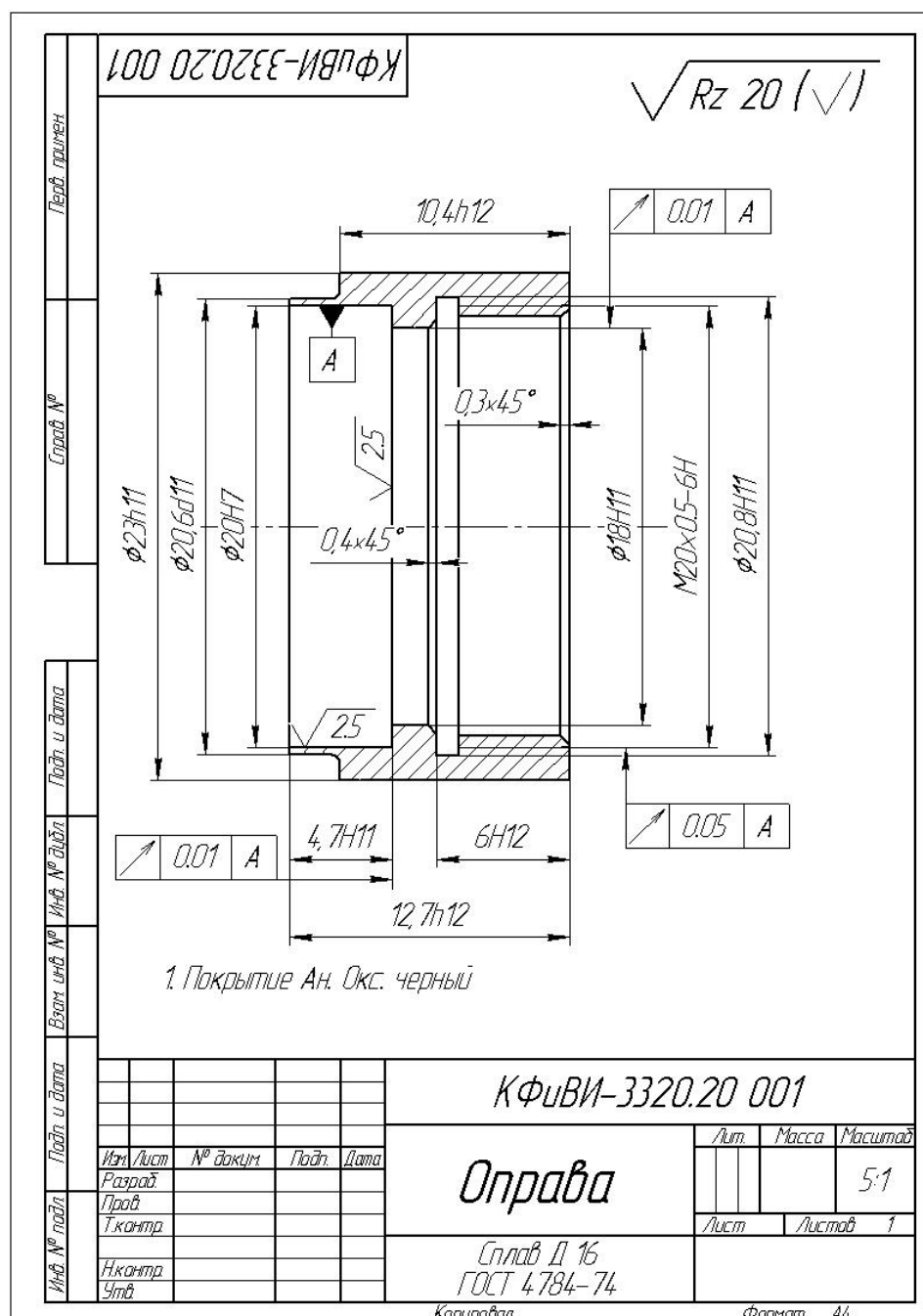


Рис. 1.4 Пример оформления чертежа оправы

Для склейки необходимо указать допуски  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $P$  и  $\Delta e$ , обусловленные деформациями и смещениями линз при их склеивании. Пример оформления чертежа склейки приведен на рис. 1.3.



Для оправы, исходя из требований к децентрировке поверхностей склейки, требуется определить значения допусков на диаметр посадочного отверстия оправы, перпендикулярность опорного буртика и эксцентриситет посадочного отверстия (светового отверстия) оправы при выполнении условия самоцентрирования поверхности  $D/2R \geq 0.3$  (рис.1.4). При невыполнении этого принципа допуск на эксцентриситет ставится на диаметр посадочного гнезда. Если расчет показывает, что необходим жесткий допуск по децентрировке ( $\Delta e < 10$  мкм), то нужна результативная обработка линзы в оправе, для чего на чертеже оправы необходимо предусмотреть технологическую резьбу для установки оправы в центрировочный патрон [1].

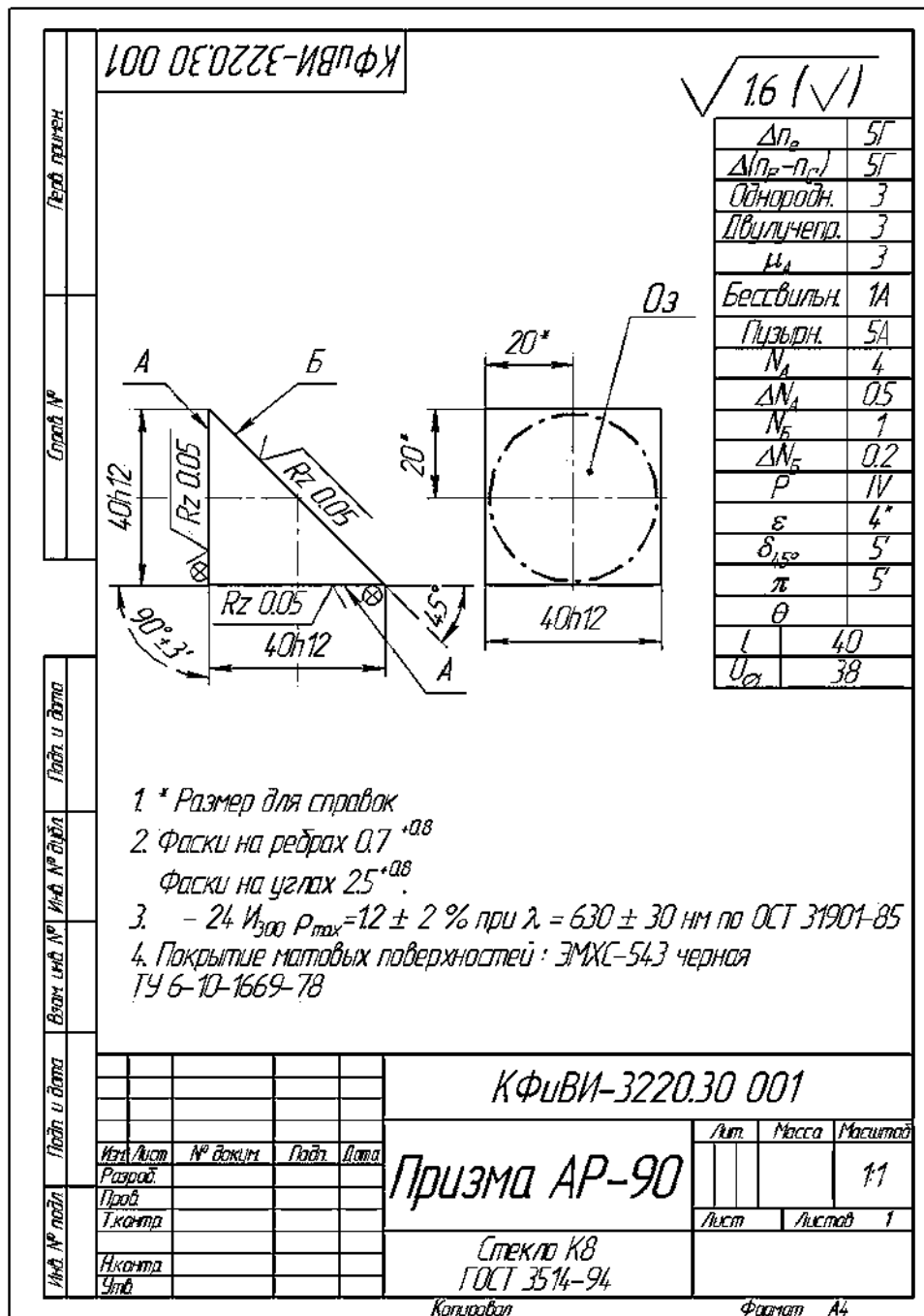


Рис. 1.5 Пример выполнения чертежа призмы

Для призмы нужно провести габаритный расчет, определить ее световой диаметр и требования к материалу призмы, допуски на форму отражающих и преломляющих поверхностей, их чистоту, а также на углы призмы и ее пирамидальность. При расчете и назначении допусков надо помнить, что на отражающие поверхности ставятся более жесткие допуски. Пример оформления чертежа призмы приведен на рис. 1.5.

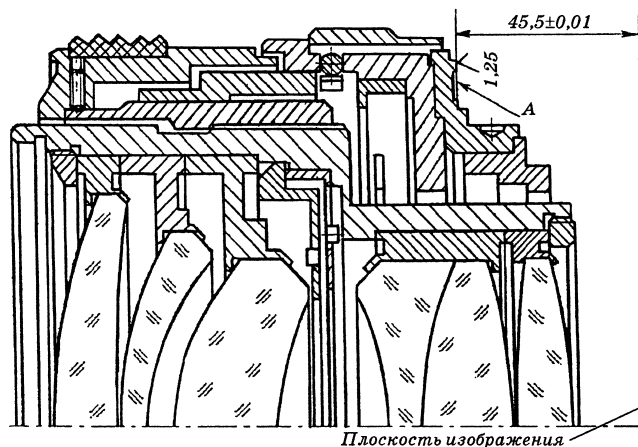
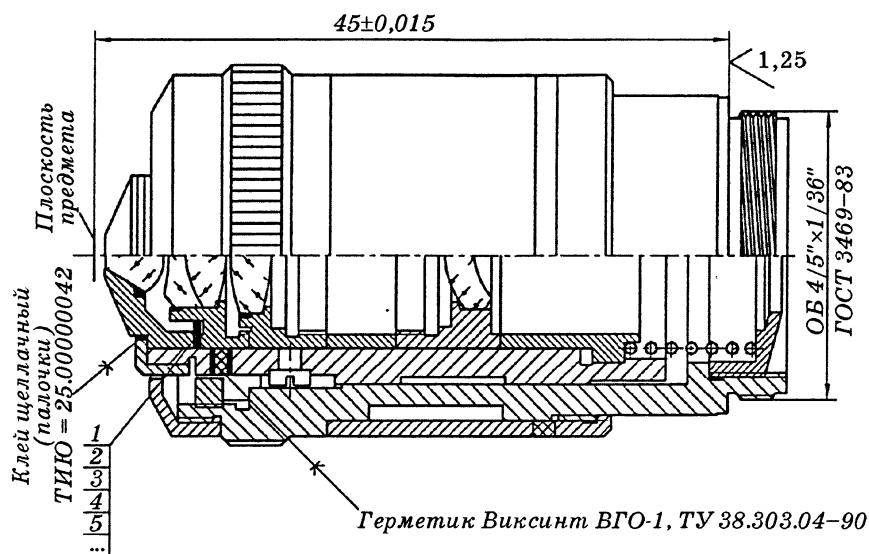


Рис. 1.6. Пример насыпной в оправе конструкции фотообъектива



1.7 Пример насыпной в оправе конструкции микрообъектива

На сборочных чертежах фотообъективов необходимо указать рабочий отрезок – расстояние от опорного торца корпуса объектива до плоскости изображения (рис. 1.6), присоединительный размер (например, диаметр резьбы, с помощью которой фотообъектив ввинчивается в корпус фотоаппарата) и габаритные размеры. Допуск на размер рабочего отрезка определяется исходя из глубины резкости объектива.

На сборочных чертежах микрообъективов необходимо указать высоту микрообъектива - расстояние от плоскости опорного торца микрообъектива до плоскости предмета (45 или 33 мм), диаметр резьбы объектива, с помощью которой осуществляется крепление микрообъектива к тубусу (ОБ 4/5"×1/36", M27×0.75 или M42×0.75) и габаритные размеры (рис. 1.7).

Примеры крепления призм различными способами приведены на рис. 1.8 – 1.11. При разработке узла крепления надо помнить, что базировать призму желательно на нерабочую грань, иначе возможно нарушение условия полного внутреннего отражения, а ребра и углы призмы должны по возможности не соприкасаться с элементами оправы во избежание выколов стекла.

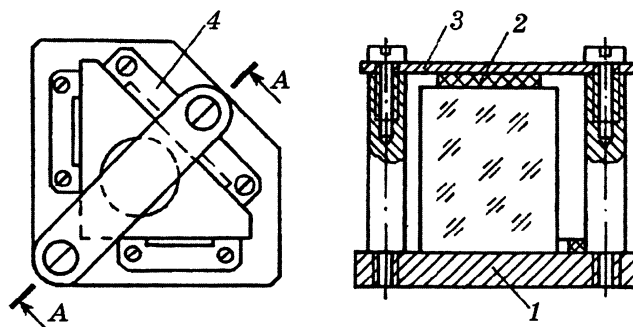


Рис. 1.8 Крепление призмы AP-90 накладкой

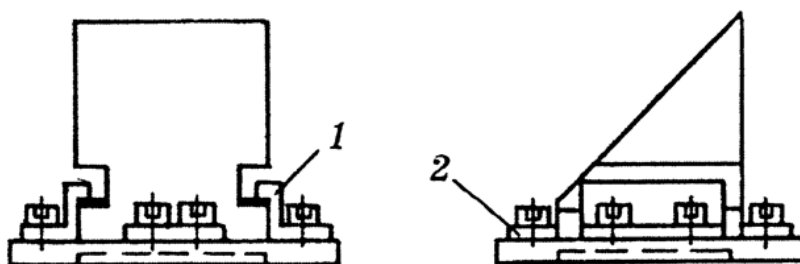


Рис. 1.9 Крепление призмы AP-90 угольниками

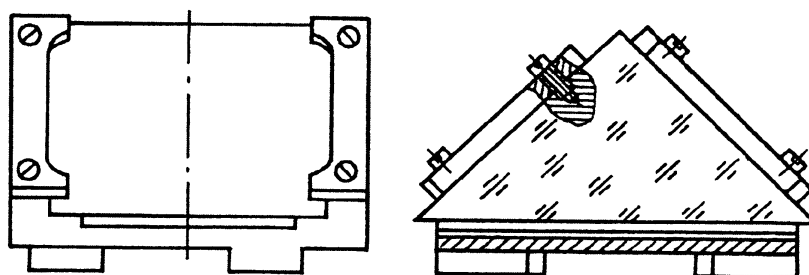


Рис. 1.10 Крепление призмы BP-180 прижимными планками

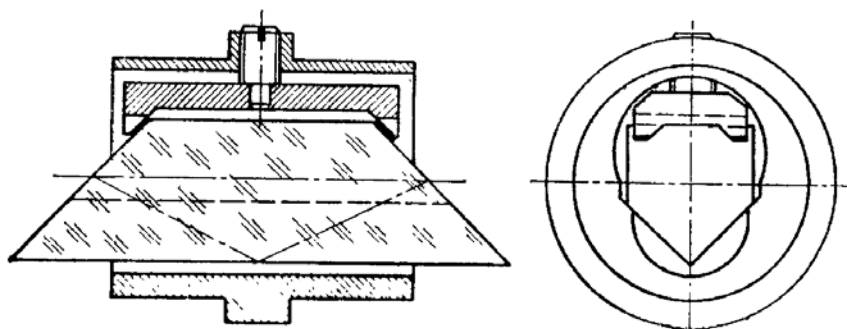


Рис. 1.11 Крепление призмы A<sub>к</sub>P-0 установочным винтом

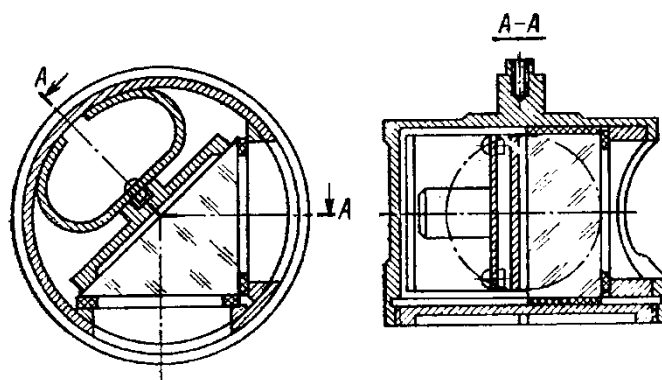


Рис. 1.12 Крепление призмы AP-90 пружиной

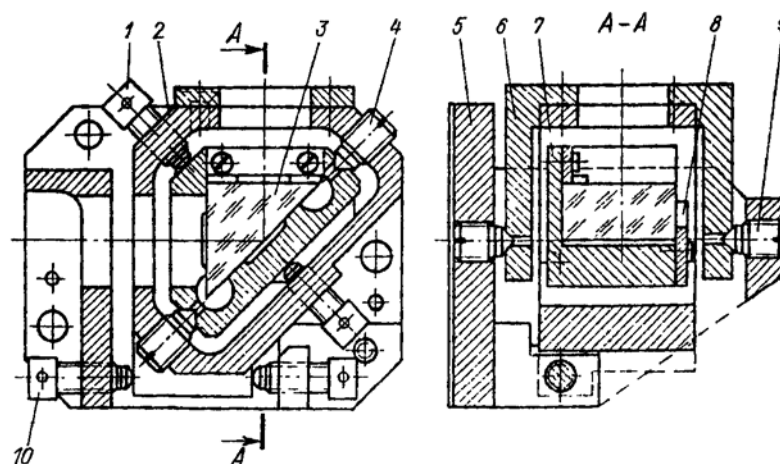


Рис. 1.13 Крепление призмы в юстируемой оправе

С более подробными рекомендациями по разработке деталей и сборочных единиц оптических приборов, оформлению их чертежей и большим количеством примеров можно ознакомиться в работах [1,4,5].

## 2. ВЫБОР ДОПУСКОВ НА МАТЕРИАЛ ЛИНЗ ОБЪЕКТИВА

В качестве примера выберем двояковыпуклую линзу, входящую в состав склейки объектива. Чертеж линзы должен включать таблицу (рис.1.2), которая располагается в правом верхнем углу чертежа и включает требования к материалу линзы – категорию и класс по показателю преломления и средней дисперсии, категорию по оптической однородности, категорию по двойному двулучепреломлению, категорию по показателю ослабления, категорию и класс по бессвильности и пузырности.

Расчет допусков на показатели качества оптического материала может быть произведен на основе существующих математических моделей или методом аналогий, когда допуски назначаются в соответствии со значениями, взятыми из практики для близкого по характеристикам объектива [1]. Первый способ более актуален на сегодняшний день, особенно с учетом наличия большого количества САПР для расчета оптических систем.

### 2.1 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ОТКЛОНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ЛИНЗЫ

Отклонение показателя преломления материала линзы приводит к изменению сферической аберрации, что ухудшает качество изображения, и фокусного расстояния объектива  $\Delta f'$ , что, например, приводит к погрешности измерения углов автоколлиматором. Для фотообъектива более критично изменение сферической аберрации. Отклонение фокусного расстояния приводит только к изменению размера изображения  $\Delta y' = 2\omega \Delta f'$ , где  $2\omega$  – поле зрения объектива. Изменение сферической аберрации связано с изменением показателя преломления соотношением

$$\Delta n_i \leq 2 \Delta \delta s' (h_1/h_i)^4 / \sqrt{m} h_1^2 f'^2 (dA_i/dn_i),$$

где  $\Delta n_i$  – допуск на показатель преломления  $i$ -й линзы,  $m$  – число линз,  $h_i$  – высота точки встречи луча с  $i$ -й линзой,  $f'$  – фокусное расстояние объектива,  $\Delta \delta s'$  – допустимое изменение сферической аберрации,  $dA_i/dn_i = (3n_i^2 - 2n_i)\varphi_i'^3/(n_i - 1)^3 + ((6n_i - 2)\sigma_i - (4n_i - 1)\rho_{1i})\varphi_i'^2/(n_i - 1)^2 + ((1 + 2/n_i^2)\rho_{1i}^2 + (4 + 4/n_i^2)\sigma_i\rho_{1i} + (3 + 2/n_i^2)\sigma_i^2)(\varphi_i'/(n_i - 1))$ , где  $\varphi' = 1/f'$  – оптическая сила  $i$ -й линзы,  $\rho = 1/r$  – кривизна первой по ходу луча поверхности  $i$ -й линзы,  $\sigma = 1/s$  – сходимости (величина обратная расстоянию от линзы до создаваемого ею изображения).

Формула (1) достаточно громоздка, и требует большого количества промежуточных вычислений. Поэтому можно поступить проще, воспользовавшись программой расчета оптики ОПАЛ и рассчитав коэффициент влияния  $Sn_i = dn_i/d(\Delta \delta s_i)$ , связывающий изменение

показателя преломления стекла  $i$ -й линзы с изменением сферической аберрации. Для расчета коэффициента влияния необходимо выбрать в библиотеке ОПАЛ объектив «Индустар – 50» (или задать его) и перейти в пункт «Технология» меню «Выполнить». В открывшемся подменю выбрать пункт «Влияние параметров на аберрации» → «Ввод исходных данных», после чего откроется окно, в котором можно задать марки исследуемых параметров (в нашем случае это марка показателя преломления) и марки исследуемых функций (марка продольной сферической аберрации). Под термином «марка» в программе ОПАЛ понимается переменная, которой присваивается определенное значение, например изменение радиуса кривизны линзы или изменение аберрации, вызванное изменением этого радиуса.

Марка показателя преломления будет иметь вид «N», марка продольной сферической аберрации - «DSA/01», где значение «0» - расчет проводится для основной длины волны «е», значение «1» - расчет проводится для луча, проходящего через край входного зрачка. После задания необходимых параметров, окно программы должно соответствовать рис. 2.1.

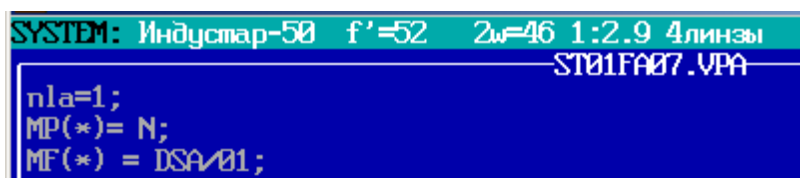


Рис. 2.1 Окно ввода исходных данных для расчета коэффициента влияния показателя преломления на продольную сферическую аберрацию

Нажатие клавиши «F4» осуществляет трансляцию исходных данных. После этого необходимо выйти из окна задания исходных данных расчета, не забыв сохранить изменения.

Затем нажатием клавиши «ENTER» запускается пункт меню «Расчет матрицы влияния». Для просмотра таблицы влияния параметра на аберрацию выбирается пункт «Просмотр результатов», при запуске этой опции необходимо подтвердить заданные выше марки нажатием на клавишу «Пробел». Вид таблицы приведен на рис. 2.2.

SYSTEM: Индустар-50 f'=52 2w=46 1:2.9 4линзы						JOB:
ИСК.	N	N	N	N		
СИСТ.	1	3	5	6		
ИЗМ.ПАР->	0.	.00050	.00050	.00050	.00050	
DSA /01	1.2493	-.02236	.03617	.03246	-.04486	

Рис. 2.2 Таблица влияния на продольную сферическую аберрацию отклонения показателя преломления

Из полученной таблицы видно, что для исследуемой линзы (она последняя в таблице) изменение показателя преломления на величину, равную  $5 \times 10^{-4}$  приводит к изменению продольной сферической аберрации на 0.0448 мм. Тогда коэффициент влияния будет равен  $S_n = 0.0005/0.0448 = 0.011$ . Допустимое изменение сферической аберрации для объектива можно

определить из [3] как  $\Delta\sigma\phi = 3.9 \lambda / A'^2$ . Принимая среднее значение длины волны  $\lambda = 0.55$  мкм и определяя заднюю апертуру как  $A' = D/2f' = 0.17$ , получим  $\Delta\sigma\phi = 74.2$  мкм.

Необходимо учесть, что на изменение сферической аберрации оказывает влияние не только отклонение показателя преломления, но и погрешность толщин линз, погрешность воздушных промежутков между линзами и погрешность радиусов кривизны линз – всего 17 первичных погрешностей. Тогда на погрешность отклонения показателя преломления отдельной линзы придется допуск равный  $\Delta\sigma\phi_i = \Delta\sigma\phi / \sqrt{17} = 18$  мкм. Допуск на показатель преломления составит  $\Delta n = \Delta\sigma\phi_i \times S n = 0.011 \times 18 \times 10^{-3} \approx 1.98 \times 10^{-4}$  (при вычислении допуска необходимо задавать допуск на аберрацию в миллиметрах). Обращаясь к таблице 1, видим, что такой допуск соответствует 1 категории по показателю преломления. Класс по однородности желательно выбирать в пределах указанной категории (класс Г) [2].

Если к объективу предъявляются повышенные требования по качеству изображения, то используется пересчет на конкретную плавку стекла и в этом случае необходимо минимизировать отклонение показателя преломления для этой плавки. Выбор класса (А, Б или В) тогда определяется, какими изменениями  $\Delta n$  можно пренебречь при расчете системы.

Таблица 1. Категории и классы однородности партии заготовок бесцветного оптического стекла по показателю преломления

Категория по показателю преломления	Предельное отклонение показателя преломления $\pm \Delta n_e \cdot 10^{-4}$	Класс однородности по показателю преломления	Наибольшая разность показателей преломления $\Delta n_e \cdot 10^{-4}$
1	2	А	0,2
2	3	Б	0,5
3	5	В	1,0
4	10	Г	В пределах категории, указанной при заказе
5	20		

## 2.2 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ОТКЛОНЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДИСПЕРСИИ

Для выбора категории и класса стекла по средней дисперсии в пункте «Влияние параметров на аберрации» в окне «Ввод исходных данных» следует указать следующие марки (рис. 2.3). Здесь «nla = 3» – количество используемых длин волн (основная длина волны 0.55 мкм и дополнительные 0.65 и 0.48 мкм), «ND» – марка отклонения средней дисперсии линзы, «DSA/'1» – марка хроматической аберрации положения, вызываемой отклонением дисперсии стекла, значение «'» говорит о том, что расчет ведется для всех заданных длин волн.

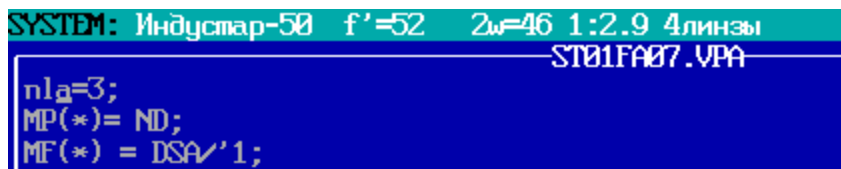


Рис. 2.3 Окно ввода исходных данных для расчета коэффициентов влияния отклонения дисперсии на хроматическую aberrацию положения

Дальнейшие действия аналогичны описанным в пункте 2.1. Анализ результатов, полученных в окне «Просмотр данных» (рис. 2.4), показывает, что изменение дисперсии на  $5 \times 10^{-5}$  приводит для последней линзы к изменению aberrации на 0.015 мм. Тогда коэффициент влияния будет равен  $S_{\Delta(n_{fI}-n_{CI})} = 5 \times 10^{-5} / 0.015 = 3.3 \times 10^{-3}$ .

SYSTEM: Индустар-50 f'=52 2w=46 1:2.9 4линзы					
	ИСК.	ND	ND	ND	ND
	СИСТ.	1	3	5	6
ИЗМ.ПАР->	0.	.00005	.00005	.00005	.00005
DSA /'1	.48708	-.01004	.01219	.00964	-.01535

Рис. 2.4 Таблица влияния на хроматизм положения отклонения дисперсии стекла

Предельное значение хроматической aberrации положения может быть вычислено из выражения  $\Delta x_p = \bar{\lambda} / A'^2 = 19$  мкм. Так как вклад в указанную aberrацию вносят 4 линзы, то вклад каждой из них составит  $\Delta x_{pi} = \Delta x_p / \sqrt{4} = 9.5$  мкм. Допуск на отклонение дисперсии составит  $\Delta(n_{fI} - n_{CI}) = S_{\Delta(n_{fI}-n_{CI})} \times \Delta x_{pi} = 3.3 \times 10^{-3} \times 9.5 \times 10^{-3} = 3.1 \times 10^{-5}$ , что соответствует 2 категории по средней дисперсии (см. таблицу 2), класс следует взять в пределах категории (Г). Класс В используется при пересчете на плавки.

Таблица 2. Категории и классы однородности бесцветного оптического стекла по средней дисперсии

Категория по средней дисперсии	Предельное отклонение средней дисперсии $\pm \Delta(n_F - n_C) \cdot 10^{-5}$	Класс однородности по средней дисперсии	Наибольшая разность средних дисперсий $\pm \Delta(n_F - n_C) \cdot 10^{-5}$
1	2	В	1,0
2	3	Г	В пределах категории, указанной при заказе
3	5		
4	10		
5	20		

Для вычисления допуска на среднюю дисперсию также можно пользоваться следующей формулой:

$$\Delta(n_{fI} - n_{CI}) = -\frac{\Delta x_p}{\sqrt{m} \times f'^2} \left( \frac{h_1}{h_i} \right)^2 (n_d - 1) i f'_i,$$

где  $h$  – высота падения луча на линзу,  $f'_I$  – фокусное расстояние  $i$ -й линзы,  $f'$  – фокусное расстояние объектива,  $m$  – число линз объектива.



## 2.3 ВЫБОР ДОПУСКОВ НА СТЕКЛО ПО ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ, ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЮ, ПОКАЗАТЕЛЮ ОСЛАБЛЕНИЯ, БЕССВИЛЬНОСТИ И ПУЗЫРНОСТИ

Категория стекла по оптической однородности назначается, как правило, по аналогии. Для фотографических объективов рекомендуют выбирать 3-4 категорию (см. таблицу 3).

Таблица 3. Категории бесцветного оптического стекла по оптической однородности

Категория оптической однородности	Отношение углов $\varphi/\varphi_0$ , не более
1	1,0
2	1,0
3	1,1
4	1,2
5	1,5
Примечание. Дифракционное изображение точечной миры должно состоять из круглого пятна, окруженного концентричными кольцами, и не должно иметь разрывов, хвостов и заметного на глаз отклонения от круга.	

Аналогично поступают и с выбором категории стекла по двулучепреломлению. Для линз фотообъектива рекомендуется использовать стекло 2-й категории (см. таблицу 4).

Таблица 4. Категории оптического бесцветного стекла по двулучепреломлению

Категория стекла	Двулучепреломление, нм/см, не более, при оптическом коэффициенте напряжения $B \cdot 10^{-12}, \text{Па}^{-1}$			Примечание
	до 2,0	св. 2,0 до 2,8	св. 2,8	
1	1,5	2	3	—
2	4	6	8	—
3	7	10	13	В заготовках деталей поляризационных приборов при просмотре в поляризованном свете в рабочем направлении не должны обнаруживаться просветленные участки
4	10	15	20	—
5	35	50	65	—
6	80	80	80	Для кристаллов и поликристаллических материалов

Выбор категории стекла по показателю ослабления зависит от суммарной толщины деталей объектива. В нашем случае суммарная толщина 4-х линз объектива  $L = 0.27 + 0.1 + 0.12 + 0.47 = 0.86$  см, что позволяет считать его тонким ( $L < 1$  см) и назначить 6 категорию стекла по показателю ослабления (см. таблицу 5).

Таблица 5. Категории бесцветного оптического стекла по показателю ослабления

Категория	Показатель ослабления $\mu_A, \text{см}^{-1}$	Коэффициент пропускания стекла в слое 1 см, $\tau_A$	Коэффициент внутреннего пропускания для толщины 10 см $\tau_{1A}$ , не менее
1	0,0002–0,0004	0,9995–0,9990	0,991
2	0,0005–0,0009	0,999–0,998	0,980
3	0,0010–0,0017	0,998–0,996	0,962
4	0,0018–0,0025	0,996–0,994	0,944
5	0,0026–0,0035	0,994–0,992	0,925
6	0,0036–0,0045	0,992–0,990	0,902
7	0,0046–0,0065	0,990–0,985	0,861
8	0,0066–0,0130	0,985–0,970	0,741

Изменение пропускания объектива при изменении показателя ослабления можно оценить по формуле  $d\tau = \sum_1^k \frac{\tau l_k}{\tau_k} d\tau_k$ , где  $l$  – толщина  $k$ -го компонента объектива,  $\tau_k$  – коэффициент пропускания  $k$ -го компонента объектива,  $d\tau_k$  – изменение коэффициента пропускания  $k$ -го компонента,  $d\tau$  – изменение коэффициента пропускания объектива. Для объектива «Индустар-50» при переходе от 1-й категории к 6-й при пропускании объектива  $\tau = 0.8$  изменение пропускания будет  $d\tau = 0.8 \times 0.86 \times 0.009/0.99 = 0.006 = 0.6\%$ . Уменьшение пропускания системы на 1-2% считается вполне допустимым, поэтому расчетное отклонение 0.6% укладывается в допуск.

По бессвильности на объективы рекомендуется назначать допуск по 1-й категории, т.к. наличие свилей приводит к резкому снижению разрешающей способности (таблица 6). 2-я категория допускается для линз окуляров, конденсоров, защитных стекол, работающих с малым увеличением. Класс стекла по бессвильности должен соответствовать классу Б, класс А используется для призм.

Критерием для назначения категории и класса по пузырьности является условие, по которому суммарная площадь пузырей во всех линзах объектива не должна превышать 2.5% площади входного зрачка [2]. Назначим допуск 6Г и посмотрим, выполняется ли указанный критерий. Для выполнения расчета воспользуемся данными из таблицы 7.

Сначала вычислим массу линз – для этого надо в программе ОПАЛ в разделе «Технологии» выбрать пункт «Масса линз». Результат расчета приведен на рис. 2.5.

Таблица 6. Категории и классы оптического стекла по бессвильности

Категория	Характеристика бессвильности	Преимущественная область применения
1	Не допускаются свили, обнаруживаемые при просмотре на установках, градуированных по контрольному образцу 1-й категории по ГОСТ 3521-69 или по образцу сравнения для ИК-области	Оптическое стекло всех типов в заготовках диаметром или с наибольшей стороной не более 500 мм
2	Не допускаются свили, обнаруживаемые при просмотре на установках, градуированных по контрольному образцу 2-й категории по ГОСТ 3521-69 или по образцу сравнения для ИК-области	
3	Не допускаются видимые в проходящем свете потоки свилей; допускаются одиночные и узловые свили	Бесцветное стекло в заготовках диаметром или с наибольшей стороной св. 500 мм; цветное стекло и стекло с особыми оптическими свойствами в заготовках любых размеров
3а	Не допускаются видимые в проходящем свете потоки свилей, одиночные и узловые свили, искажающие рассматриваемый через стекло объект, заданный техническими требованиями на стекло заготовки	Оптическое стекло всех типов в заготовках любых размеров для деталей наблюдательных приборов
4	Допускаются свили, оставшиеся после перемешивания по установленному технологическому режиму для стекла конкретной марки	Бесцветное стекло в заготовках диаметром или с наибольшей стороной св. 500 мм; цветное стекло и стекло с особыми оптическими свойствами в заготовках любых размеров
Класс	Число направлений просмотра	
А	Два взаимно перпендикулярных	
Б	Одно	
Примечание. В бесцветном и цветном стекле, заказанном по 1-й и 2-й категориям, допускаются узловые свили длиной не более 10 мм и в количестве не более 10 на 1кг.		

Так как суммарная масса линз составляет всего 6.64 гр, а в соответствии с классом пузырности Г на 1 кг стекла должно приходиться не более 100 пузырей, то на всю оптическую систему теоретически может приходиться всего 1 пузырь диаметром 0.7 мм. Его площадь равна  $0.4 \text{ мм}^2$ , в то время как диаметр входного зрачка системы  $127.2 \text{ мм}^2$ . Площадь пузыря меньше 1% площади входного зрачка, поэтому критерий выполняется. Более точно

выбор категории и класса по пузырьности и свильности можно выполнить через расчет деформации волнового фронта, вызванный этими дефектами, согласно работам [3,7].

Таблица 7. Категории и классы бесцветного оптического стекла по пузырьности

Категория	Диаметр пузыря, мм, не более	Группа	Суммарная площадь, мм <sup>2</sup> , сечений пузырей в 100 см <sup>3</sup>
1	Не допускается		До 0,029 (включ.)
1a	0,05	11 ↑	Св. 0,029 до 0,0125
2	0,1	12	* 0,125 * 0,250
3	0,2	13	* 0,25 * 0,50
4	0,3	14	* 0,5 * 1,0
5	0,5	15	* 1,0 * 2,0
6	0,7	16	* 2,0 * 4,0
7	1,0	17	
8	2,0		
9	3,0		
10	5,0		
Класс	Среднее число пузырей диаметром св. 0,03 мм в 1 кг, не более	Класс	Среднее число пузырей в 100 см <sup>3</sup>
А	3	21	До 1,0 включ.
Б	10	22	Св. 1,0 до 2,5
В	30	23	* 2,5 * 6,3
Г	100	24	* 6,3 * 16,0
Д	300	25	* 16,0 * 40,0
Е	1000	26	* 40,0 * 80,0
Ж	3000	27	* 80,0 * 150,0
		28	* 150,0
Примечание. Пузыри диаметром менее 0,03 мм не учитывают.			

№	№ пов.		МАССА(г) констр.	Форма	Радиусы		Толщина (мм)	Св. диаметры		Плотн г/мл
	А	Б			А (мм)	Б (мм)		А	В	
1	1	2	1.30	□	17.10	0.00	2.7	18.4	18.4	3.5
2	3	4	1.70	⊗	-33.57	-14.56	1.1	15.9	14.8	3.2
3	5	6	1.52	⊗	346.70	-15.00	1.2	15.6	17.4	2.6
4	6	7	2.12	○	15.00	23.60	4.7	17.4	17.6	3.5

Рис. 2.5 Окно с конструктивными параметрами линз объектива

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКА НА ОБЩУЮ И МЕСТНУЮ ПОГРЕШНОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ, КЛАССА ИХ ЧИСТОТЫ И ПОГРЕШНОСТИ ТОЛЩИН ЛИНЗ

#### 3.1 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ОБЩУЮ ОШИБКУ

Отклонение радиуса кривизны преломляющей поверхности линзы приводит к появлению сферической аберрации. Ввиду особенности контроля радиуса кривизны интерференционным способом, допуск на этот параметр назначается в кольцах интерференционной картины. Для пересчета допуска в линейные единицы можно воспользоваться формулой  $\Delta r = \frac{4 r^2 N \lambda}{D^2}$ , где  $r$  – номинальное значение радиуса кривизны линзы,  $N$  – допуск в интерференционных кольцах,  $D$  – диаметр пробного стекла.

Исходя из допустимого значения сферической аберрации  $\Delta c\phi$ , допуск  $N$  можно определить из выражения

$$N_i = \frac{2 \Delta c\phi}{4 \sqrt{m} h_1^2 f'^2} \left( \frac{h_1}{h_i} \right)^4 \frac{D_i^2}{dA_i \lambda}.$$

Пользоваться этой формулой сложно, так как требуется рассчитать коэффициент влияния каждого радиуса  $dA$ , что довольно трудоемко. Поэтому расчет допуска  $N$  желательно проводить с помощью программы расчета оптики ОПАЛ. Для этого необходимо в окне ввода данных ввести марки, соответствующие рис. 3.1.

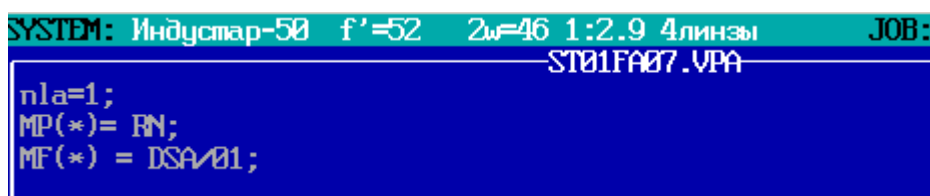


Рис.3.1 Окно ввода исходных данных для расчета коэффициентов влияния отклонения радиусов кривизны линз на сферическую аберрацию

На рис. 3.1 марка «RN» – допуск под пробное стекло (по умолчанию изменение этого параметра составляет 3 кольца). После трансляции данных в пункте «Просмотр результатов» было сформировано окно с результатами, приведенными на рис. 3.2.

SYSTEM: Индустар-50 f'=52 2w=46 1:2.9 4линзы					JOB: VP 1:37 OPAL-I			
	ИСК.	RN	RN	RN	RN	RN	RN	RN
	СИСТ.	1	2	3	4	5	6	7
ИЗМ.ПАР->	0.	-.00568	-51440.	-.03114	.00671	-3.3815	-.00467	.01154
DSA /01	1.1771	-.01537	-.01316	-.02409	-.02348	-.00475	-.00399	-.01305

Рис.3.2 Таблица влияния на продольную сферическую аберрацию отклонений радиусов кривизны линз объектива

Так как значение допуска на радиус линзы в миллиметрах зависит от диаметра линзы, то в верхней строке полученной таблицы изменение параметра тоже задано в миллиметрах. Для 6-й и 7-й поверхностей, принадлежащих 4-й линзе, передаточные коэффициенты составят  $S_{N6} = 0.00467/0.00399 = 1.17$  и  $S_{N7} = 0.01154/0.01305 = 0.88$ . В предыдущем разделе было определено, что на каждую погрешность, приводящую к сферической аберрации, можно выделить допуск  $\Delta\sigma_i = \Delta/\sqrt{17} = 18$  мкм. Тогда получим  $\Delta r_6 = S_{N6} \times \Delta\sigma_i = 1.17 \times 18 = 21$  мкм и  $\Delta r_7 = S_{N7} \times \Delta\sigma_i = 0.88 \times 18 = 15.8$  мкм. Переходя к допуску в интерференционных кольцах по формуле  $N = \frac{D^2 \Delta r}{4 r^2 \lambda}$ , получаем допуски на общую ошибку  $N_6 = \frac{302.8 \times 21 \times 10^{-3}}{4 \times 225 \times 0.55 \times 10^{-3}} = 12.8$  и  $N_7 = \frac{309.8 \times 15.8 \times 10^{-3}}{4 \times 557 \times 0.55 \times 10^{-3}} = 4$ . Широкий допуск на 6 поверхность объясняется тем, что она идет в склейку и слабо влияет на изменение аберрации (что подтверждается таблицей на рис. 2.2). Желательно задать  $N_6 = 5$ , так как при грубом изготовлении склеиваемых поверхностей возможна их расклейка [2].

### 3.2 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА МЕСТНУЮ ОШИБКУ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ

Вычислим допуск на местную ошибку поверхностей линз. Известно, что местная ошибка поверхностей линз приводят к появлению астигматизма, предельное значение которого может быть определено из выражения  $\Delta(x'_m - x'_s) = 0.68 \lambda / A'^2 = 0.68 \times 0.55 / 0.029 = 12.9$  мкм [4]. Всего объектив имеет 7 рабочих преломляющих поверхностей, поэтому на каждую из них придется  $\Delta_i(x'_m - x'_s) = \Delta(x'_m - x'_s) / \sqrt{7} = 4.9$  мкм. В учебной версии ОПАЛа нет возможности напрямую вычислить коэффициенты влияния для местной ошибки, поэтому можно воспользоваться приближенной формулой

$$\Delta N_i = \frac{D_i^2 \Delta_i(x'_m - x'_s)}{\frac{h_i}{h_1} 4 (n'_i - n_i) f'^2 \lambda},$$

где  $h$  – высота встречи осевого луча с поверхностью. Подставляя в формулу исходные данные, получаем  $\Delta N_6 = \frac{(17.4)^2 \times 4.9 \times 10^{-3}}{\frac{7.8}{9} 4 (1.53 - 1.61) \times 52.4^2 \times 0.55 \times 10^{-3}} = 3.5$  (данная поверхность входит в склейку и разность показателей преломления на границе минимальна) и  $\Delta N_7 = \frac{(17.6)^2 \times 4.9 \times 10^{-3}}{\frac{7.8}{9} 4 (1.61 - 1) \times 52.4^2 \times 0.55 \times 10^{-3}} = 0.47 \approx 0.5$ . Допуск на шестую поверхность желательно ужесточить до  $\Delta N_6 = 2$ , так как выдержать его не составит большого труда.

Необходимые для расчета показатели преломления берутся из окна «Конструктивные параметры» программы ОПАЛ, высоты встречи осевого

луча с поверхностями можно посмотреть в пункте «Ход лучей в оптической системе», который находится в разделе «Анализ аберраций».

### 3.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ЧИСТОТЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛИНЗ

Допуск на чистоту поверхности определяет число дефектов типа царапин, точек, вскрытых пузырей, выколов и т.д. на единицу площади поверхности линзы. Требования к чистоте задаются с помощью классов чистоты – трех нулевых (Таблица 1), определяющих требования к оптическим деталям, установленным в плоскости формирования изображения, и двенадцати для деталей, удаленных от плоскости формирования изображения (Таблица 2).

Выбор класса чистоты производится, как правило, по аналогии – в таблице 3 приведены рекомендации по назначению в зависимости от типа и назначения оптической системы.

Таблица 1. Нулевые классы чистоты поверхностей оптических деталей

Класс чистоты $P$	Зона	Царапины		Диаметр точек, мм, не более	Число точек, не более, при световом диаметре		
		Ширина, мм, не более	Суммарная длина от светового диаметра, мм, не более		от 5 до 20 (включ.)	св. 20 до 60	св. 60
0–10	Средняя	0,002	0,2	0,004	1	3	5
	Краевая	0,004	0,3	0,006	3	6	10
0–20	Средняя	0,004	0,2	0,010	1	3	5
	Краевая	0,006	0,3	0,015	3	6	10
0–40	Средняя	0,006	0,2	0,015	1	3	5
	Краевая	0,008	0,3	0,025	3	6	10

Для визуальных оптических приборов, например микроскопов и телескопических систем класс чистоты оптических деталей назначают исходя из диаметра рабочего отверстия их поверхностей. Под рабочим отверстием понимается участок поверхности оптической детали, перекрываемый осевым пучком лучей, которые при выходе из окуляра образуют параллельный пучок диаметром 2 мм или пучок равный диаметру выходного зрачка оптической системы, если он меньше 2 мм.

Диаметр рабочего отверстия вычисляется по формуле  $D_n = 4 h_n / D_{p'}$ , при  $D_{p'} > 2$  мм, или  $D_n = 2 h_n$  при  $D_{p'} \leq 2$  мм, где  $D_n$  – диаметр рабочего отверстия  $n$ -й поверхности,  $h_n$  – высота крайнего луча осевого пучка на той же поверхности (определяется из окна «Ход лучей в оптической системе» программы OPAL).  $D_{p'}$  – диаметр выходного зрачка оптической системы. По

вычисленному диаметру рабочего отверстия выбирают класс чистоты по таблице 4.

Таблица 2. Основные классы чистоты поверхностей оптических деталей

Класс чистоты	Царапины		Точки		Скопление дефектов	
	Ширина, мм, не более	Суммарная длина, мм, не более	Диаметр, мм, не более	Число, не более	Диаметр ограниченного участка, мм	Суммарная площадь царапин и точек, мм <sup>2</sup> , не более
I	0,004	2,0×O <sub>∅</sub>	0,02	0,5×O <sub>∅</sub>	1,0	0,004
II	0,006		0,05		1,2	0,006
III	0,010		0,10		2,0	0,020
IV	0,02		0,30		5,0	0,10
V	0,04		0,50		10,0	0,40
VI	0,06		0,70		25,0	3,00
VII	0,10		1,00		50,0	10,00
VIII	0,20		1,5×O <sub>∅</sub>	2,0	0,4×O <sub>∅</sub>	Не нормируется
VIIIa	0,30	2,0×O <sub>∅</sub>				
IX		3,0		0,3×O <sub>∅</sub>		
IXa	0,4		1,5×O <sub>∅</sub>			

Таблица 3. Рекомендуемые классы чистоты поверхностей оптических деталей в зависимости от их вида и назначения

Классы чистоты	Вид и назначение оптических деталей
0 – 10 0 – 20	Сетки и коллективы в приборах с фокусным расстоянием окуляра или последующей оптической системы от 10 до 15 мм; шкалы и лимбы, рассматриваемые под увеличением более 25 <sup>×</sup> ; подложки дифракционных решеток.
0 – 20	Сетки и коллективы в приборах с фокусным расстоянием окуляра или последующей оптической системы от 15 до 25 мм; шкалы и лимбы, рассматриваемые под увеличением от 25 до 10 <sup>×</sup>
0 - 40	Сетки и коллективы в приборах с фокусным расстоянием окуляра или последующей оптической системы более 25 мм; шкалы и лимбы, рассматриваемые под увеличением менее 10 <sup>×</sup> ; подложки растров и детали, находящиеся в плоскости изображения фотоэлектрических систем, работающих в ИК области спектра



I	Первая линза широкоугольных окуляров <sup>4</sup> первая линза микрообъективов с увеличением больше $10^{\times}$
II	Призмы, коллективы, первая линза широкоугольного окуляра и другие детали, расположенные вблизи от плоскости действительного изображения оптической системы; линзы микрообъективов
III	Линзы окуляров телескопических приборов; микроскопов и измерительных лабораторных приборов; окулярные призмы; выравнивающие стекла фотообъективов; линзы обтекателей и линзы объективов, работающих в ИК области спектра в условиях солнечной засветки; пластины и кольца стоп; призмы, применяемые в качестве оптико-механических затворов и зеркал отражателей; плоско-параллельные пластины, применяемые в качестве компенсаторов светоделительных пластин; подложки для диэлектрических зеркал в световой зоне, применяемые в твердотельных лазерах и лазерных приборах
IV	Линзы окуляров, объективов и оборачивающих систем в телескопических приборах; призмы и пластины в параллельных и сходящихся пучках лучей телескопических приборов; лупы, линзы конденсоров и объективов, работающих в ИК области при отсутствии солнечной засветки; выравнивающие стекла фотоаппаратов; подложки для интерференционных светофильтров, защитные стекла электронно-лучевых трубок
V	Линзы объективов, окуляров и оборачивающих систем; головные призмы; призмы в параллельных пучках и защитные стекла в телескопических приборах; линзы и зеркала фотографических, киносъемочных и проекционных объективов диаметром от 20 до 50 мм; линзы конденсоров и объективов, работающих в ИК-области при отсутствии солнечной засветки, активные элементы лазеров, отражатели для лазеров
VI	Линзы объективов и оборачивающих систем телескопических приборов; линзы и зеркала фотографических, киносъемочных и астрономических объективов диаметром от 50 до 100 мм
VII	Линзы и зеркала фотографических, киносъемочных и астрономических объективов диаметром от 100 до 300 мм; смотровые стекла размером до 300 мм
VIII, IX	Линзы и зеркала фотографических и астрономических объективов диаметром от 300 до 500 мм; смотровые стекла размером от 300 до 500 мм

VIIIa, IXa	Линзы и зеркала фотографических и астрономических объективов диаметром более 500 мм; смотровые стекла размером более 500 мм
------------	---

Таблица 4. Зависимость класса чистоты поверхности оптической детали от диаметра рабочего отверстия

Диаметр рабочего отверстия в мм	Класс чистоты
0	P0 – 10
	P0 – 20
	P0 - 40
До 0.5	PI
От 0.5 до 1.5	PII
От 1.5 до 4.5	PIII
От 4.5 до 10	PIV
От 10 до 25	PV
От 25 до 50	PVI
Свыше 50	PVII

В нашем случае для фотообъектива следует руководствоваться таблицей 3 – чистота поверхностей линз фотообъектива должна соответствовать V категории.

### 3.4 РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ТОЛЩИНУ ЛИНЗЫ ПО ОСИ

Погрешность осевых толщин линз приводит появлению сферической аберрации и ухудшению качества изображения, а также к изменению фокусного расстояния, что может быть критично для некоторых оптических приборов, например биноклей. Пользуясь формулой для определения предельного значения сферической аберрации и зная число источников первичных погрешностей, приводящих к появлению сферической аберрации, определяем допустимый вклад отклонения толщины линзы в изменение сферической аберрации  $\Delta s_{\phi_i} = \Delta s_{\phi} / \sqrt{17} = 18 \text{ мкм}$ .

Окно ввода данных для расчета коэффициентов влияния толщин линз на сферическую аберрацию в ОПАЛ будет иметь вид, как на рис. 3.3, где «D» –

марка изменения толщин линз и воздушных промежутков (по умолчанию 50 мкм). Результат расчета представлен на рис. 3.4.

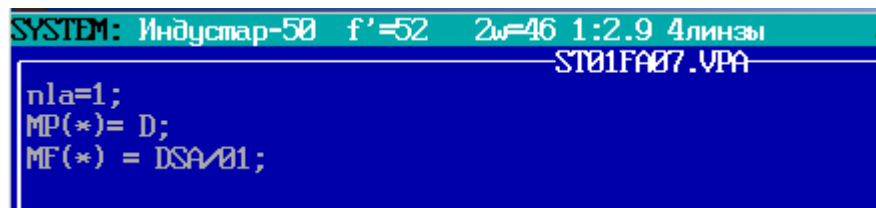


Рис. 3.3 Окно ввода марок для расчета коэффициента влияния толщин линз на сферическую абберацию

SYSTEM: Индустар-50	f'=52	2w=46	1:2.9	4линзы	JOB: VP	0:3
ИСК.	D	D	D	D	D	D
СИСТ.	1	2	3	4	5	6
ИЗМ.ПАР->	0.	.05000	.05000	.05000	.05000	.05000
DSA /01	1.1771	-.07474	-.13286	-.01353	-.03457	-.00597

Рис. 3.4 Таблица влияния на сферическую абберацию толщин линз объектива

Коэффициент влияния для последней линзы объектива (позиция 6) будет равен  $S_d = 0.05/0.0059 = 8.47$ . Умножая рассчитанный коэффициент влияния на допустимый вклад погрешности, получим  $\Delta d = S_d \times \Delta \text{сф}_i = 8.47 \times 18 = 152$  мкм. Округлив рассчитанный допуск до ближайшего значения из ряда  $\pm(0.005; 0.007; 0.01; 0.015; 0.02; 0.025; 0.03; 0.05; 0.07; 0.1; 0.2; 0.5; 0.7; 1)$  мм, получим значение допуска на осевую толщину линзы равное  $\pm 0.1$  мм.

#### 4. РАСЧЕТ ДЕЦЕНТРИРОВОК ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ И ДОПУСКОВ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОПРАВЫ

Децентрировки (несовпадение центров кривизны поверхностей линз с базовой осью корпуса объектива) приводят к появлению комы, предельное значение которой может быть рассчитано по формуле  $\Delta k = 1.8 \lambda / A' = 5.8$  мкм. Так как объектив имеет 7 поверхностей, то вклад каждой из них можно оценить как  $\Delta k_i = \Delta k / \sqrt{7} = 2.2$  мкм. Расчет коэффициентов влияния децентрировок поверхностей склейки выполняется с помощью программы ОПАЛ. Вид окна ввода данных и таблицы результатов приведен на рис. 4.1 и 4.2.

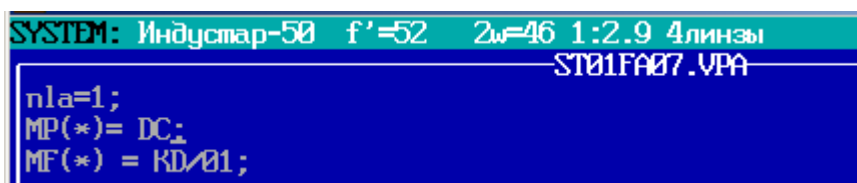


Рис. 4.1 Вид окна задания марок при расчете децентрировок

SYSTEM: Индустар-50 f'=52 2w=46 1:2.9 4линзы JOB: VP						
	DC	DC	DC	DC	DC	DC
	1	3	4	5	6	7
ИЗМ.ПАР->	.01000	.01000	.01000	.01000	.01000	.01000
KD /01	.00585	-.00555	-.00009	.00007	.00269	.00502

Рис. 4.2 Таблица влияния на кому поперечного смещения сферических поверхностей объектива

Здесь «DC» – марка смещения сферической поверхности (по умолчанию равная 10 мкм), «KD/01» – марка комы, вызванной смещением оптической поверхности, для лучей, идущих через край зрачка. Марку «DC» можно применять, если оптическая система не имеет плоских преломляющих поверхностей. Если такие поверхности имеются, то лучше пользоваться маркой «Т», которая вводит наклон оптических поверхностей относительно их вершин. Переход к смещениям центра кривизны для сферических поверхностей тогда можно осуществить, воспользовавшись формулой  $\Delta e_i = r_i \times \varepsilon$ , где  $\Delta e$  – смещение центра кривизны поверхности,  $r$  – радиус поверхности,  $\varepsilon$  – наклон поверхности.

Коэффициенты влияния для поверхностей склейки (5, 6 и 7 поверхности) будут:  $S_{k_5} = 0.01/0.00007 = 142.8$ ,  $S_{k_6} = 0.01/0.0027 = 3.7$  и  $S_{k_7} = 0.01/0.005 = 2$ . Отсюда определим допустимые суммарные децентрировки поверхностей как  $\Delta e_5 = S_{k_5} \times \Delta k_i = 314.2$  мкм,  $\Delta e_6 = S_{k_6} \times \Delta k_i = 8.1$  мкм и  $\Delta e_7 = S_{k_7} \times \Delta k_i = 4.4$  мкм.

Необходимо помнить, что на суммарную децентрировку поверхностей объектива влияет не только децентрировка, обусловленная ошибками

изготовления линз и склеек, но и погрешности размеров и взаимного положения поверхностей оправ.

Рассмотрим, выполняется ли для склейки принцип самоцентрирования – так как склейка опирается на края буртика 7-й поверхностью, то она является базовой и  $D_{св}/2R_7 = 17.8/47.2 = 0.37 > 0.3$ , что говорит о выполнении принципа самоцентрирования. Тогда на децентрировку поверхностей склейки будут влиять: разворот склейки в зазоре между оправой и склейкой  $\Delta C$ , наклон опорного буртика оправы  $\Delta \rho$ , эксцентриситет светового отверстия оправы  $\Delta \varepsilon$  (рис. 4.3).

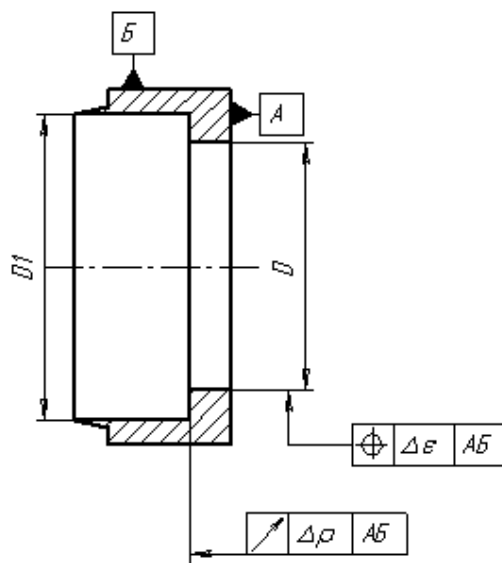


Рис. 4.3 Оправа склейки

Подробно рассмотрим, как эти погрешности оправы связаны с децентрировками поверхностей линзы, установленной в оправу.

Зазор  $\Delta C$  между линзой и оправой необходим для компенсации температурного расширения оправы и линзы при изменении температуры и вызываемого этим изменением пережатия линзы. При выполнении принципа самоцентрирования происходит разворот линзы в зазоре (заклон) относительно центра кривизны базовой поверхности (рис. 4.4).

Разворот линзы можно определить по формуле  $\varepsilon = \Delta C / 2 Ra \sqrt{1 - \frac{D_{л}^2}{4 Ra^2}}$ .

Смещение центра кривизны второй поверхности Б равно  $\Delta e_b = \varepsilon l = \varepsilon (Ra + R_b - d)$ , где  $Ra$  и  $R_b$  – радиусы кривизны линзы,  $d$  – толщина линзы по оси.

Неперпендикулярность поверхности опорного буртика базовой оси оправы  $\Delta \rho$  тоже приводит к развороту линзы относительно точки пересечения базовой оси оправы и опорной плоскости буртика (рис. 4.5). Так как расстояние между вершиной базовой поверхности линзы и указанной точкой мало, можно считать, что разворот происходит относительно вершины базовой поверхности. В этом случае децентрировки поверхностей

А и Б соответственно равны  $\Delta e_a = R_a \gamma = R_a \Delta \rho / D_{св}$  и  $\Delta e_b = (R_b - d) \gamma = (R_b - d) \Delta \rho / D_{св}$ .

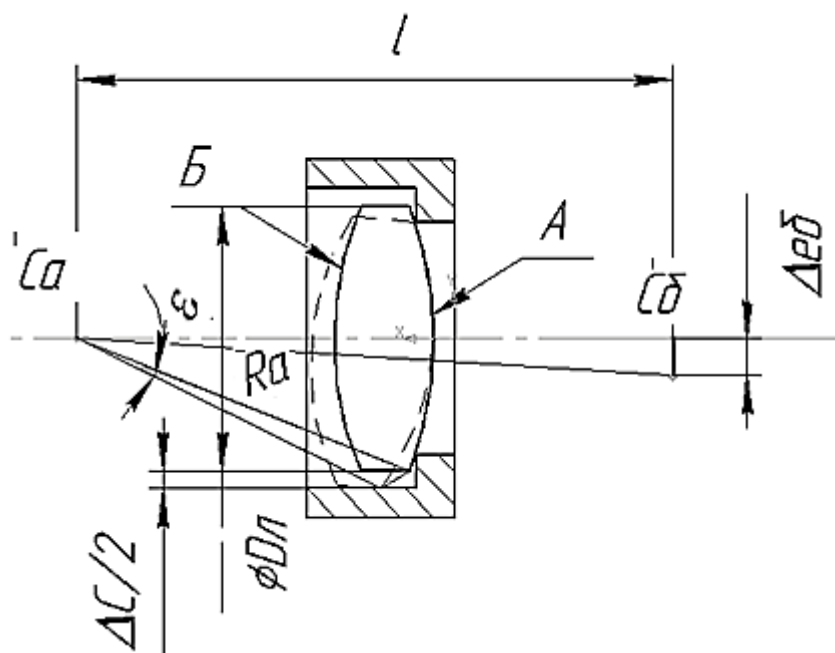


Рис. 4.4. Влияние заклона линзы в зазоре на децентрировку поверхности

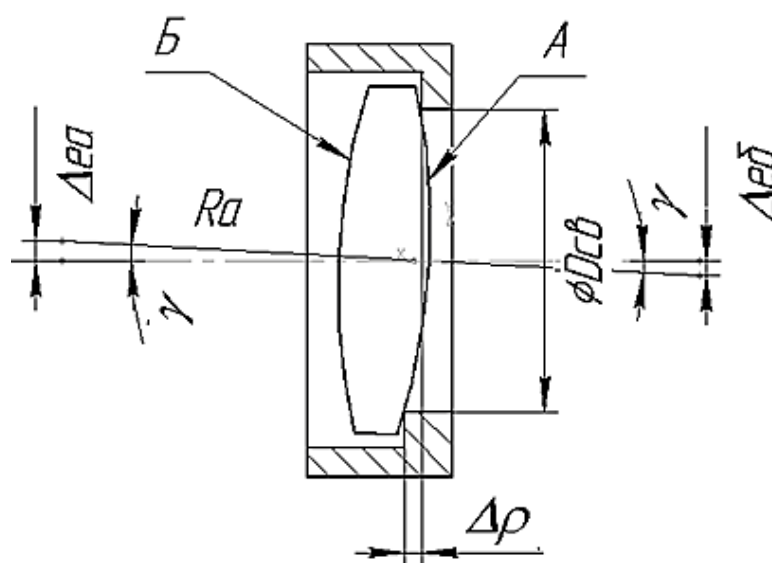


Рис. 4.5 Разворот линзы из-за неперпендикулярности опорного буртика базовой оси оправы

Эксцентриситет посадочного гнезда  $\Delta \varepsilon$  вызван тем, что ось светового отверстия оправы не совпадает с базовой осью оправы (позиционный допуск на чертеже показывает, что расстояние между этими осями не должно превышать  $\Delta \varepsilon$ ). Так как это приводит к смещению краев буртика, на которые опирается линза, то происходит ее смещение на величину эксцентриситета и тогда  $\Delta e_a = \Delta e_b = \Delta \varepsilon$  (рис. 4.6).

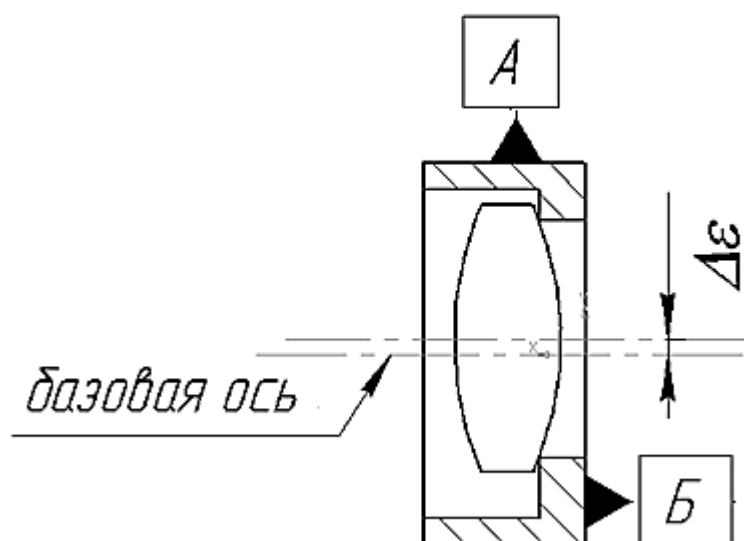


Рис. 4.6 Децентрировка линзы из-за эксцентриситета светового отверстия оправы

Если для базовой поверхности линзы или склейки не выполняется условие самоцентрирования или эта поверхность плоская, то при расчете надо учитывать следующие моменты:

- В этом случае не происходит разворота линзы в зазоре – линза просто опускается до контакта со стенкой посадочного гнезда и децентрировка всех ее сферических поверхностей  $\Delta e \approx \Delta C/2$ ;
- Эксцентриситет светового отверстия не приводит к децентрировке линзы, зато к ней приводит эксцентриситет посадочного гнезда оправы;
- Для плоских поверхностей децентрировкой является их наклон относительно базовой оси.

Децентрировки склейки объектива «Индустар-50», вызванные указанными первичными погрешностями, могут быть определены из следующих выражений:

Поверхность 7:

$\Delta_{\text{дел}} = 0$  – собственная децентрировка поверхности линзы из-за ошибки ее изготовления принимается равной 0, так как поверхность является базовой и самоцентрируется при контроле;

$\Delta_{\text{дес}} = 0$  – смещение центра кривизны базовой поверхности из-за разворота в зазоре равно 0, так как при выполнении принципа самоцентрирования разворот склейки произойдет относительно центра кривизны базовой поверхности без смещения последней;

$\Delta_{\text{деп}} \approx R_7 \times \Delta \rho / D_{\text{св}}$  – децентрировка, вызванная неперпендикулярностью буртика оправы к ее базовой оси;

$\Delta e\varepsilon = \Delta\varepsilon$  – децентрировка из-за эксцентриситета светового отверстия оправы.

Сумма всех этих децентрировок должна быть равной  $\Delta e7 = \sqrt{\Delta e\ell^2 + \Delta e\varsigma^2 + \Delta e\rho^2 + \Delta e\varepsilon^2} = 4.4$  мкм. Полагая вклад первичных погрешностей одинаковым, получим

$$\Delta\varepsilon = \Delta e7/\sqrt{2} = 3.1 \text{ мкм},$$

$$\Delta\rho = \Delta e7 D_{\text{св}}/\sqrt{2} R7 = 2.4 \text{ мкм}.$$

Поверхность 6:

$\Delta e\ell$  – децентрировка изготовления поверхности;

$\Delta e\varsigma = (R7 + R6 - d4) \Delta C/2 R7$  – децентрировка 6-й поверхности обусловленная разворотом склейки в зазоре относительно центра кривизны 7-й поверхности,  $d4$  – толщина 4-й линзы;

$\Delta e\rho \approx (R6 - d4) \times \Delta\rho/D_{\text{св}}$  – децентрировка 6-й поверхности из-за наклона опорного буртика оправы;

$$\Delta e\varepsilon = \Delta\varepsilon.$$

$\Delta e6 = \sqrt{\Delta e\ell^2 + \Delta e\varsigma^2 + \Delta e\rho^2 + \Delta e\varepsilon^2} = 8.1$  мкм. Как и для 7-й поверхности получаем:

$$\Delta e\ell = \Delta e6/2 = 4 \text{ мкм};$$

$$\Delta C = 2\Delta e6 R7/2(R7 + R6 - d4) = 5.6 \text{ мкм};$$

$$\Delta\rho = \Delta e6 D_{\text{св}}/2 (R6 - t4) = 7 \text{ мкм};$$

$$\Delta\varepsilon = \Delta e6/2 = 4 \text{ мкм}.$$

Для 5-й поверхности получим:

$\Delta e\ell$  – децентрировка изготовления поверхности;

$\Delta e\varsigma = (R7 + R5 - d4 - d3) \Delta C/2 R7$  – децентрировка 6-й поверхности обусловленная разворотом склейки в зазоре относительно центра кривизны 7-й поверхности,  $d4$  – толщина 4-й линзы;

$\Delta e\rho \approx (R5 - d4 - d3) \times \Delta\rho/D1$  – децентрировка 6-й поверхности из-за наклона опорного буртика;

$$\Delta e\varepsilon = \Delta\varepsilon.$$

$\Delta e5 = \sqrt{\Delta e\ell^2 + \Delta e\varsigma^2 + \Delta e\rho^2 + \Delta e\varepsilon^2} = 142.8$  мкм. Как и для 7-й поверхности получаем:

$$\Delta e\ell = \Delta e5/2 = 71 \text{ мкм};$$

$$\Delta C = 2\Delta e5 R7/2(R7 + R5 - d4 - d3) = 9.2 \text{ мкм};$$

$$\Delta\rho = \Delta e6 D_{\text{св}}/2 (R5 - d4 - d3) = 3.7 \text{ мкм};$$



$$\Delta\varepsilon = \Delta e_6/2 = 71 \text{ мкм.}$$

Анализ рассчитанных погрешностей показывает, что выдержать допуски в диапазоне менее 5 мкм трудно, поэтому добиться такой точности можно только применяя насыпную в оправках конструкцию. После установки склейки в оправу ее необходимо подвергнуть результативной обработке, что позволит минимизировать влияние погрешностей оправы и линзы и уложиться для 6-й и 7-й поверхностей в рассчитанные допуски. Сложнее с 5-й поверхностью – вывести ее центр кривизны на ось, содержащую центры кривизны 6-й и 7-й поверхностей трудно. Поэтому необходимо при изготовлении 4-й линзы, которая является базовой, сделать ее поверхность, идущую в склейку, как можно точнее и проставить на чертеже допуск на ее децентрировку порядка 5 мкм. Допуски  $\Delta\rho$  и  $\Delta\varepsilon$  на чертеже оправы тоже желательно задать не более 10 мкм.

При невозможности достижения требуемых децентрировок технологическим путем (ужесточением допусков на линзу и оправу) необходимо предусмотреть в конструкции объектива юстировочные поперечные подвижки одной из его линз, наиболее сильно влияющей на величину комы.

## 5. ПРОВЕРКА ВЫБРАННОЙ ПОСАДКИ ЛИНЗЫ В ОПРАВУ, ИСХОДЯ ИЗ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ.

Так как допуски на центрирование линзы достаточно высоки, желательно задать допуск на диаметр посадочного отверстия оправы по Н7, а на диаметр линзы – f7. Так как величина зазора является случайной величиной, зависящей от случайных погрешностей диаметров линзы и подчиняющейся закону Гаусса, то можно вычислить ее максимальное и минимальное значение вероятностным способом.

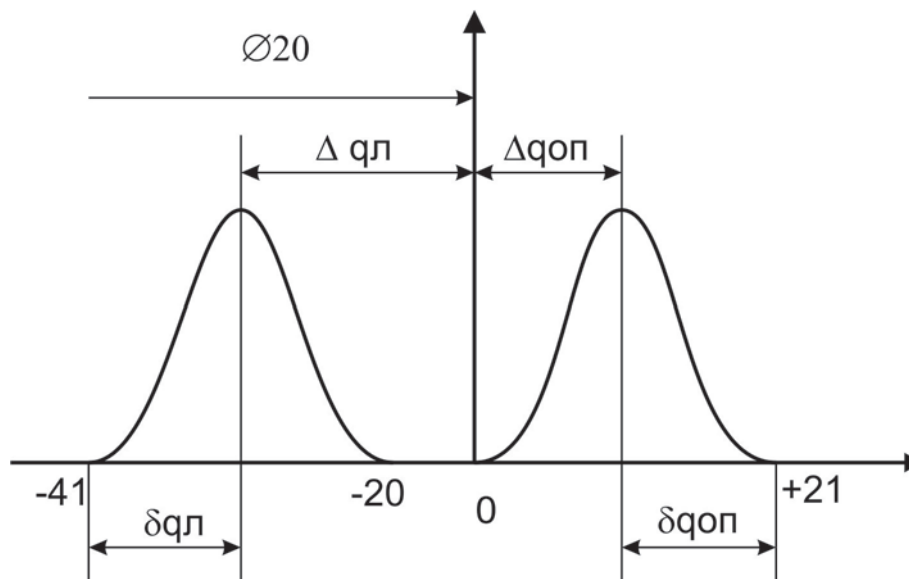


Рис. 5.1 Положение границ предельных отклонений погрешностей оправы и линзы

Допустим, что практические предельные рассеяния погрешностей диаметра линзы и посадочного гнезда оправы совпадают с границами поля допуска (рис. 5.1). Если полный диаметр линзы  $D = 20$  мм, то границы предельных отклонений диаметра линзы составят -20 и -41 мкм, а диаметра посадочного гнезда оправы 0 и +21 мкм. Так как центры рассеяния погрешностей смещены относительно номинального значения размера, то при вычислении зазора нужно учитывать систематическую составляющую погрешности, введенную для получения гарантированного зазора.

Величину систематической составляющей погрешности можно определить из выражения  $\Delta q = (\Delta q_v + \Delta q_n)/2$ , где  $\Delta q_v$  - верхняя граница поля допуска,  $\Delta q_n$  - нижняя граница поля допуска. Для линзы систематическая составляющая погрешности равна  $\Delta q_l = (-20 + (-41))/2 = -30.5$  мкм. Для оправы систематическая составляющая погрешности равна  $\Delta q_{op} = (21 + 0)/2 = 10.5$  мкм. Случайная составляющая погрешности равна для линзы  $\delta q_l = (\Delta q_v - \Delta q_n)/2 = ((-20 - (-41)))/2 = 10.5$  мкм, а для оправы  $\delta q_{op} = (\Delta q_v - \Delta q_n)/2 = (21 - 0)/2 = 10.5$  мкм.

Согласно вероятностному методу сложения погрешностей, систематические погрешности складываются алгебраически, а случайные – по методу квадратичного суммирования.

$$\Delta C = \sum_{i=1}^n |\Delta q_i| \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta q_i^2}.$$

Тогда максимальная величина зазора будет равна  $\Delta C_{max} = |\Delta q_l| + |\Delta q_{op}| + \sqrt{\delta q_l^2 + \delta q_{op}^2} = 30.5 + 10.5 + 10.5 \times \sqrt{2} = 55.8$  мкм.

Минимальная величина зазора будет равна  $\Delta C_{min} = |\Delta q_l| + |\Delta q_{op}| - \sqrt{\delta q_l^2 + \delta q_{op}^2} = 30.5 + 10.5 - 10.5 \times \sqrt{2} = 26.9$  мкм.

Определим, насколько изменится зазор при изменении температуры. Фотообъектив должен функционировать в диапазоне температур от  $-40$  до  $+50$   $^{\circ}\text{C}$ . Принимая за номинальное значение температуры  $t_0 = 20$   $^{\circ}\text{C}$ , получаем  $\Delta t_1 = t_b - t_0 = 50 - 20 = 30$   $^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta t_2 = t_0 - t_n = 20 - (-20) = 40$   $^{\circ}\text{C}$ . Тогда изменение зазора

$$\delta \Delta C = (\alpha_l - \alpha_{op}) \Delta t D,$$

где  $\alpha$  - коэффициенты линейного расширения (КЛР) материалов линзы и оправы,  $D$  – номинальный диаметр линзы и оправы. КЛР некоторых марок стекол и материалов оправ приведены в таблицах 1 и 2. Так как КЛР материалов оправ значительно превышает КЛР стекол, то при большом изменении температуры возможно как пережатие линз, что приводит к их деформации и увеличению aberrации, так и увеличение зазора, приводящее к большим децентрировкам.

Таблица 1. Коэффициенты линейного расширения некоторых марок стекол

Марка стекла	КЛР в пределах температур $^{\circ}\text{C}$	
	от $-60$ до $+20$	от $+20$ до $+120$
К8	$68 \times 10^{-7}$	$76 \times 10^{-7}$
ТК14	$63 \times 10^{-7}$	$69 \times 10^{-7}$
ЛФ5	$67 \times 10^{-7}$	$72 \times 10^{-7}$
ОФ1	$59 \times 10^{-7}$	$63 \times 10^{-7}$
Ф13	$71 \times 10^{-7}$	$75 \times 10^{-7}$
ТФ10	$75 \times 10^{-7}$	$81 \times 10^{-7}$
БК8	$56 \times 10^{-7}$	$62 \times 10^{-7}$
ЛК7	$40 \times 10^{-7}$	$44 \times 10^{-7}$

Таблица 2 Коэффициенты линейного расширения материалов оправ  
оптических систем

Материал оправы	КЛР
Латунь ЛС59-1	$20.1 \times 10^{-6}$
Сплав алюминиевый Д1	$22 \times 10^{-6}$
Сплав алюминиевый Д16	$22.7 \times 10^{-6}$
Сплав алюминиевый В95	$3.6 \times 10^{-6}$
Сплав алюминиевый литейный АЛ9	$23 \times 10^{-6}$
Сталь 20	$11.1 \times 10^{-6}$
Сталь 30	$12.6 \times 10^{-6}$
Титан	$8.15 \times 10^{-6}$

Так как КЛР материалов оправ значительно больше КЛР стекол, то пережатие линз возможно при уменьшении температуры. Из линз склейки меньшее значение КЛР имеет линза из стекла ОФ1, кроме того она является базовой в склейке и определяет ее положение. Предположим, что материалом оправы является широко распространенный алюминиевый сплав Д16. Тогда изменение зазора при изменении температуры на  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  составит  $\delta\Delta C = (227 \times 10^{-7} - 59 \times 10^{-7}) \times 40 \times 20 = 13.4\text{ мкм}$ . Так как  $\Delta C_{min} > \delta\Delta C$ , то можно считать, что зазор выбран правильно и пережатия линзы не происходит. При невыполнении этого условия необходимо задавать более широкий допуск на диаметры линзы и посадочного гнезда оправы либо задать другую посадку, например Н7/е7. Для допуска е7 поле допуска для линзы будет сдвинуто на  $-20\text{ мкм}$  относительно поля допуска f7, что приведет к увеличению зазора на  $10\text{ мкм}$ .

## 6. ВЫБОР ДОПУСКОВ НА МАТЕРИАЛ ПРИЗМЫ, ЕЕ РАЗМЕРЫ И ФОРМУ ПОВЕРХНОСТЕЙ

### 6.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИЗМЫ И ТРЕБОВАНИЙ К ЕЕ МАТЕРИАЛУ

В качестве примера рассчитаем допуски на призму АР-90, выполненную из стекла К8 и установленную за объективом, расчет допусков которого выполнялся в предыдущей части учебного пособия. Расчет начинается с определения светового диаметра призмы, который можно определить геометрическим способом, зная световой диаметр последней поверхности линзы объектива и угол поля зрения объектива (рис. 6.1). Для этого зададим расстояние от последней поверхности объектива до призмы  $L$  и рассчитаем световой диаметр призмы по формуле

$$D_{\text{св}} = \frac{2(h + L \operatorname{tg}(w))}{1 - 2k \operatorname{tg}(w/n)},$$

где  $\operatorname{tg}(w) = (h_{\text{из}} - h)/S_F$ , – половина угла конуса, внутри которого проходят лучи от последней поверхности объектива до поверхности призмы,  $h_{\text{из}} = \operatorname{tg}(\omega)f'$  – высота изображения,  $\omega$  – угловое поле изображения,  $L$  – расстояние от последней поверхности объектива до входной грани призмы,  $n$  – показатель преломления материала призмы,  $h$  – световая высота последней поверхности объектива,  $k = l/D$  – отношение длины хода осевого луча в призме к ее полному диаметру (коэффициент берется из таблицы в работе [4] на стр. 170-179).

Для призмы АР-90, установленной на расстоянии  $L = 10$  мм за последней поверхностью объектива «Индустар-50» ( $h = 8.9$  мм,  $\omega = 23^\circ$ ,  $f' = 52$  мм) с коэффициентом  $k = 1$  и выполненной из стекла К8 ( $n = 1.513$ ) получим  $\operatorname{tg}(w) = 0.297$  и световой диаметр  $D_{\text{св}} = 40$  мм. Тогда длина хода осевого луча в призме и толщина ее развертки (при равенстве светового и полного диаметров) равна 40 мм.

Так как расчет габаритов призмы был приближительным, желательно уточнить их с помощью ОПАЛа, задав на расстоянии 10 мм от последней поверхности объектива плоскопараллельную пластину толщиной 40 мм из стекла К8. Расчет показывает, что световой диаметр на грани призмы равен 38 мм. Так как полный диаметр должен быть больше светового, чтобы обеспечить возможность крепления призмы, полный диаметр следует оставить равным 40 мм.

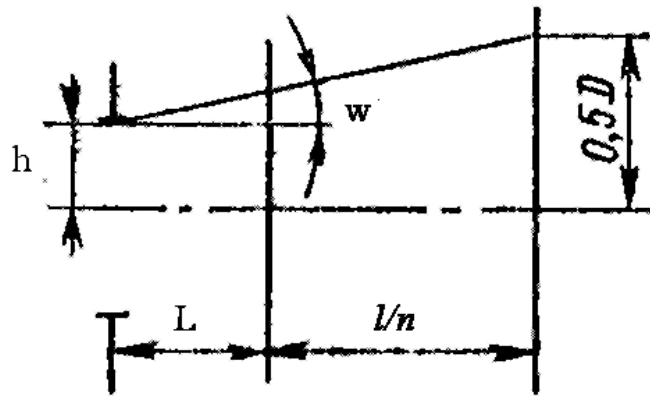


Рис. 6.1 Определение светового диаметра призмы

Если у призмы две или три отражающих грани, и она имеет крышу, выходящую только на одну преломляющую грань (входную или выходную), то надо брать размер

$$D = \frac{D}{2} \left( 1 + \frac{\sqrt{1 + \sin^2(\gamma)}}{\sin(\gamma)} \right),$$

где  $\gamma$  - угол между ребром крыши и выходной (входной) гранью.

Для призмы с одним отражением, у которой крыша выходит на обе преломляющие грани, (например, призма  $A_kP-90$ ) световой диаметр вычисляется по формуле

$$D = D \frac{\sqrt{1 + \sin^2(\gamma)}}{\sin(\gamma)}.$$

Для определения требований к материалу призмы рассмотрим, как изменятся aberrации объектива после установки за ним плоскопараллельной пластины, полученной разверткой призмы. Анализ таблицы изменения сферической aberrации от изменения показателя преломления (рис. 6.2) показывает, что влияние пластинки (деталь №8) на два порядка меньше чем у линз, что позволяет назначить на призму по показателю преломления допуск 5Г.

SYSTEM:	Индустар-50	f'=52	2w=46	1:2.9	4линзы	JOB: VP
ИСК.	N	N	N	N	N	N
СИСТ.	1	3	5	6	8	
ИЗМ.ПАР->	0.	.00050	.00050	.00050	.00050	.00050
DSA /01	1.4457	-.02115	.03473	.03110	-.04274	.00005

Рис. 6.2 Изменение сферической aberrации при отклонении показателя преломления

Для хроматической aberrации положения таблица, связывающая ее изменение с изменением дисперсии, приведена на рис. 6.3. Из нее видно, что вклад в aberrацию у пластины меньше, чем у линз. Коэффициент влияния для пластины будет равен  $S_{\Delta(nF' - nC')} = 5 \times 10^{-5} / 0.0011 = 4.5 \times 10^{-2}$ . Предельное значение хроматической aberrации положения может быть вычислено из выражения  $\Delta x_p = \lambda \text{ ср} / A'^2 = 19 \text{ мкм}$ . Так как вклад в aberrацию

вносят 4 линзы и пластина, то вклад каждой из них составит  $\Delta x_{pi} = \Delta x_p / \sqrt{5} = 8.5$  мкм. Допуск на дисперсию составит  $\Delta(n_{f'} - n_{c'}) = S_{\Delta(n_{f'} - n_{c'})} \times \Delta x_{pi} = 4.5 \times 10^{-2} \times 8.5 \times 10^{-3} = 38.25 \times 10^{-5}$ , что значительно больше, чем самый жесткий допуск из таблицы 1 раздела 2. Поэтому имеет смысл назначить допуск по дисперсии 5Г.

SYSTEM: Индустар-50 f'=52 2w=46 1:2.9 4линзы JOB: V						
ИСК.	ND	ND	ND	ND	ND	ND
СИСТ.	1	3	5	6	8	
ИЗМ.ПАР->	0.	.00025	.00025	.00025	.00025	.00025
DSA /'1	.69225	-.00974	.01168	.00914	-.01466	.00189

Рис. 5.3 Таблица изменения хроматической aberrации положения от изменения дисперсии стекла призмы

Выбор категории стекла по оптической однородности и показателю ослабления рекомендуется назначать по 3-й категории, что превышает требования к стеклам линз объектива. Это обусловлено тем, что длина хода луча в призме в несколько раз больше длины хода луча в объективе.

Требования по двулучепреломлению можно определить исходя из следующих соображений – если считать, что aberrации системы малы и среднеквадратичное отклонение волнового фронта за призмой не превышает  $W_{скв} \leq \lambda/14$ , то можно воспользоваться приближенной формулой  $\Delta = \frac{0.56 \lambda}{l} \sqrt{1-S}$ , где  $l$  – длина хода осевого луча в призме,  $S \approx 1 - (2\pi/\lambda)^2 W^2_{скв}$  – число Штреля. Для нашего случая при  $S \approx 0.8$ ,  $l = 4$  см,  $\lambda = 0.55 \times 10^{-3}$  мм получаем  $\Delta = 34$  нм/см, что соответствует 5-й категории стекла по двулучепреломлению. Так как кроме двулучепреломления стекла оптическая система содержит довольно много источников aberrаций, желательно ужесточить допуск к стеклу призмы по двулучепреломлению до 3-й категории, как и рекомендовано в литературе [1,2,7].

По свильности, следуя рекомендациям в [1] и учитывая небольшое расстояние между плоскостью приемника и выходной гранью призмы, следует назначить допуск, соответствующей 1 категории и классу А.

Минимальный диаметр пузыря можно определить из формулы  $d = 2 S' A' \sqrt{\Delta E / E_{п}}$ , где  $\Delta E / E_{п}$  – пороговая относительная чувствительность приемника к изменению освещенности (для ПЗС приемника  $\approx 0.05$ ),  $A'$  – задняя апертура объектива, за которым установлена призма (для объектива «Индустар-50»  $A' = 0.172$ ),  $S'$  – расстояние от выходной грани призмы до плоскости изображения ( $S' = 7.5$  мм). Подстановка в формулу дает  $d \approx 0.5$  мм, что соответствует стеклу 5-й категории по пузырьности. При выполнении этого условия в плоскости изображения будут отсутствовать тени от пузырей.

Класс по пузырьности при известной категории лучше выбрать наименьший из возможных для стекла данной марки [2]. Согласно данным из

работы [4] при варке стекла марки К8 можно получить классы пузырности А – В, поэтому выбираем класс А.

## 6.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ОБЩУЮ И МЕСТНУЮ ОШИБКИ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ И ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИЗМЫ

Определим допуски  $N$  и  $\Delta N$  на преломляющие и отражающие поверхности. Отклонение отражающих поверхностей от плоскостности  $N$  приводит к появлению астигматизма на оси. Нарушение сферичности отражающих поверхностей  $\Delta N$  тоже приводит к появлению астигматизма на оси оптической системы.

Предельное значение допуска на астигматизм может быть определено из выражения  $\Delta(x'_m - x'_s) = 0.68 \lambda / A'^2 = 0.68 \times 0.55 / 0.029 = 12.9$  мкм. Установив призму, мы внесли в систему еще три поверхности, поэтому вклад каждой из них можно оценить из выражения  $\Delta_i(x'_m - x'_s) = \Delta(x'_m - x'_s) / \sqrt{10} = 4.1$  мкм.

Допуск на общую ошибку отражающей поверхности можно определить из формулы:

$$N = \frac{227 D^2}{n a^2 \sin(\alpha) \operatorname{tg}(\alpha)} \Delta_i(x'_m - x'_s),$$

где  $D$  – световой диаметр поверхности,  $\alpha$  – угол падения осевого луча на отражающую поверхность,  $a = l/2 + S'$  – расстояние от отражающей поверхности до фокальной плоскости,  $l$  – длина хода луча в призме,  $S'$  – расстояние между выходной гранью призмы и фокальной плоскостью. В нашем случае  $D = 38$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $a \approx 27.5$  мм. После подстановки в формулу получаем  $N \approx 1$ . Величину местной ошибки отражающей поверхности можно вычислить с помощью формулы

$$\Delta N = \sin(\alpha)^2 N \approx 0.5 N = 0.5.$$

Здесь ошибка  $\Delta N$  учитывает только разность радиусов кривизны отражающей поверхности в меридиональной и сагиттальной плоскостях, и не учитывает локальные ошибки, приводящие к деформации волнового фронта, поэтому допуск можно ужесточить до  $\Delta N = 0.2$ .

Расчет допусков на  $N$  и  $\Delta N$  преломляющих поверхностей призмы можно проводить аналогично расчету допусков на поверхности линз объектива. Отклонение  $N$  приводит к появлению сферической аберрации. Анализ коэффициентов влияния показывает, что отклонение преломляющих поверхностей призмы от плоскостности на 3 кольца вызывает продольную сферическую аберрацию порядка 0.08 мкм, что на порядок меньше, чем влияние общей ошибки изготовления поверхностей линз объектива. Поэтому



на эти поверхности можно задать допуск  $N = 4$ . Допуск  $\Delta N$  определяется по формуле  $\Delta N_i = \frac{D_i^2 \Delta_i(x'_m - x'_s)}{h_1^4 (n'_i - n_i) f'^2 \lambda}$ , которая уже использовалась при определении допуска  $\Delta N$  сферических поверхностей. Вычислив в ОПАЛ высоты встречи апертурного луча с поверхностями и их световые диаметры, получим для входной грани призмы  $\Delta N = 1$  и для выходной грани призмы  $\Delta N > 10$ .

Широкий допуск  $\Delta N$  на выходную грань призмы объясняется тем, что она находится очень близко от плоскости формирования изображения, и для нее световой диаметр  $D = 38$  мм, а рабочий диаметр (диаметр осевого пучка)  $D_p = 1.5$  мм. Согласно работе [11], допуск на несферичность (астигматичность) поверхностей в пределах светового диаметра увеличивают на величину квадрата отношения светового диаметра к рабочему диаметру пучка лучей  $\Delta N = \Delta N_p (D/D_p)^2$ , где  $\Delta N_p$  – допуск на отклонение формы поверхности в зоне рабочего пучка ( $\Delta N_p \approx 0.5$ ).

Так как допуски преломляющих поверхностей  $\Delta N$  рассчитывались исходя только из астигматизма, без учета влияния на другие аберрации, имеет смысл ужесточить их до  $\Delta N = 0.5$ .

На чистоту поверхности допуск назначим исходя из рекомендаций, приведенных в таблице 3 раздела 3. Так как призма размещена в сходящемся пучке лучей, рекомендуется назначить 4 класс по чистоте поверхности.

Допуск на линейные размеры призмы обычно задается по 12 квалитету, так как погрешности этих размеров не влияют на качество изображения, а приводят только к расфокусировке, которая может быть легко скомпенсирована.

### 6.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ОШИБКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УГЛОВ ПРИЗМ И НА ПИРАМИДАЛЬНОСТЬ

Вследствие неточного изготовления углы реальной призмы отступают от заданных величин, а ее ребра не параллельны друг другу, т.е. имеется пирамидальность. Поэтому развертка призмы представляет собой комбинацию плоскопараллельной пластины и клина с малым преломляющим углом  $\theta$ . Суммарную клиновидность развертки призмы можно вычислить по формуле  $\theta = \sqrt{\theta_i^2 + \theta_\pi^2}$ , где  $\theta_i$  – клиновидность развертки, обусловленная ошибками изготовления углов призм,  $\theta_\pi$  – клиновидность, обусловленная пирамидалностью призмы.

На примере призмы AP-90 рассмотрим, погрешность изготовления каких углов приводит к клиновидности развертки призмы. Пусть угол призмы в  $90^\circ$  имеет ошибку  $\Delta\gamma$ , а разность углов призмы в  $45^\circ$   $\delta_{45} = 0$ . В этом

случае развертка не будет клиновидной, но получит разворот относительно оптической оси объектива на угол  $\Delta\gamma/2$  (рис. 6.4).

Смещение линии визирования в этом случае будет равно  $\Delta S = \frac{n-1}{n} d \frac{\Delta\gamma}{2}$ . Если в качестве приемника используется ПЗС-матрица с размером пиксела  $t = 8$  мкм, допуск составит  $\Delta\gamma = 2 t n / d (n - 1) = 0.96 \times 10^{-3} = 3.2'$ . В случае, когда  $\delta_{45} = \Delta\alpha - \Delta\beta \neq 0$  угловое смещение линии визирования составит  $\varphi = \Delta\gamma - n (\Delta\alpha - \Delta\beta)$ .

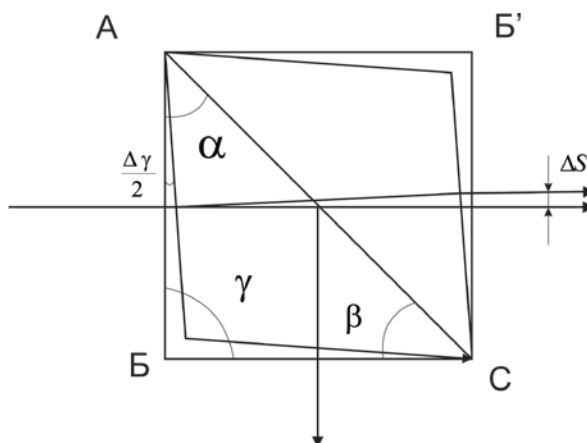


Рис. 6.4 Влияние ошибки прямого угла призмы AP-90 на отклонение падающего луча

Клиновидность развертки призмы будет определяться разностью углов призмы в  $45^\circ$   $\theta_i = \alpha - \beta = \Delta\alpha - \Delta\beta = \delta_{45}$  (рис. 6.5).

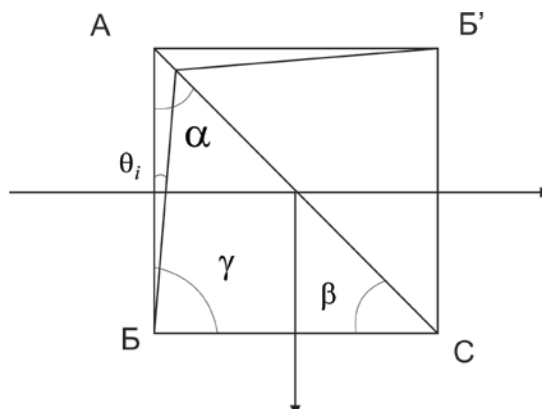


Рис. 6.5 Влияние разности углов в  $45^\circ$  на клиновидность развертки призмы AP-90

Отклонение луча клином в этом случае будет равно  $\delta = \theta_i (n - 1)$ .

Для расчета клиновидности, вызванной пирамидальностью призмы, удобно пользоваться инвариантом пирамидальности [9], который имеет вид  $\delta_{k+1} = \delta_k n_k / n_{k+1} - (n_k \cos\varphi_k - n_{k+1} \cos\varphi'_k) \Delta_k / n_{k+1}$ , где  $\delta$  - отклонение луча в плоскости, перпендикулярной главному сечению призмы,  $\Delta$  - отклонение от перпендикулярности преломляющей или отражающей грани призмы ее главному сечению,  $\varphi$  и  $\varphi'$  - углы падения и отражения (преломления) осевого луча в главном сечении.

При применении указанной формулы необходимо придерживаться ряда правил:

1. Полагая главное сечение призмы расположенным вертикально, нужно считать отклонения лучей и перпендикуляров от этого сечения вправо положительными, а влево – отрицательными. Тогда  $\delta$  и  $\Delta$  будут положительны;
2. Значение  $\delta_1$  можно принять равным 0 (неперпендикулярность падающего луча входной грани), но целесообразно этого не делать, так как это позволит оценить возможность компенсации пирамидальности призмы ее разворотами;
3. В случае отражающей поверхности следует считать  $n' = -n$ ;
4. При переходе от преломляющей поверхности к следующей поверхности следует считать  $\delta = \delta'$ ;
5. При переходе от отражающей поверхности к следующей поверхности следует считать  $\delta = -\delta'$ ;
6. Полученное значение  $\delta$  для последней поверхности является отклонением выходящего из призмы луча от главного сечения призмы.

Применим инвариант для поверхностей призмы АР-90.

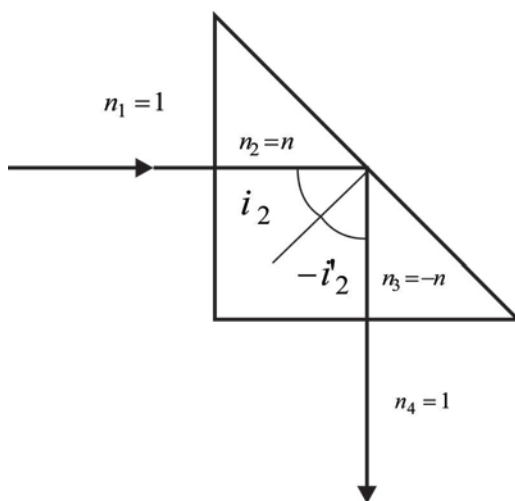


Рис. 6.6 Применение правила знаков для прямоугольной призмы при расчете инварианта пирамидальности

Для первой (преломляющей) поверхности исходные данные для расчета будут иметь вид:  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = n$ ,  $\varphi = \varphi' = 0$ ,  $\Delta_1$ ,  $\delta_1$ . Подставляя в инвариант, получим  $\delta_2 = (\delta_1 + (n - 1) \Delta_1) / n$ .

Для второй (отражающей) поверхности исходные данные для расчета будут иметь вид:  $n_2 = n$ ,  $n_3 = -n$ ,  $\varphi = \varphi' = 45^\circ$ ,  $\Delta_2$ ,  $\delta_2$ . Подставляя в инвариант, получаем  $\delta_3 = -\delta_2 + 2 \cos 45^\circ \Delta_2$ .

Для третьей (преломляющей) поверхности:  $n_3 = n$ ,  $n_4 = 1$ ,  $\varphi = \varphi' = 0$ ,  $\Delta_3$ ,  $-\delta_3$ .  $\delta_4 = -\delta_3 n - (n - 1) \Delta_3$  (рис. 6.6).

Объединяя все три формулы, получим  $\delta_4 = \delta_1 + (n - 1) (\Delta_1 - \Delta_3) - 2n \cos 45^\circ \Delta_2$ . Разность  $\Delta_1 - \Delta_3 \approx 0$ , ошибку угла падения на входную грань призмы  $\delta_1$  тоже можно задать равной 0. Тогда  $\delta_4 = -2n \cos 45^\circ \Delta_2 = -\sqrt{2} n \Delta_2$ , а пирамидальностью призмы АР-90 можно считать не параллельность гипотенузой отражающей грани призмы и ребра, образованного пересечением преломляющих граней  $\Delta_2 = \pi$ . Тогда клиновидность развертки в плоскости, перпендикулярной главной, будет  $\theta_\pi = 2 \cos 45^\circ \pi = \sqrt{2} \pi$ , где  $\pi$  - пирамидальность призмы. В данном случае угол клина получают делением угла отклонения луча на значение показателя преломления, т.к. клин в этом случае является воздушным.

Клиновидность развертки призмы приводит к появлению хроматических аберраций и комы в плоскости изображения. Хроматизм в линейной мере на приемнике может быть определен из формулы  $\Delta L_{FC} = (l + S') \theta (n - 1)/v$ , где  $S'$  – расстояние от выходной грани призмы до плоскости приемника,  $l$  – длина хода луча в призме;  $v$  - коэффициент средней дисперсии, значение которого для стекла К8 составляет  $v = 64.1$ . Если в качестве приемника используется ПЗС-матрица, то величина хроматизма не должна превышать размера одного пиксела этой матрицы  $t = \Delta L_{FC}$  и тогда  $\theta = t v / (S' + l) (n - 1)$ . Принимая влияние пирамидальности и разности углов призмы на хроматизм одинаковым  $\theta_i = \theta_\pi$ , получаем  $\delta_{45} = \theta_i = \theta / \sqrt{2}$  и  $\pi = \theta_\pi / \sqrt{2} = \theta / 2$ .

Так как расстояние  $(S' + l)$  небольшое, то допуск на клиновидность развертки, и соответственно разность углов  $\delta_{45}$  и пирамидальность  $\pi$  может быть задан в широких пределах  $\delta_{45} \geq 10'$  и  $\pi \geq 10'$ . Желательно назначать допуски на углы призм в диапазоне от  $1'$  до  $10'$ .

Для визуальной системы, когда изображение наблюдается через окуляр, необходимо принять  $\Delta L_{FC} = f_{ок} \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  - разрешающая способность глаза.

В случае, если призма стоит в широком пучке лучей перед объективом, угловой хроматизм составит  $\omega_{FC} = \theta (n - 1)/v$ , и в задней фокальной плоскости объектива линейный хроматизм будет равен  $\Delta L_{FC} = f' \theta (n - 1)/v$ .

Определим допуск на клиновидность и пирамидальность призмы, исходя из величины комы  $\Delta k = -\frac{3}{2} \theta \frac{n^2 - 1}{n} S' A'^2$ . Ранее было установлено, что вклад каждого компонента оптической системы в эту аберрацию не должен превышать 2 мкм. Тогда  $\theta = \frac{2 \Delta k n}{3 (n^2 - 1) S' A'^2} \approx 0.037$  рад или  $2^\circ$ , откуда следует, что на величину комы отклонения углов призмы влияют слабо.

Погрешность угла крыши призмы  $\Delta \varphi$  приводит к двоению изображения, т.к. отклонение от расчетного направления осевого луча в прямом и обратном ходе составит  $\Delta \delta = 4 n \Delta \varphi \cos(i)$ , где  $i$  – угол падения луча на грань крыши. Если призма установлена за объективом, то сдвиг

изображения (двоение) в его фокальной плоскости будет равен  $\Delta = \Delta\delta (l_1/n + S')$  (рис. 6.7). Если в фокальной плоскости объектива стоит ПЗС, этот допуск не должен превышать половины размера пиксела  $\Delta = t/2$ . Для визуальной системы (изображение рассматривается через окуляр)  $\Delta = f_{ок} \varepsilon/2$ , где  $\varepsilon$  - разрешающая способность глаза. Как правило, допуск на угол крыши не превышает 2 – 5”.

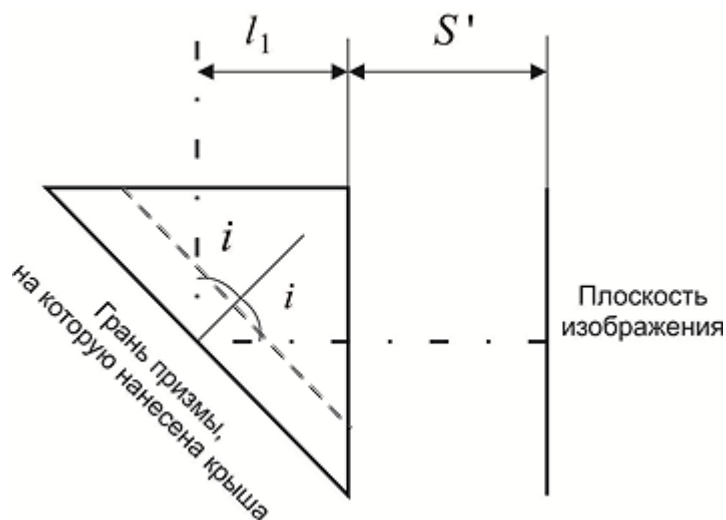


Рис. 6.7 Расчет расстояния от грани призмы с крышей до плоскости изображения

Также при ошибке изготовления угла крыши появляется хроматизм, величина которого в угловой мере может быть оценена из формулы  $\Delta\delta_{FC} = 4 \Delta\varphi \cos(i) (n - 1)/\nu$ . Так как исходя из двоения изображения допуск на угол крыши призмы очень жесткий, то окрашивание изображения из-за хроматизма слабое.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЛИНЗОВЫЕ СИСТЕМЫ

В процессе выполнения курсового проекта требуется разработать конструкцию узла крепления линзовой системы. Конструкция должна предусматривать: возможность контроля оптических и механических характеристик узла; использование типовых конструктивных решений. Задание включает сборочный чертеж объектива и чертежи деталей и подборок – оправы, склейки и одиночной линзы.

В конструкции микрообъектива необходимо предусмотреть:

- Соединение микрообъектива с тубусом микроскопа;
- Поперечное смещение второго компонента микрообъектива для компенсации децентрировок;
- Изменение воздушного промежутка между вторым и третьим компонентами микрообъектива.

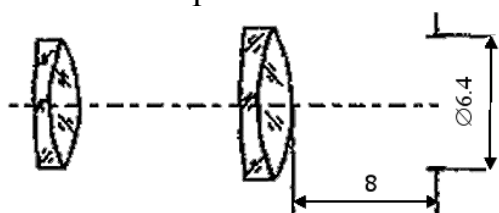
В конструкции фотообъектива необходимо предусмотреть:

- Возможность установки объектива в фотоаппарат по резьбе (М39×1 или М42×1) или с помощью байонетного соединения;
- Возможность компенсации децентрировок.

Для окуляров предусмотреть фокусировку в пределах  $\pm 5$  дптр.

### 1.1 ОБЪЕКТИВЫ МИКРОСКОПОВ

#### 1. Объектив-ахромат 8×0.2

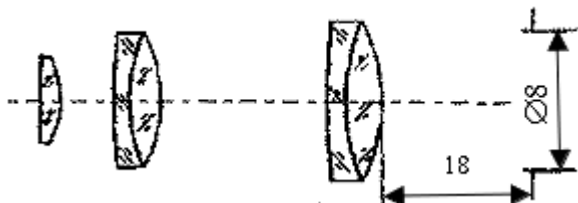


Технические характеристики объектива: длина тубуса 160 мм, фокусное расстояние 18 мм, рабочее расстояние 8.6 мм.

Конструктивные параметры объектива			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Световой $\varnothing$ мм
$\infty$	1	ТФ1	5.8
8.95	2	КФ4	6.3
-8.93	13.73	Воздух	6.3
144.4	1	ТФ1	7.5

13.67	2	КФ4	7.6
-13.81			7.6

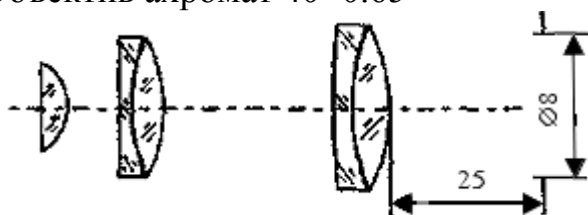
## 2. Объектив-ахромат 20×0.4



Технические характеристики объектива: длина тубуса 160 мм, фокусное расстояние 8.4 мм, рабочее расстояние 1.7 мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Световой $\varnothing$ мм
$\infty$	2	БК2	2.7
-4	1.2	Воздух	3.7
$\infty$	1.5	ТФ1	4.4
6.5	1.6	БК2	5
-7.47	7.4	Воздух	5.1
53.23	1	ТФ1	6.3
8.56	1.8	БК2	6.5
-10.51			6.5

## 3. Объектив ахромат 40×0.65

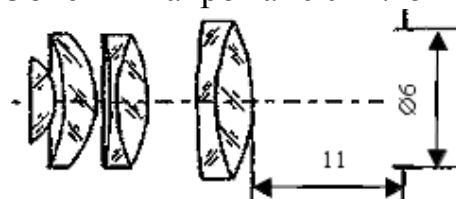


Технические характеристики объектива: длина тубуса 160 мм, фокусное расстояние 4.25 мм, рабочее расстояние 0.7 мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Световой $\varnothing$ мм
$\infty$	1.72	К3	1.6

-1.85	0.22	Воздух	3
$\infty$	1.3	ТФ2	3.4
4.17	1.5	К3	3.8
-4.6	3.42	Воздух	3.8
26.53	1	Ф2	5.3
5.59	1.8	К3	5.8
-7.98			5.8

4. Объектив-ахромат 90×1.25 масляной инверсии

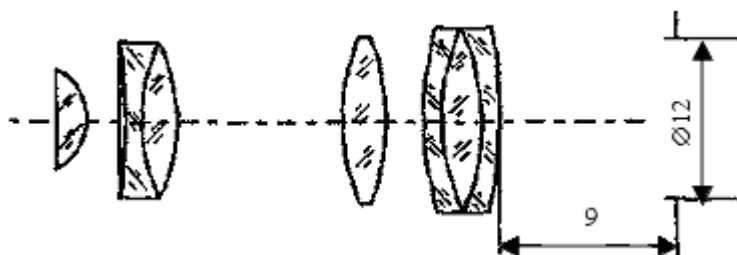


Технические характеристики объектива: длина тубуса 160 мм, фокусное расстояние объектива 1.96 мм, рабочее расстояние 0.1 мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Световой $\varnothing$ мм
$\infty$	0.92	К20	1
-0.78	0.05	Воздух	1.55
-7.88	1	К5	2.5
-2	0.2	Воздух	3
-34.015	1	ТФ1	3.4
5.29	1.75	К2	4
-4.02	1.49	Воздух	4.4
101.8	1	ТФ4	4.6
5.86	4.5	К5	4.6
-7.44			4.8



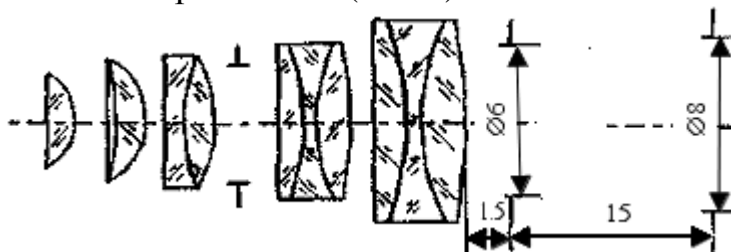
### 5. Объектив-апохромат 20×0.65



Технические характеристики объектива: длина тубуса 160 мм, фокусное расстояние 8.43 мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марки стекол	Световые Ø мм
$\infty$	4	ТК1	3
-3.8	0.56	Воздух	5
-32	2.5	БК9	7
8.52	2.4	Флюорит	7.7
-7.28	7.5	Воздух	7.7
70	2	К8	11
-13.15	0.5	Воздух	11
76.25	1	К8	11
9.18	3.6	Флюорит	10.3
-9.18	1	КФ1	10.3
-64.1			10.3

### 6. Объектив-апохромат 60× (1÷0.7)

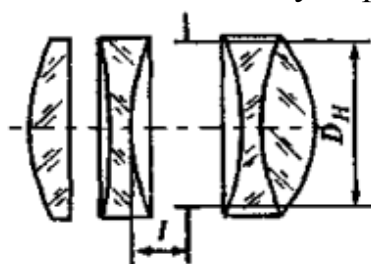


Технические характеристики объектива: длина тубуса 160 мм, диаметр ирисовой диафрагмы при  $A = 1$ ,  $D = 4.6$  мм, при  $A = 0.7$ ,  $D = 3.2$  мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Световой $\varnothing$ мм
$\infty$	1.3	Кедровое масло	1.4
-1.087	0.047	K20	2.2
-11.092	1.376	Воздух	3.1
-2.759	0.25	K3	3.4
$\infty$	0.908	Воздух	4.5
6.8	2.6	БФ27	4.7
-4.808	1.1	Флюорит	5
$\infty$	2.35	Воздух	5
-5.008	1.1	Флюорит	5.2
5.680	2.6	ЛФ1	5.5
-12.82	0.02	Флюорит	5.7
$\infty$	2.03	K15	5.7
-7.029	1.2	Квасцы	6.2
7.029	2.4	KФ4	6.2
-112.98			6.5

## 1.2 ФОТООБЪЕКТИВЫ

### 1. Фотообъектив «Индустар»



#### Вариант 1 исполнения фотообъектива «Индустар»

Конструктивные параметры						
$F'$ мм	$D_H$ мм	$l$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
21	40	8.1	57.68	8.4	TK16	47.6

			$\infty$	9.3	Воздух	45.5
			-129.37	4	ЛФ5	41.5
			52.49	12.2	Воздух	39.5
			-407.21	3	ОФ1	40.5
			54.05	11.2	ТК20	41.5
			-83.53			41.6

### Вариант 2

Конструктивные параметры						
$F'$ мм	$D_H$ мм	$l$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
52.39	11.8	2.3	17.1	2.7	ТК14	16
			$\infty$	4.16	Воздух	16
			-33.57	1.05	ЛФ5	14
			14.56	5.05	Воздух	14
			346.7	1.2	ОФ1	14
			15	4.7	ТК14	14
			-23.6			14

### Вариант 3

Конструктивные параметры						
$F'$ мм	$D_H$ мм	$l$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
100	19.5	2.33	25.84	3.19	ТК5	22.2
			$\infty$	3.69	Воздух	22.2
			-58.42	1.8	ЛФ6	20.3
			23.89	4.67	Воздух	20.3
			-137.01	1.7	БК4	20.3
			21.93	4.59	ТК5	20.3
			-35.63			20.3

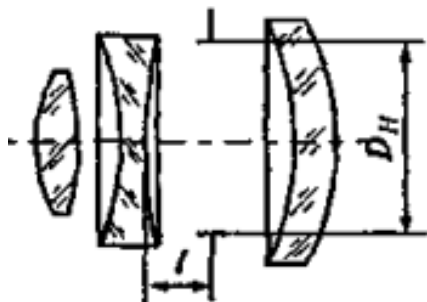
### Вариант 4

Конструктивные параметры						
$F'$ мм	$D_H$ мм	$l$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. Ø мм
213.8	34.4	43	52.36	7.5	ТК10	42.8
			368.1	6.9	Воздух	42.8
			-133.7	3.2	ЛФ5	36.4
			46.88	6.2	Воздух	36.2
			-518.8	2.1	КФ3	34.6
			38.11	9.6	БФ11	36
			-76.91			36

### Вариант 5

Конструктивные параметры						
$F'$ мм	$D_H$ мм	$l$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. Ø мм
300	57.5	11.7	82.41	12	ТК16	66.7
			$\infty$	12.5	Воздух	65
			-193.2	6	ЛФ5	59.5
			74.47	19.7	Воздух	56.5
			-608.1	4.2	ОФ1	58.4
			75.86	15.9	ТК20	59.6
			-121.06			60

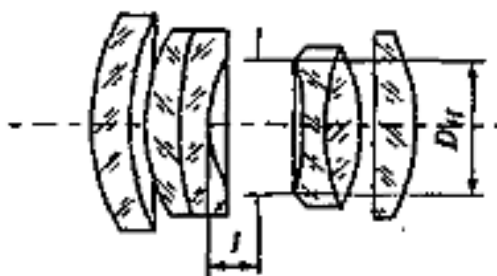
## 2. Фотообъектив «Триплет»



Технические характеристики объектива: фокусное расстояние 600 мм,  $l = 12.2$  мм,  $D_H = 44.8$  мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
81.34	15	ТК3	50
617	1.9	Воздух	50
-316.48	6.5	ЛФ10	47
76	24.4	Воздух	44.6
-159	8	ЛФ7	50
277.5			50

### 3. Фотообъектив «Гелиос 32»



Технические характеристики объектива: фокусное расстояние 15 мм,  $l = 1.3$  мм,  $D_H = 5.16$  мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
7.64	1.56	ТК17	7.5
8.12	0.06	Воздух	7.2
6.22	1.41	ТК20	6.8
16.57	0.58	Ф1	6.2
3.32	2.47	Воздух	5.1
-4.75	0.59	Ф2	5.75
19.68	1.63	БФ11	5.75
-5.56	0.06	Воздух	6
90	1.17	ТК17	6.5
-9.39			6

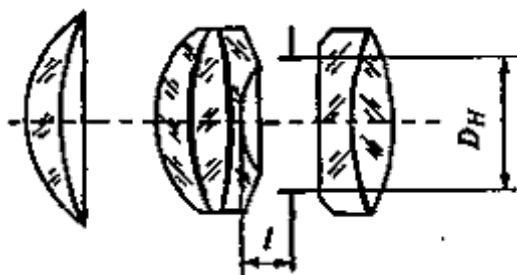
#### 4. Фотообъектив «Мини»



Технические характеристики объектива: фокусное расстояние – 20 мм,  $l = 0.9$  мм,  $D_H = 16.5$  мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. Ø мм
55.98	8.21	ЛФ5	60.42
137.4	0.09	Воздух	56.36
25.32	1.65	СТК12	36.76
12.445	7.8	Воздух	24.48
21.43	1.21	СТК12	23.66
10.54	7	Воздух	19.36
130.32	2.21	СТК3	18
11.117	8	ЛФ5	14.8
-155.96	0.98	Воздух	15.92
31.33	7.58	ТК13	16.42
20.14	4	Воздух	14.66
-21.09	1.05	ТФ7	14.96
34.43	1.52	Воздух	15.36
503.5	3.66	ТК20	16
-22.23	2.4	Воздух	16.02
-164.82	2.4	ТК16	17.1
-43.05	0.1	Воздух	17.86
-340.4	2.4	ФК14	18.58
-35.97			19.23

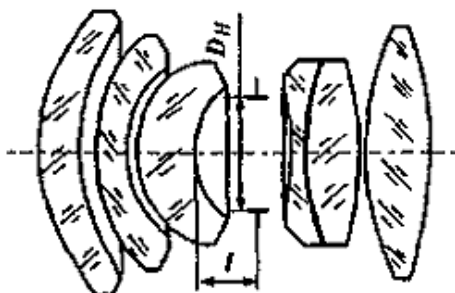
5. Фотообъектив «Юпитер – 8»



Технические характеристики объектива: фокусное расстояние 52.39 мм,  $l = 3,75$  мм,  $D_H = 16.7$  мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм.	$d$ мм.	Марки стекол	Св. Ø мм.
26.425	4.2	ТК16	29
91.79	0.25	Воздух	28.2
17.378	4	ТК21	24.2
34.69	3.5	ЛК8	22.8
-394.9	1	ТФ2	20.9
11.832	5	Воздух	16.8
-91.79	2.2	К5	16.6
18.113	9.7	ТК21	16.2
-45.08		Воздух	20.3

6. Фотообъектив «Волна»

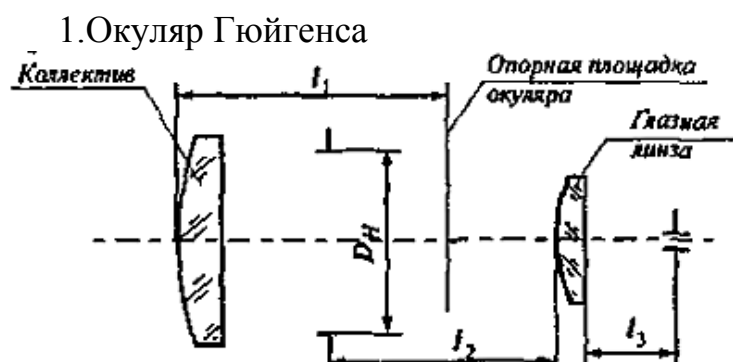


Технические характеристики объектива: фокусное расстояние объектива 53 мм,  $l = 44$  мм,  $D_H = 20.06$  мм.

Конструктивные параметры			
$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. Ø мм
35.89	5.1	СТК9	35.2

93.97	0.1	Воздух	33.32
27.29	2.15	Ф9	29.08
16.032	2.57	Воздух	25.06
16.982	7.9	СТК9	24.8
15.885	8.77	Воздух	20.16
-20.08	2.6	Ф9	19.84
35.56	7.45	Воздух	22.6
-29.11	0.1	ТК14	23.76
113.76	4.9	СТК9	24.66
-45.5			24.8

### 1.3 ОКУЛЯРЫ



Вариант исполнения 1.

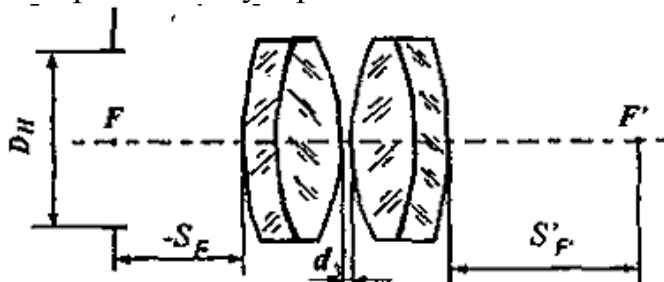
Конструктивные параметры									
$F'$ мм	$\Gamma$	$R$ мм	$D$ мм	$D_H$ мм	$L_1$ мм	$L_2$ мм	$L_3$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
16.9	15	18.66	3	6.7	24	14.1	6.5	ТФ1	15
		$\infty$	16.8						
		7.41	1.5					К8	7
		$\infty$							



### Вариант исполнения 2

Конструктивные параметры									
$F'$ мм	$\Gamma$	$r$ мм	$d$ мм	$D_H$ мм	$L_1$ мм	$L_2$ мм	$L_3$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
25	10	17.71	3.5	9.7	26	17.4	6	K8	15
		$\infty$	25.5						
		8.97	2					K8	7
		$\infty$							

#### 1. Симметричный окуляр



### Вариант исполнения 1

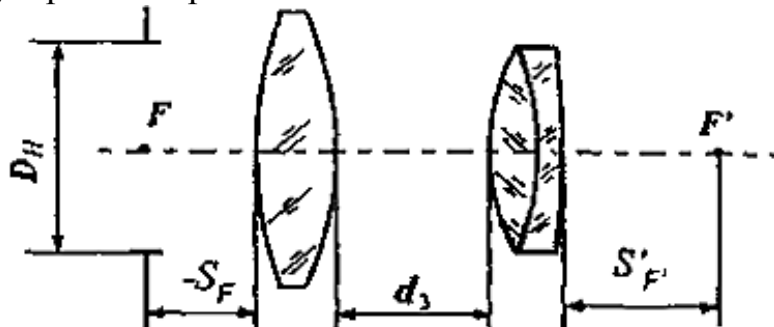
Конструктивные параметры							
$F'$ мм	$S_f$ мм	$S'_f$ мм	$D_H$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
20	-14.9	14.9	14.5	54.7	1.5	Ф2	17.5
				16.81	6	K8	
				-24.39	0.1	Возд.	
				24.39	6	K8	
				-16.81	1.5	Ф2	
				-54.7		Возд.	

### Вариант исполнения 2

Конструктивные параметры							
$F'$ мм	$S_f$ мм	$S'_f$ мм	$D_H$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. $\varnothing$ мм
25	-18.9	18.9	18	68.86	1.5	Ф2	22
				21.01	7.5	K8	

				-30.58	0.1	Возд.	
				30.58	7.5	К8	
				-21.01	1.5	Ф2	
				-68.86		Возд.	

## 2. Окуляр Кельнера



### Вариант исполнения 1

Конструктивные параметры							
$F'$ мм	$S_f$ мм	$S_f'$ мм	$D_H$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. Ø мм
20.04	-5.8	7.3	19	53.26	5	К8	19.5
				24.92	14.5	Возд.	
				14.39	4.5	БК5	11.2
				-10.73	1	Ф3	
				-76.45		Возд.	

### Вариант исполнения 2

Конструктивные параметры							
$F'$ мм	$S_f$ мм	$S_f'$ мм	$D_H$ мм	$r$ мм	$d$ мм	Марка стекла	Св. Ø
24.99	-7.4	9	23.5	66.18	6	К8	24.5
				-31.09	18	Возд.	
				18.95	5.5	БК5	14
				-13.54	1.5	Ф3	
				-95.53		Возд.	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ

При выполнении курсового проекта требуется разработать конструкцию узла крепления призмы в виде сборочного чертежа и спецификации к нему. Узел крепления призмы должен удовлетворять следующим требованиям:


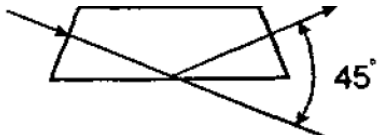
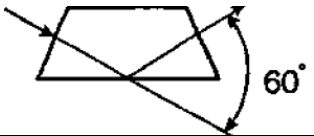
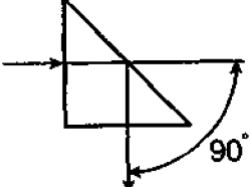
- Обеспечивать надежность крепления, т. е. стабильности положения призмы в процессе эксплуатации;
- Обеспечивать отсутствие деформации и напряжений в стекле при закреплении призмы в оправе;
- Детали, крепящие призму, должны находиться вне зоны прохождения светового пучка;
- Обеспечивать технологичность деталей узла крепления и всей конструкции с точки зрения изготовления и сборки;
- Соединение призмы с базирующими и ориентирующими элементами узла крепления должно быть статически определенным;
- Ограничение смещений призмы в узле крепления должно осуществляться поверхностями, ориентированными перпендикулярно направлению возможных смещений призмы;
- Ограничение поворотов призмы должно осуществляться элементами узла крепления, расположенными на наибольшем удалении от центра поворота в пределах габаритов призмы.

За базовые следует выбирать наиболее широкие нерабочие поверхности призмы. Опорная плоскость оправы, на которую будет базироваться призма должна иметь высокую степень плоскостности. Ребра призмы не должны контактировать с элементами оправы. Между призмой и элементом, осуществляющим силовое замыкание, необходимо поместить эластичную прокладку, компенсирующую погрешности положения этого элемента и более равномерно распределяющую прижимное усилие по поверхности призмы.

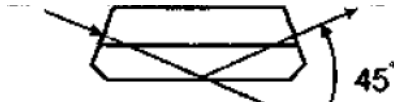

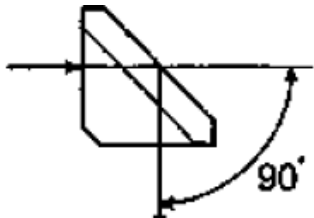
В задании предусмотрены следующие варианты крепления призмы:

1. Крепление накладкой;
2. Крепление угольниками;
3. Крепление прижимными планками;
4. Крепление пружиной (плоской, цилиндрической, тарельчатой);
5. Крепление пружиной с регулировочным винтом;
6. Крепление комбинированным способом;
7. Крепление приклеиванием.

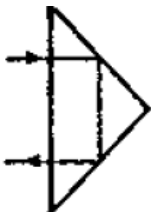

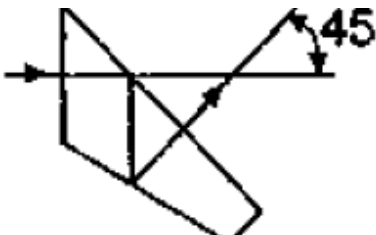

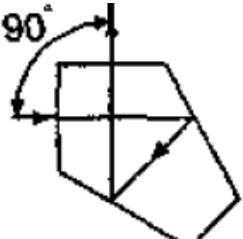
### 1.1 Призмы с одним отражением (типа А)

Вар.	Условное обозначение	Схема	Способ крепления
1	AP - 0°		1, 3, 5
2	AP - 45°		1, 2, 3, 4, 5, 6, 8
3	AP - 60°		1, 2, 3, 4, 5, 6, 8
4	AP - 90°		1, 2, 3, 4, 5, 6, 8

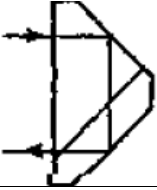
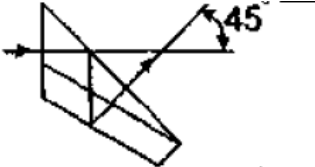
### 1.2 Призмы с одним отражением с крышей

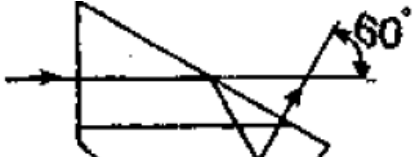
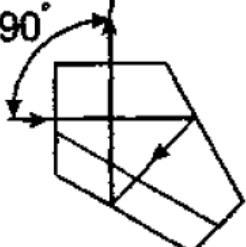
Вар.	Условное обозначение	Схема	Способ крепления
1	A <sub>к</sub> P - 45°		1, 2, 3, 6
2	A <sub>к</sub> P - 60°		1, 2, 3, 6
3	A <sub>к</sub> P - 90°		1, 2, 3, 4, 5

### 1.3 Призмы с двумя отражениями (тип Б)


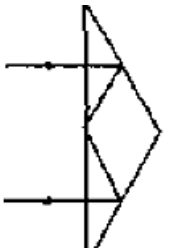
Вар.	Условное обозначение	Схема	Способ крепления
1	БР - 180°		1, 2, 3, 4, 6
2	БС - 0°		1, 2, 3, 5, 8
3	БУ - 45°		1, 2, 3, 4
4	БУ - 60°		1, 2, 3, 4
5	БП - 90°		1, 2, 3, 4, 8

### 1.4 Призмы с двумя отражениями с крышей


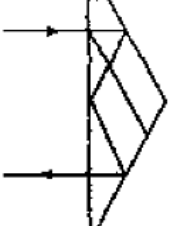
Вар.	Условное обозначение	Схема	Способ крепления
1	БКР - 180°		1, 2, 5
2	БКУ - 45°		1, 2, 5

3	Б <sub>КУ</sub> - 60°		1, 2
4	Б <sub>КП</sub> - 90°		1, 2

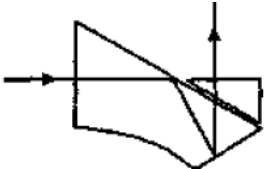
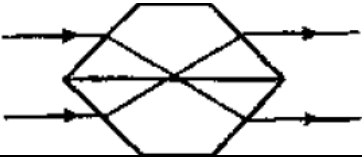
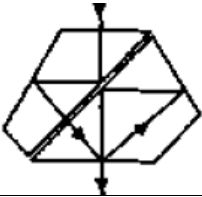
### 1.5 Призмы с тремя отражениями

Вар.	Условное обозначение	Схема	Способ крепления
1	ВР - 45°		1, 2
2	ВР - 180°		1, 2

### 1.6 Призмы с тремя отражениями с крышей

Вар.	Условное обозначение	Схема	Способ крепления
1	В <sub>КР</sub> - 45°		1, 2, 3
2	В <sub>КР</sub> - 180°		1, 2

### 1.7 Составные призмы

Вар.	Условное обозначение	Схема	Способ крепления
1	Б - 90° Башмачная		1, 2, 3
2	К - 0° Призма-куб		3, 8
3	П - 0° Пехана		4

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ВЫБОР НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Таблица 1. Зависимость ширины фасок от диаметров линз

Диаметр детали, мм	Ширина фаски, мм		
	для предохранения от выколов		для крепления завальцовкой
	Несклеиваемая сторона	Склеиваемая сторона	
До 6 (включ.)	0,1 <sup>+0,1</sup>	0,1 <sup>+0,1</sup>	0,1 <sup>+0,2</sup>
Св. 6 до 10	0,2 <sup>+0,2</sup>		0,3 <sup>+0,2</sup>
Св. 10 до 18	0,3 <sup>+0,3</sup>	0,2 <sup>+0,2</sup>	0,4 <sup>+0,2</sup>
Св. 18 до 30			0,5 <sup>+0,3</sup>
Св. 30 до 50	0,5 <sup>+0,5</sup>		0,7 <sup>+0,5</sup>
Св. 50 до 80		1,0 <sup>+0,5</sup>	
Св. 80 до 120		—	
Св. 120 до 180		—	
Св. 180 до 260	0,7 <sup>+0,7</sup>	0,3 <sup>+0,3</sup>	—
Св. 260 до 360	1,0 <sup>+0,8</sup>		0,5 <sup>+0,5</sup>
Св. 360 до 500	1,2 <sup>+1,0</sup>	0,8 <sup>+0,8</sup>	—
Св. 360 до 500	1,5 <sup>+1,5</sup>	1,0 <sup>+1,0</sup>	—

Таблица 2. Определение полного диаметра линз

Световой диаметр линз св. Ø, мм	D = св. Ø + ΔD		Наименьшая толщина края положительных линз, мм
	ΔD, мм, при креплении		
	завальцовкой	прижимным кольцом	
До 6 (включ.)	0,6	—	1,0
Св. 6 до 10	0,8	1,0	1,2
» 10 » 18	1,0	1,5	1,5
» 18 » 30	1,2	1,8	1,8
» 30 » 50	1,5	2,0	2,0
» 50 » 80	2,0	2,5	2,5
» 80 » 120	—	3,0	3,0
» 120 » 180	—	4,0	4,0
» 180 » 260	—	5,0	5,0
» 260 » 360	—	6,0	6,0
» 360 » 500	—	8,0	7,0



Таблица 3. Размеры фасок на ребрах и углах некруглых деталей

Длина ребра, мм	Размер фаски для углов		Длина ребра, мм	Размер фаски для углов	
	двугран-ных	трехгран-ных		двугран-ных	трехгран-ных
До 6 (включ.)	$0,1^{+0,2}$	$0,3^{+0,3}$	Св. 50 до 80	$0,7^{+0,8}$	$2,5^{+0,8}$
Св. 6 до 10	$0,2^{+0,3}$	$0,5^{+0,3}$	Св. 80 до 120	$0,8^{+0,9}$	$3,0^{+1,2}$
Св. 10 до 18	$0,3^{+0,4}$	$1,0^{+0,4}$	Св. 120 до 150	$1,0^{+1,0}$	$3,5^{+1,5}$
Св. 18 до 30	$0,4^{+0,5}$	$1,5^{+0,5}$	Св. 150	$1,2^{+1,2}$	$4,0^{+2,0}$
Св. 30 до 50	$0,5^{+0,6}$	$2,0^{+0,6}$			

Таблица 4 Углы наклона фасок круглых оптических деталей

Отношение диаметра к радиусу поверхности $D/R$	Угол наклона фаски $\alpha$ , ...°, на поверхности		
	выпуклой	вогнутой	плоской
До 0,6 (включ.)	45	45	45
Св. 0,6 до 1,5	30	60	
Св. 1,5	—	90	

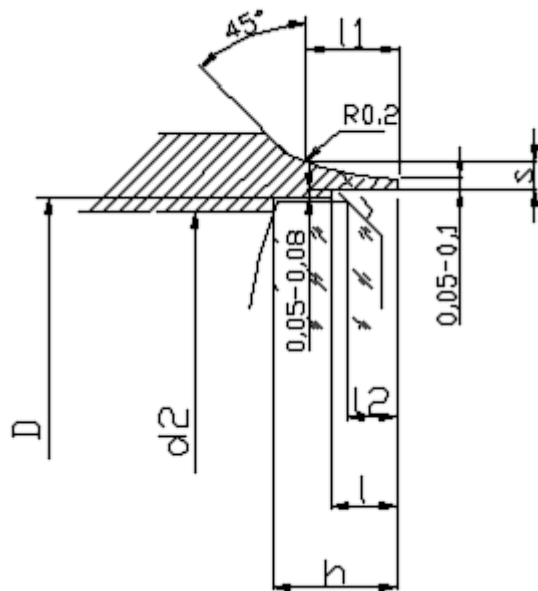


Рис. 1 Крепление линзы завальцовкой – размеры буртика

Таблица 5. Размеры гибкого буртика оправы при креплении завальцовкой (рис.1)

$D$	$S$	$l$	$l_1$	$l_2$
До 10	От 0.2 до 0.3	0.3 – 0.4	1.6	0.3
Св.10 до 30		0.5 – 0.7	2.0	0.5
Св.30 до 50	От 0.3 до 0.4	1.0 – 1.2	2.5	0.8
Св.50 до 80	От 0.4 до 0.5	1.2 – 1.6	3.0	1.0

Таблица 6. Выбор толщины отрицательных линз

Форма	$D$ , мм	$d$ , мм, при $\Delta N$ , полос			
		до 0,3	св. 0,3 до 0,5	св. 0,5 до 2,0	св. 2,0
Двояковогнутая	До 50	0,10D	0,07D	0,07D	0,05D
	Св. 50 до 120				
	Св. 120 до 260		0,06D		
	Св. 260 до 500				
	Св. 500 до 650				
	Св. 650 до 800			0,06D	
Выпукло-вогнутая	До 50		0,09D	0,08D	0,08D
	Св. 50 до 120		0,08D	0,06D	0,06D
	Св. 120 до 260				
	Св. 260 до 500				
	Св. 500 до 650				
	Св. 650 до 800				

Таблица 7. Углы полного внутреннего отражения от гипотенузой грани прямоугольной призмы

Марка стекла	$n_e$	$\varepsilon_m$	$\varepsilon$
К8	1,6183	41°16'	5°41'
БК10	1,5713	39°36'	8°29'
ТК2	1,5749	39°30'	8°41'
ТК16	1,6152	38°19'	10°47'
ТФ2	1,6776	37°22'	12°38'
ТФ5	1,7617	34°44'	18°13'

Таблица 8. Допуски и посадки на диаметры линз, сеток, светофильтров и других круглых деталей

Допуск на центрирование, мм	Поле допусков линз		Назначение детали
	центрирующих	нецентрирующих	
Повышенной точности (до 0.05)	$g6, f7$	$d11$	Линзы светосильных фотообъективов
Средней точности (св. 0.05 до 0.1)	$h8, e9, f9$	$d9, c11$	Линзы микрообъективов, телескопических приборов, сетки и шкалы средней точности
Пониженной точности (св. 0.1)	$c11$	-	Конденсорные линзы, светофильтры, зеркала, защитные стекла

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. – СПб.: Политехника, 2007. – 579 с.;
2. Мальцев М.Д. Расчет допусков на оптические детали. – М.: машиностроение, 1974. – 168 с.;
3. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. – Л.: Машиностроение, 1989. – 221 с.;
4. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Под редакцией В.А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.;
5. Ключникова Л.В., Ключников В.В. Проектирование оптико-механических приборов. – СПб.: Политехника, 1995. – 206 с.;
6. Крынин Л.И. Основы проектирования конструкций объективов. – СПб.: СПбГУИТМО, 2006. – 254 с.;
7. Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть 1. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. – СПб.: СПбГУИТМО, 2009 – 244 с.;
8. Кожевников Ю.Г. Оптические призмы. Проектирование, исследование, расчет. – М.: Машиностроение, 1984. – 152 с.;
9. Чуриловский В.Н., Халлилулин К.А. Теория и расчет призмённых систем. – Л.: Машиностроение, 1979. – 269 с.;
10. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. – М.: Машиностроение, 1969. – 672 с.;
11. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 237 с.;
12. Толстоба Н.Д., Цуканов А.А. Проектирование узлов оптических приборов. Учебное пособие. – СПб.: СПбГУИТМО, 2002. – 128 с.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

---

## **КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

Кафедра Компьютеризации и проектирования оптических приборов (первоначальное название «Кафедра военных оптических приборов», позднее - «Специальных оптических приборов») была основана в 1939 году. Она была призвана подготавливать инженеров по проектированию военных оптических приборов.

Как известно, к 1914 году потребности армии и флота удовлетворялись зарождающейся отечественной оптической промышленностью (включая филиалы фирм Цейсс и Герц в Риге) только на 30-40%. Остальные оптические приборы экспортировались. Фирма Карл Цейсс поставляла дальномеры, перископы сухопутные и для подводных лодок, бинокли, светосигнальные приборы. Фирма Герц – полевые артиллерийские панорамы, бинокли, большие стереотрубы, дальномеры, перископы для подводных лодок. Фирма Барр и Струд (Англия) поставляла оптические дальномеры, а фирма Росс - прямые зрительные трубы для морских прицелов. Фирмы Краус, Парра Мантуа (Франция) поставляли призмённые бинокли. Фирма Офичино Галилео (Италия) продавала перископы для подводных лодок.

Возглавил кафедру известный специалист в области военных оптико-механических приборов профессор К.Е. Солодилов. На кафедру из Государственного оптического института пришли работать профессора Резунов М.А. и Цуккерман С.Т. Под их руководством на кафедре проводилась также и научно-исследовательская работа. Были разработаны, например, конструкции новых прицелов: пулеметного ПП1, авиационного АСП, ракурсного курсового.

В послевоенный период времени до 1970 года кафедру возглавлял проф. С.Т. Цуккерман, с 1971 по 1984 гг. заведовал кафедрой проф. Сухопаров С.А. (бывший главный инженер ЦКБ фирмы ЛОМО), в 1985 –90 гг. руководил кафедрой заслуженный деятель науки и техники проф. Зверев В.А.. С 1990 кафедрой заведует их ученик проф. Латыев С.М.

Выпускники кафедры всегда славились как хорошие конструктора, благодаря сильной проектно-конструкторской научно- педагогической школе, созданной Солодиловым К.Е., Цуккерманом С.Т., Резуновым М.А., Кулагиным В.В., Сухопаровым С.А.. Сотрудниками школы написано около двадцати монографий, учебных пособий и справочников по проектированию оптических приборов, ставших настольными книгами студентов и инженерно-технических работников оптической промышленности.

Основные научные направления работы кафедры связаны с разработкой теоретических основ конструирования оптических приборов, их точностного расчета и юстировки, автоматизацией функционирования приборов и их проектирования, а также с созданием автоматизированных измерительных фотоэлектрических приборов.

На кафедре были разработаны подобные приборы различного назначения:

- Механокардиограф для медицинских учреждений;
- Прибор для измерения скоростей и давления жидкостей;
- Прибор управления по лучу строительными машинами;
- Кинематомер для контроля точности зубчатых колес и редукторов;
- Стенд для контроля прецизионных муфт;
- Телевизионный дальномер;
- Стенд для контроля надежности биноклей;
- Фотоэлектрический автоколлиматор;
- Цифровой индикатор перемещений.

По результатам научных исследований аспирантами и сотрудниками кафедры были защищены десятки кандидатских и докторских диссертаций.

В настоящее время кафедра готовит бакалавров и магистров по направлению 200400 «Оптехника», профили подготовки 200400.62 «Проектирование и метрология оптико-электронных приборов» и 200400.68.14 «Проектирование и метрология оптико-электронных приборов специального назначения» и инженеров по направлению 200401 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения», профиль подготовки 200401.65.03 «Оптико-электронные приборы и системы специального назначения».

Студенты, обучающиеся на кафедре, имеют усиленную подготовку по использованию средств автоматизированного конструирования, контролю, юстировке и испытанию приборов, вопросам обеспечения точности их функционирования.

На кафедре имеются следующие учебные лаборатории: Компьютерный класс; Конструкторский класс; Приборов технического зрения; Военных приборов; Оптических приборов; Контроля и юстировки приборов,

метрологии и сертификации оптико-электронных приборов. Ряд учебных занятий по военным и космическим приборам проводится в лабораториях базовых кафедр при ГОИ и ЛОМО.

По учебной и научной работе кафедра имеет многолетнее сотрудничество с Техническим университетом Ильменау (Германия), благодаря которому наиболее успевающие студенты, аспиранты и сотрудники кафедры стажировались в лабораториях этого университета.

В настоящее время штатное расписание кафедры состоит из 12-ти ставок профессорско-преподавательского состава (три профессора и девять доцентов) и трех инженеров. На кафедре обучается восемь аспирантов

Иванов Александр Николаевич

Проектирование узлов оптико-электронных приборов.  
Методические указания к выполнению курсового проекта  
Учебное пособие

В авторской редакции А.Н. Иванов

Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 100 экз

Отпечатано на ризографе